

FLEXIBILITÄTSOPTIONEN IN DER GRUNDSTOFFINDUSTRIE

METHODIK | POTENZIALE | HEMMNISSE

Herausgeber:
Florian Ausfelder
Antje Seitz
Serafin von Roon



GEFÖRDERT VOM

KOPERNIKUS
SynErgie **PROJEKTE**
Die Zukunft unserer Energie



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Tabelle 1: Vergleich der technischen Flexibilitätspotenziale (positiv: Lastreduktion, negativ: Lasterhöhung) der ausgewählten Prozesse

	Elektrolichtbogenofen	Glasschmelzwanne mit elektrischer Zusatzheizung	Roh- und Zementmahlung	Chlor-Alkali-Elektrolyse	Rohstoffschmelzanlage	
Randbedingungen	Stranggussanlage in ausgelastetem Werk	Kontinuierlicher Betrieb über bis zu mehr als 15 Jahre	Mahlwerk und integriertes Werk	Teillastbetrieb, Chlorspeicher, EDC-Speicher	Voll ausgelastete Anlage	
Teillastbetrieb	Nein	EZH: Ja	Nein	Ja	Ja	
Technisches Flexibilitätspotenzial	Durchschnitt¹/ Median²		eine große Mühle flexibel betrieben: Positiv: ca. 3 MW Negativ: ca. 3 MW	Positiv: 13 MW ² Negativ: 1 MW ²	Positiv: 0,3 MW Negativ: 0,2 MW	
	Bereich (Min – Max)		Positiv: 0-11 MW ³ Negativ: 0-8 MW ³	Positiv: 0-77 MW Negativ: 0-4 MW	Positiv: 0-4 MW Negativ: 0-0,5 MW	
	Potenzial für Deutschland (Anzahl Werke/ Anlagen Verfügbarkeit)	Positiv: 766 MW Negativ: – (26 52 %)	Positiv: 25 MW Negativ: 25 MW (≈60 ≤75 %)	je Werk eine große Mühle flexibel betrieben: Positiv: 172 MW Negativ: 172 MW (55 saisonabhängig)	Positiv: 421 MW Negativ: 15 MW (21 95 %)	Positiv: 23 MW Negativ: 3 MW (13 45 %)
	Abrufdauer	Wenige Minuten	Minuten	Bis zu 12 h abhängig von Betriebssituation und Produktvorrat ggf. länger möglich	Teillast: 15 Min. EDC-Speicher: bis zu mehreren Tagen	Positiv: 5-60 Min. Negativ: 15 Min.
	Abrufhäufigkeit	Mehrmals täglich	Je nach Abrufdauer, ggf. mehrmals täglich	Ggf. mehrmals täglich möglich	Mehrmals täglich	Mehrmals täglich
	Besonderheiten des Prozesses	Verfügbarkeit von Flexibilität nur bedingt planbar	Änderung der elektrischen Leistung muss durch Eintrag des fossilen Energieträgers substituiert werden	Starke Saisonalität; Mindestbetriebszeit von 4 h	Starke Einbindung in Prozessketten, Flexibilität abhängig von der Speicherbarkeit der Zwischenprodukte	Produktion in einem kontinuierlichen Chargenprozess

¹ Durchschnitt; ² Median; ³ Maximalwert für ein integriertes Werk. Entspricht der Summe aus Roh- und Zementmahlung.

Tabelle 2: Grundlegende Erfüllbarkeit der Anforderungsprofile in Abstimmung mit dem Betriebsleiter bei aktueller hoher Auslastung, bestehenden Lieferverpflichtungen und ohne Investitionsmaßnahmen

Branche	Prozess (Art der Prozesskette)	Anforderungsprofil 1 - Kurzfristige Anpassung der Last - Abrufdauer: 15 min - Vorankündigungszeit: wenige Minuten	Anforderungsprofil 2 - Verschieben der Last über mehrere Stunden - Abrufdauer: 3–12 h - Vorankündigungszeit: 1 Tag	Anforderungsprofil 3 - Reduktion der Last über mehrere Tage - Abrufdauer: 1–5 Tage - Vorankündigungszeit: 2–5 Tage
Stahl	Elektrolichtbogenofen (nur Strangguss)	(✓) _{pos}	✗	✗
	Elektrolichtbogenofen (Strang- und Blockguss)	✗	✗	✗
Glas	Schmelzwanne mit elektrischer Zusatzheizung	(✓) _{pos u. neg}	✗	✗
Zement	Zementmühlen	(✓) _{pos}	(✓) _{pos u. neg}	(✓) _{pos} ^S
	Rohmühle	(✓) _{pos} ^S	(✓) _{pos} ^S	✗
Chemie	Chlor-Alkali-Elektrolyse (ohne speicherbare Zwischenprodukte)	✓ _{pos}	✗	✗
	Chlor-Alkali-Elektrolyse (EDC-Produktion)	✓ _{pos}	✓ _{pos}	(✓) _{pos}
Feuerfest	Rohstoffschmelzanlage	(✓) _{pos u. neg}	✗	✗

✓ Erfüllbar (✓) Abhängig von den spezifischen Anforderungen der Prozesskette nur zu bestimmten Zeiten erfüllbar

✗ Nicht erfüllbar S Nur an wenigen Standorten erfüllbar

pos/neg Vorwiegende Art der verfügbaren Leistung, positiv: Lastminderung, negativ: Lasterhöhung. Bei hohen Auslastungen meistens asymmetrische Leistungsverfügbarkeit, da hohe, kurze Lastminderungen durch lange, geringe Lasterhöhungen ausgeglichen werden müssen.

FLEXIBILITÄTSOPTIONEN IN DER GRUNDSTOFFINDUSTRIE

METHODIK | POTENZIALE | HEMMNISSE

Herausgeber:
Florian Ausfelder
Antje Seitz
Serafin von Roon

Bericht des AP V.6 „Flexibilitätsoptionen und Perspektiven in der Grundstoffindustrie“ im Kopernikus-Projekt „SynErgie – Synchronisierte und energieadaptive Produktionstechnik zur flexiblen Ausrichtung von Industrieprozessen auf eine fluktuierende Energieversorgung“, gefördert durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung.

FÖRDERKENNZEICHEN

03SFK3P0 (VDEh-BFI)
03SFK3N0 (DEC)
03SFK3S0 (DIW)
03SFK3C1 (DLR)
03SFK3O0 (FFE)
03SFK3M1 (FGF)
03SFK3M0 (HVG)
03SFK3E1 (TUM)
03SFK3K0 (VDZ)
03SFK3L0 (WI)

VERWENDETE METHODIK ZUR ERMITTLUNG DER TECHNISCHEN FLEXIBILITÄTSPOTENZIALE UND -PERSPEKTIVEN

1. Definition der Potenzial-/Perspektiv-Begriffe und ihrer relevanten Parameter
2. Definition der Anforderungsprofile zur Flexibilitätserhebung
3. Identifizierung und technische Beschreibung der relevanten Prozesse
4. Definition und Strukturierung der Hemmnis-Ebenen
5. Modellierung der wirtschaftlichen Rahmenbedingungen
6. Interviews mit technischen Experten aus den Betreiberunternehmen und weiteren Experten
7. Ermittlung des technischen Potenzials und der technischen Perspektive des Prozesses und Hochrechnung auf die betriebenen Anlagen
8. Diskussion und Validierung in den branchenspezifischen Expertennetzwerken
9. Herausarbeiten der branchenspezifischen und branchenübergreifenden Aspekte
10. Modellierung der regionalen Verteilung in Deutschland



Abbildung 1.2:
Abgrenzung der verschiedenen Potenzialbegriffe

	2020	2030	2040
1 <ul style="list-style-type: none"> Kurzzeitige Anpassung Geringe Vorankündigungszeit 	✓	✓	✓
2 <ul style="list-style-type: none"> Verschiebung über 3 – 12 Std. 1 Tag Vorankündigungszeit 	(✓)	✓	✓
3 <ul style="list-style-type: none"> Lastreduktion über 1 – 5 Tage 2 – 5 Tage Vorankündigungszeit 	✗	(✓)	✓

Flexibilitätspotenzial
Flexibilitätsperspektive

Abbildung 1.8:
Relevanz der Anforderungsprofile in den Stützjahren der übergeordneten SynErgie-Analyse

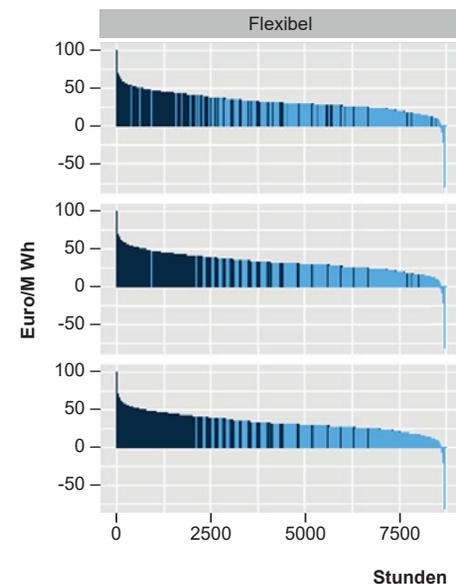


Abbildung 7.6:
Preisdauerlinien mit und ohne Nachtschichtbegrenzung

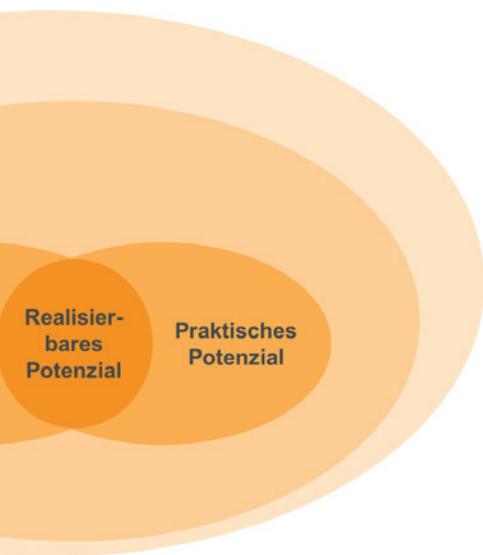
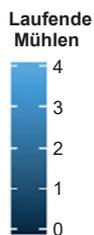
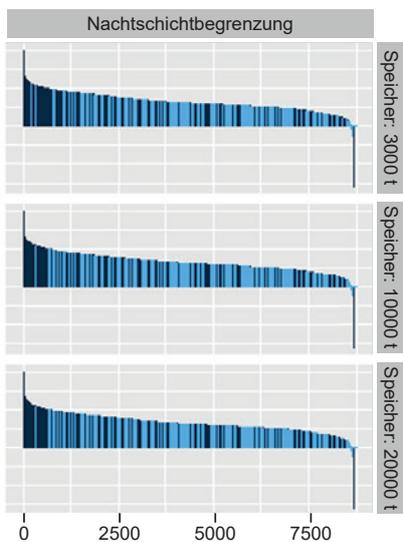


Abbildung 1.6:
Zeitlich-organisatorische Hemmnis-Ebenen



Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH **FRE**

Abbildung 9.1:
Standorte der untersuchten Referenzprozesse in Deutschland

unter verschiedenen Speicherszenarien

LISTE DER AUTOREN**Karin Arnold**

Wuppertal Institut für Klima,
Umwelt, Energie gGmbH,
Wuppertal

Florian Ausfelder

DECHEMA Gesellschaft für
Chemische Technik und
Biotechnologie e. V.,
Frankfurt am Main

Christian Dannert

Forschungsgemeinschaft
Feuerfest e. V., Höhr-Grenzhausen

Ralph-Uwe Dietrich

Deutsches Zentrum für Luft-
und Raumfahrt e. V., Stuttgart

Christa Dufter

Forschungsgesellschaft für
Energiewirtschaft mbH,
München

Hanna Ewa Dura

DECHEMA Gesellschaft für
Chemische Technik und
Biotechnologie e. V.,
Frankfurt am Main

Stefan Estelmann

Deutsches Zentrum für Luft-
und Raumfahrt e. V., Stuttgart

Bernhard Fleischmann

Hüttentechnische Vereinigung
der Deutschen Glasindustrie e. V.
(HVG), Offenbach am Main

Anna Gruber

Forschungsgesellschaft für
Energiewirtschaft mbH,
München

Andrej Guminski

Forschungsgesellschaft für
Energiewirtschaft mbH,
München

Georg Holtz

Wuppertal Institut für Klima,
Umwelt, Energie gGmbH,
Wuppertal

Tomke Janßen

Wuppertal Institut für Klima,
Umwelt, Energie gGmbH,
Wuppertal

Olaf Krause

Hochschule Koblenz,
Höhr-Grenzhausen

Karsten Neuhoff

Deutsches Institut für
Wirtschaftsforschung e. V., Berlin

Clara Orthofer

Technische Universität München,
Lehrstuhl für Energiewirtschaft
und Anwendungstechnik

Roland Pietruck

VDEh-Betriebsforschungsinstitut
(BFI), Düsseldorf

Jörn Richstein

Deutsches Institut für
Wirtschaftsforschung e. V., Berlin

Serafin von Roon

Forschungsgesellschaft für
Energiewirtschaft mbH, München

Holger Rosemann

VDEh-Betriebsforschungsinstitut
(BFI), Düsseldorf

Johannes Ruppert

VDZ gGmbH, Forschungsinstitut
der Zementindustrie, Düsseldorf

Antje Seitz

Deutsches Zentrum für Luft-
und Raumfahrt e. V., Stuttgart

Marten Sprecher

Stahlinstitut VDEh, Düsseldorf

Kevin Treiber

VDZ gGmbH, Forschungsinstitut
der Zementindustrie, Düsseldorf

Hartmut Wuthnow

Forschungsgemeinschaft
Feuerfest e. V., Höhr-Grenzhausen

BETEILIGTE PROJEKTPARTNER

VDEh-Betriebsforschungsinstitut (BFI),
Düsseldorf



DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik
und Biotechnologie e. V.,
Frankfurt am Main



Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung e. V.,
Berlin



Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V.,
Stuttgart



Forschungsgemeinschaft Feuerfest e. V.,
Höhr-Grenzhausen



Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH,
München



Hüttentechnische Vereinigung
der Deutschen Glasindustrie e. V. (HVG),
Offenbach am Main



Technische Universität München,
München



VDZ gGmbH, Forschungsinstitut
der Zementindustrie,
Düsseldorf



Wuppertal Institut für Klima, Umwelt,
Energie gGmbH,
Wuppertal



VORWORT

Die Kopernikus-Projekte wurden vom BMBF initiiert um zentrale Fragestellungen rund um die Energiewende zu bearbeiten und Lösungen in den entsprechenden Bereichen von den Grundlagen bis hin in die Anwendung zu entwickeln. Insgesamt wurden vier Projekte: P2X, E-Navi, Ensure und SynErgie ausgewählt.

Das Kopernikus-Projekt „SynErgie – Synchronisierte und energieadaptive Produktionstechnik zur flexiblen Ausrichtung von Industrieprozessen auf eine fluktuierende Energieversorgung“, untersucht die möglichen Beiträge industrieller Prozesse in dem Umfeld einer zunehmend fluktuierender werdenden Stromversorgung, insbesondere mit Blick auf die Ermittlung von Flexibilitätspotenzialen.

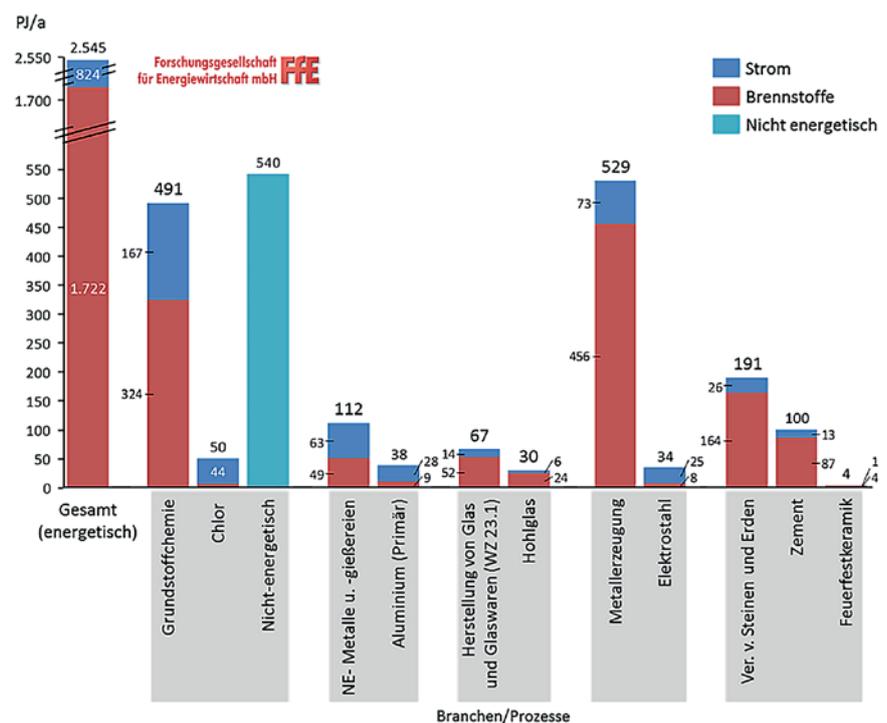
Aus dem nicht zum Zuge gekommenen Konkurrenzprojekt „INFLUX – Optionen der industriellen Produktion zur Nutzung einer fluktuierenden Bereitstellung erneuerbarer Energien“ wurde ein kleiner Teil aus der geplanten Potenzialanalyse in das SynErgie Projekt in Form des Arbeitspakets AP V.6 „Flexibilitätsoptionen und Perspektiven in der Grundstoffindustrie“ integriert.

Dieses Arbeitspaket legt mit diesem Bericht die Ergebnisse der Arbeiten aus dem ursprünglich bewilligten 15-monatigen Förderungszeitraum vor.

Die energieintensive Grundstoffindustrie (Metallerzeugung, Chemie, Papier, Zement, Glas, Keramik) ist verantwortlich für rund $\frac{3}{4}$ des industriellen Energieverbrauchs und über die Hälfte des industriellen Stromverbrauchs in Deutschland, vgl. Abbildung 1. Dies ist auf die energieintensiven Prozesse der chemischen und physikalischen Materialumwandlungen zurückzuführen.

Abbildung 1: Energieeinsatz in der Grundstoffindustrie 2015 (AGEB, FhG ISI)¹

¹ C. Rohde, FhG ISI, „Erstellung von Anwendungsbilanzen für die Jahre 2013 bis 2016 Studie für die Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V. (AGEB) – Entwurf“, Karlsruhe 2017 und eigene Berechnungen. Online verfügbar unter: https://ag-energiebilanzen.de/index.php?article_id=29&fileName=isi_-_einzelbericht_industrie_2013_-_2016.pdf



Gleichzeitig sind die Prozesse der verschiedenen Branchen sehr divers und auch die Implementierung eines Prozesses variiert stark zwischen verschiedenen Standorten. Eine Erfassung des Flexibilitätpotenzials über eine einfache Hochrechnung würde daher kein verlässliches Ergebnis liefern. In dem Arbeitspaket wurde daher ein branchenübergreifender Ansatz gewählt, in dem sich (branchenspezifisches) technisches und methodisches Know-how optimal ergänzen.

Die einzelnen Branchen sind durch die Forschungseinrichtungen der Verbände bzw. die wissenschaftlich-technischen Vereine der Branchen vertreten. Diese bringen ein tiefes Prozessverständnis, genaue Kenntnisse der Branche und ein Expertennetzwerk ein, so dass eine korrekte Einordnung der Ergebnisse aus den Befragungen einzelner Experten oder Unternehmen ermöglicht wird. Die akademischen Partner bringen methodisches Know-how und ihre inhaltliche Schwerpunkte in die Beantwortung der Forschungsfragestellungen ein.

In dieser Kombination ist es möglich das Thema integriert branchenübergreifend und branchenspezifisch zu erfassen und zu bearbeiten. Dabei werden die Gemeinsamkeiten ebenso wie die Unterschiede deutlich, ohne dass eine verkürzte Perspektive die Komplexität der Fragestellungen innerhalb der Branchen vernachlässigt.

Im vorliegenden Bericht wird die gemeinsam mit den Partnern im Cluster V des SynErgie-Projektes erarbeitete Vorgehensweise zur Ermittlung von Flexibilitätpotenzialen dargestellt. Die folgenden Kapitel beschäftigen sich mit den ausgewählten Prozessen aus den beteiligten Branchen (Stahl, Zement, Glas, Chemie und Feuerfest), bevor im letzten Teil eine branchenübergreifende Auswertung und eine Einordnung der Ergebnisse erfolgt.

Die Herausgeber möchten im Namen aller beteiligten Partner im AP V.6 dem BMBF, insbesondere Herrn Dr. Christoph Rövekamp, für die Förderung dieser Arbeiten, den Vertretern des PTJ für die Begleitung des Vorhabens, den Kollegen des SynErgie-Projektes, insbesondere den Koordinatoren, der Geschäftsstelle und den anderen Partnern im Cluster V, für die gute Zusammenarbeit sowie den Experten aus den Unternehmen und in den Netzwerken für die Mitarbeit und kritische Unterstützung ganz herzlich danken.

Wir hoffen, dass der vorliegende Text in Ihnen aufmerksame Leser findet und einen wertvollen sachlichen Beitrag zur gesellschaftlichen Diskussion über Flexibilitätsoptionen darstellt.



Dr. Florian Ausfelder
DECHEMA Gesellschaft
für Chemische Technik und
Biotechnologie e. V.



Dr. Antje Seitz
Deutsches Zentrum für
Luft- und Raumfahrt e. V.



Dr. Serafin von Roon
Forschungsgesellschaft für
Energiewirtschaft mbH

EXECUTIVE SUMMARY

The continuous expansion of fluctuating renewable electricity generation within the power sector, mainly from photovoltaic and wind power, will lead to a strong temporal and spatial variation in the supply of renewable electricity in the power grid. This causes novel challenges for a power system that so far is designed to match current demand with electricity generation by fossil-based power plants.

The role of conventional electricity generation will shift from providing base load towards complementing fluctuating renewable electricity generation. Additionally, it is foreseeable that there will be more occasions, when renewable electricity generated exceeds the current demand.

Next to the challenge of efficient management of overall supply, the question remains on to which extent the consumption of electricity can be matched to the temporally and spatially available supply.

The different production processes of the energy-intensive process industries (metal production, chemicals, cement, glass and ceramics) are mainly based on fuels for their energy input; however they are also responsible for about $\frac{2}{3}$ of the industrial consumption of electricity in Germany. These processes might therefore have the largest leverage to provide flexibility to the power sector.

This analysis investigates key processes from the industry sectors steel, glass, cement, chemicals and refractory materials with respect to their options to provide flexibility in the use of electricity. A common methodology (chapter 1) was developed and applied to unify definitions and terms, as well as methods for data collection and evaluation.

An unambiguous definition and a clear distinction of different concepts of “potentials” are central for this study. The “theoretical” potential for flexibility describes the difference between the full load and the actual load of a plant at any point in time. The “technical” potential for flexibility considers operating conditions like safe process windows. In this study, an additional constraint is introduced, which stipulates that quantity and quality of production remain constant. The “economic” potential for flexibility is constrained by economic consideration of the enterprise, while the “practical” potential for flexibility is limited by constraints like regulatory constraints, work schedules, etc. Within this layered structure, the “feasible” potential for flexibility of a given process or plant is defined as the intersection of economic and practical potentials for flexibility. Currently available flexibility options are defined as potentials for flexibility, while possible future developments are defined as perspectives for flexibility.

The potentials for flexibility, i.e. the options to vary the operation of a process or plant to offer flexibility, are structured according to three temporal flexibility profiles that are based on expected developments of the future power supply. Flexibility profile 1 describes a compensation of a short-term variation in the load profile for 15 min with short-timed advance notice. Flexibility profile 2 mirrors diurnal variations in the load profile and requests compensation for 3–12 hours and an advance notice

of a day. Flexibility profile 3 addresses the issue of “dark doldrums”, i.e. a situation with little or no wind or solar power contribution to the grid, with compensation of 1–5 days and several days of advance notice.

This study reports quantitative technical potentials and perspectives for flexibility on the investigated processes individually and extrapolated for Germany. Additional aspects affecting the other potentials and perspectives are raised and discussed qualitatively.

Possible constraints for tapping into these potentials are identified and structured into the layers of “market environment and customer relations”, “in-house organization” and “technical plant”. These layers of constraint are significantly characterized by the “regulatory framework” under which the enterprise operates.

A model-based economic analysis focusses on entrepreneurial opportunities for decision making to minimize electricity costs at given production and sales volume under varying regulatory frameworks and practical constraints, such as shift constraints and limited foresight.

Furthermore, the validity of the temporal flexibility profiles and their possible cost structures are analyzed with historical market data and potential model-based future developments of the electricity market.

Within each energy-intensive industry sector, steel, glass, chemicals, cement and refractory materials, one process was selected, based on its importance within the sector, its electricity consumption and its suspected technical feasibility to provide flexibility.

Each of these processes is described with their technical properties within the corresponding chapters. Their options to provide flexibility were discussed intensively with selected technical experts from the operating companies, who provided the basic data for an estimation of potentials and perspectives for flexibility, as well as additional aspects and constraints.

These findings were then consolidated with technical experts within expert sector networks with respect to being representative and valid. These consolidated findings are the base for the quantitative assessment of potentials and perspectives for flexibility.

Within steel industry (chapter 2), the electric arc furnace is investigated. In Germany, roughly one third of the crude steel production is produced via this process. Scrap is melted in electric arc furnaces and then processed in ladles, where additional metallurgical reactions are performed, before the liquid steel is subject to continuous or ingot casting. The required energy input via the electric arc into the steel is subject to numerous disruptions by individual process steps, like additional charging of scrap or blowing with technical gases. These disruptions however are not available for flexibility since they are characteristic of the temporal progression of the process. Overall, the power-on-time ratio is only about 50 %. An increase of load is generally not possible, since most electric arc furnaces are operated close to the upper production limit. Load reduction would reduce production, if no short time compensation is available. Within a continuous cast plant configuration one undisrupted work shift

of 8 hours generates a time window of 20 minutes, which would be available for flexibility, since the production capacity for continuous casting is in general slightly smaller than the production capacity of the electric arc furnace. This time window can address flexibility within flexibility profile 1, while flexibility profiles 2 and 3 lead to loss of production that cannot be compensated.

Within chapter 3, flexibility potentials and perspectives are discussed for the production process of container glass. This process is responsible for more than 50 % of the overall production volume of salable glass products in Germany. About $\frac{3}{4}$ of these tank furnaces within the container glass industry are equipped with electric boosting (an auxiliary electric heating device), which supplies around 5–15 % of the required thermal energy to the melt, for melting coloured glass with high output. The electric boosting complements the main thermal input via combustion of natural gas. Glass melting furnaces are operated continuously over up to 15 years and more. During this time, there is no interruption of the glass melting process. However, within limits, a variation of the electrical thermal input via electric boosting is possible. Changes of electric load need to be compensated by respective adjustment of the thermal input via the combustion of fossil fuels. Deviations from the standard operating window are only possible within short-time periods as represented in flexibility profile 1. Longer time periods and associated major temperature variations, especially in the metal line, risk premature local corrosion damage on the refractory lining of the furnace.

Chapter 4 investigates the flexibility options by flexible operation of mills for raw meal and cement grinding within the context of integrated cement plants and grinding stations. These mills represent the largest electricity consumer in the cement industry. The milling process aims to achieve a homogenous distribution and at the same time compliance with required material specifications. In principle, a short shutdown of the mills is more feasible than a fast start-up on short notice, since the latter does not reach the required thermal conditions in the mill to comply with material specifications. Both mills are integrated within the overall clinker and cement production process chain but are sandwiched between silos for the raw materials and products before and after the mills respectively. The capacities of the silos provide options for some flexibility. The cement industry is subject to a seasonal variation of its production due to variations in demand by the construction industry. In high-season (spring to fall), cement plants are in some times operated at maximum capacity and then do not have practical potential to offer demand side flexibility. In low-season however, many plants operate below their maximum capacity and could use their mills to offer flexibility to the grid. Within a model-based approach by VDZ, all mills in Germany are considered and a statistical average was assessed for modeling the possible contribution of demand side flexibility. Potential to satisfy flexibility profile 1 can be provided. Flexibility profiles 2 and 3 can normally be addressed at low-season and times of partial capacity use.

Chapter 5 investigates the chlorine-alkaline electrolysis, chemical industry's largest electrical energy consumer. It is operated in three different process variants: Mercury-process, diaphragm-process and the membrane process. The chlorine product is continuously processed by its down-stream processes depending on the specific configuration of the

integrated plant site. Several different technical flexibility options are available for the chlorine-alkaline electrolysis. All options are analyzed with respect to their respective technical potential for flexibility and estimated costs are derived: Operation of the plant between maximum and minimum load, buffering of production with optional chlorine storage, operating the electrolysis in combination with an external battery as virtual power plant, buffering production via ethylene dichloride as storable intermediate within the polyvinylchloride production process chain and operation of switchable oxygen depletion cathodes in the membrane variant of the chlorine-alkaline electrolysis. All options can supply positive flexibility within flexibility profile 1. In general, this leads to loss of production however, since the average plant use of over 95 % prevents offering negative flexibility and the compensation of production loss by increased production. Utilizing ethylene dichloride as intermediate storage allows positive flexibility (i.e. reduction of load) in all flexibility profiles. The overall effect of operating an oxygen depletion cathode, depending on the operation mode, is a symmetric potential and perspective for flexibility, i.e. positive and negative flexibility are available to the same extent on all flexibility profiles. The main factors in the cost evaluation are the loss of added value by loss of production, required investment costs and loss of preferential treatment with respect to grid fees.

Chapter 6 focusses on the production of synthetic raw materials via a raw materials melting furnace for the production of refractory materials. These melting processes require very high temperatures of up to 3000 °C. This study investigates an electric arc furnace for the production of fused corundum. The furnace is usually operated with an electrical load between 3,2 and 3,7 MW. The required energy input depends on the enthalpy for melting the product. Negative flexibility can be offered within flexibility profile 1, with a notice period of one hour by increasing the electrical load of the furnace to up to 4 MW. Positive flexibility can be provided by reducing the electrical load or by short-timed turning-off the furnace, if the shed load can be recovered within one production cycle of four hours. Cooling-down and solidification of the melt has to be avoided at any cost. Both raw materials and products are solids and can be stored for later use in silos. Therefore, pre- and subsequent processing does not limit the flexibility options.

A model-based economic analysis in chapter 7 focusses on the options for entrepreneurial decision making to minimize electricity cost at given production and sales volume, considering the regulatory framework and practical constraints like shift planning and limited foresight.

Chapter 8 presents a cross-sectorial assessment based on the sector-specific analyses of the previous chapters. The technical potentials for flexibility of the investigated processes are shown in table 1.

An overview on how the flexibility of the processes under consideration can currently contribute towards the defined flexibility profiles is given in table 2.

Table 1: Comparison of technical flexibility potentials (positive: Load reduction, negative: Load increase) of the investigated processes.

	Electric arc furnace	Container glass production	Raw mill and cement grinding	Chlorine-alkaline-elektrolysis	Raw materials melting furnace	
Framework	Continuous cast plant operating at full capacity	Continuous production for up to 15 years and more	Grinding station and integrated cement plant	Partial load possible chlorine storage, ethylene dichlorid storage	Operating at full capacity	
Operation at partial load possible	No	Boosting electrodes: Yes	No	Yes	Yes	
Technical potential for flexibility	Mean value¹ / median²		One large mill in flexible operation: Positive: ca. 3 MW Negative: ca. 3 MW	Positive: 13 MW ² Negative: 1 MW ²	Positive: 0,3 MW Negative: 0,2 MW	
	Range (min – max)		Positiv: 0-11 MW ³ Negativ: 0-8 MW ³	Positive: 0-77 MW Negative: 0-4 MW	Positive: 0-4 MW Negative: 0-0,5 MW	
	Potential in Germany (Number of production units Availability)	Positive:766 MW Negative: – (26 52 %)	Positive: 25 MW Negative: 25 MW (≈60 furnaces ≤75 %)	One large mill per plant in flexible operation: Positive: 172 MW Negative: 172 MW (55 Seasonal)	Positive: 421 MW Negative: 15 MW (21 95 %)	Positive: 23 MW Negative: 3 MW (13 45 %)
	Duration of recall	Several minutes	Minutes	Up to 12 h depending on plant capacity use and product stock, sometimes longer	Partial Load: 15 min. EDC-storage: Up to several days	Positive: 5–60 min. Negative: 15 min.
	Frequency of recall	Several times a day	Depending on duration up to several times a day	Several times a day possible	Several times a day	Several times a day
Characteristic attributes of the process	Availability for flexibility difficult to project	Variation of electrical load has to be compensated by input of fossil fuel	Strong seasonal dependence, minimum operation time 4 h	Strong integration with up- and downstream processes. Flexibility depends on ability for storage of intermediates	Continuous batch process	

¹ Mean value; ² Median; ³ Maximum value for integrated cement plant, sum of raw material and cement grinding.

Table 2: Process compliance towards the defined flexibility profiles in consultation with the plant manager under consideration of the currently high degrees of capacity utilization, delivery commitments towards the customers and without additional investments.

Sector	Process (process chain)	Flexibility profile 1 -Short-term compensation of load -Load change period: 15 min -Advance notice: Several minutes	Flexibility profile 2 -Compensation of load for several hours -Load change period: 3–12 h -Advance notice: 1 day	Flexibility profile 3 - Reduction of load for several days -Load change period: 1–5 days -Advance notice: 2–5 days
Steel	Electric arc furnace (continuous casting)	(✓) _{pos}	✗	✗
	Electric arc furnace (continuous and ingot casting)	✗	✗	✗
Glass	Tank furnaces (electric boosting)	(✓) _{pos and neg}	✗	✗
Cement	Cement mills	(✓) _{pos}	(✓) _{pos and neg}	(✓) _{pos} ^S
	Raw mix mills	(✓) _{pos} ^S	(✓) _{pos} ^S	✗
Chemicals	Chlorine-alkaline-aelektrolysis (without storable intermediates)	✓ _{pos}	✗	✗
	Chlorine-alkaline-aelektrolysis (EDC production)	✓ _{pos}	✓ _{pos}	(✓) _{pos}
Refractory Materials	Raw materials melting furnace	(✓) _{pos and neg}	✗	✗

✓ Can be fulfilled

(✓) Can only be fulfilled at certain times, due to process-chain specific constraints

✗ Cannot be fulfilled

S Can only be fulfilled at certain plant sites

pos/neg Dominant type of flexibility, positive: Reduction of load, negative: Increase of load. In case of high degrees of capacity utilization, mainly asymmetric flexibility can be provided, since large but short reductions of load must be compensated by small but long increases of load.

Additionally, specific constraints preventing tapping into the identified technical potentials for flexibility and macroeconomic aspects are discussed. Furthermore, technical developments which might lead to a higher technical potential for flexibility for the processes covered are presented.

Chapter 9 addresses aspects of spatial distribution of the processes under investigation. Moreover, the relation between the spatial distribution and the residual load – difference between load and volatile electricity generation from wind and photovoltaics – is analyzed. In some hours, critical situations could be mitigated by appropriate calls for flexibility. However, it must be avoided that the subsequent compensation of such flexibility calls exacerbates critical situations in other hours.

Chapter 10 summarizes the methodology and the main sector-specific and cross-sectorial results and placed into the context of future work. The main cross-sectorial results are:

1. Fulfilling the delivery commitment towards the customers is always of higher priority than providing flexibility.
2. Within the processes of the energy intensive process industries, there is an opposing trend of energetic efficiency versus flexibility.
3. Changes and variations of process conditions lead to changes in product quality.
4. The interdependencies between frequent, fast load changes and their effects on the plant and its critical plant components have not been sufficiently investigated yet.
5. Options for flexibility are site-dependent on the respective process chains and the opportunities to store some intermediate product within the process chain.
6. Potentials for load increase are very small if the process is operated close to maximum capacity. Potentials for load reduction without subsequent compensation are generally subject to loss of production.
7. In case of shift load operation, production loss needs to be recovered within a short period of time.
8. Possible loss of preferential treatment or its extent to negotiate individual grid fees according §19 Abs. 2 (StromNEV) is a major constraint for enterprises to offer flexibility.
9. The enterprises within the energy-intensive process industries insist on the primacy of operating needs with respect to external recalls for flexibility.
10. Longterm investments will only be enacted, if sufficient conditions are met for sufficient planning reliability.
11. Technical process limitations are in general not the critical constraints to offer flexibility.

Notwithstanding the diversity of the processes under investigation in this study, these results mirror the main challenges for the energy-intensive process industries in face of adapting towards increasing input of fluctuating renewable power generation into the power grid. At the same time, there are potentials for flexibility beyond the currently utilized ones. The extent to which these potentials and perspectives are tapped into is critically depending on how regulatory frameworks are designed.

ZUSAMMENFASSUNG

Der zunehmende Ausbau fluktuierender erneuerbarer Energien zur Stromerzeugung, im Wesentlichen Photovoltaik und Windenergie, führt absehbar zu starken zeitlichen und auch örtlichen Variationen des Angebots erneuerbar erzeugter Elektrizität im Stromnetz. Damit ergeben sich grundsätzlich neue Herausforderungen für ein Stromsystem, das bisher bedarfsgeführt das Angebot an elektrischer Energie durch einen konventionellen Kraftwerkspark angepasst hat.

Der konventionelle Kraftwerkspark übernimmt statt der Bereitstellung einer Grundlast zunehmend eine komplementäre Funktion und kompensiert erneuerbare fluktuierende Stromerzeugung. Darüber hinaus sind auch immer häufiger Zeiträume absehbar, in denen die erneuerbare Stromerzeugung über den aktuellen Bedarf an Strom hinausgeht.

Neben der Herausforderung der effizienten Steuerung des Angebots stellt sich auch die Frage, in welchem Umfang der Verbrauch an elektrischer Energie dem zeitlich und örtlich vorhandenen Angebot angepasst werden kann.

Die verschiedenen Prozesse der energieintensiven Grundstoffindustrie (Metallerzeugung, Chemie, Papier, Zement, Glas und Keramik) basieren überwiegend auf Brennstoffen als Energieeintrag, dennoch sind sie verantwortlich für rund $\frac{2}{3}$ des industriellen Stromverbrauchs in Deutschland. Damit stellen diese Prozesse potenziell den bedeutendsten Hebel für eine Flexibilisierung des Stromsystems dar.

In dieser Analyse werden zentrale Prozesse aus den Branchen Stahl, Glas, Zement, Chemie und Feuerfest hinsichtlich ihrer Flexibilisierungsoptionen untersucht. Für die einheitliche Bewertung der Flexibilitätsoptionen wird eine einheitliche Begrifflichkeit und Methodik der Datenerhebung und -bewertung entwickelt und angewendet. Diese ist im Kapitel 1 „Methodisches Vorgehen und Voruntersuchungen zu Flexibilitätspotenzialen“ ausgeführt.

Zentral ist dabei die eindeutige Definition und Abgrenzung der verschiedenen Potenzialbegriffe. Das theoretische Flexibilitätspotenzial beschreibt die Lastdifferenz einer abgeschalteten Anlage im Vergleich zu einer durchschnittlich betriebenen Anlage. Das technische Flexibilitätspotenzial berücksichtigt technische Randbedingungen, wie den sicheren Betrieb der Anlage. Darüber hinaus wird in dieser Studie vorausgesetzt, dass die Produktionsmenge und die Produktqualität gleich bleiben. Das wirtschaftliche Flexibilitätspotenzial wird begrenzt durch betriebswirtschaftliche Faktoren, während das praktische Flexibilitätspotenzial durch Hemmnisse, wie z.B. Regularien, Arbeitsordnungen etc. limitiert wird. In dieser Struktur bildet die Schnittmenge des praktischen und wirtschaftlichen Flexibilitätspotenzials das realistische Flexibilitätspotenzial, was für eine gegebene Anlage zugänglich ist. Aktuell verfügbare Optionen werden als Flexibilitätspotenziale definiert, während ggfs. zukünftig verfügbare Optionen als Flexibilitätsperspektiven ausgewiesen werden.

Das Flexibilitätspotenzial, d.h. die Möglichkeiten der Flexibilisierung der Anlage, wird strukturiert nach drei Anforderungsprofilen, die sich an den

zu erwarteten Herausforderungen der zukünftigen Stromversorgung orientieren. Anforderungsprofil 1 entspricht einer kurzfristigen Variation der abgerufenen Leistung (15 Minuten) zur Kompensation einer kurzfristigen Fluktuation der Stromerzeugung mit geringer Vorankündigungszeit. Anforderungsprofil 2 orientiert sich an tageszeitlichen Schwankungen der erneuerbaren Stromerzeugung und entspricht einer Abrufdauer von 3–12 Stunden bei einer Ankündigungszeit von rund einem Tag. Anforderungsprofil 3 hingegen erfasst Ereignisse wie eine „Dunkelflaute“ mit Abrufdauern von 1–5 Tagen und mehreren Tagen Vorankündigungszeit.

Diese Untersuchung weist die technischen Flexibilitätspotenziale, bzw. -perspektiven für die untersuchten Prozesse quantitativ aus und ermittelt dieses Potenzial auch für die in Deutschland betriebenen Prozesse. Weiterführende Aspekte zur Erfassung der anderen Flexibilitätspotenziale und -perspektiven werden qualitativ erfasst und dargestellt.

Die möglichen Hemmnisse für eine Nutzung des identifizierten Potenzials werden durch eine Einteilung in die Hemmnis-Ebenen „Marktumfeld und Kundenbeziehungen“, „Innerbetriebliche Organisation“ und „Technische Anlage“ erfasst und strukturiert. Diese Hemmnis-Ebenen werden von der vierten Hemmnis-Ebene „Regulatorische Rahmenbedingungen“ maßgeblich geprägt und beeinflusst.

Die modellgestützte wirtschaftliche Analyse fokussiert sich auf die unternehmerischen Entscheidungsmöglichkeiten zur Minimierung der Strombeschaffungskosten bei gegebenen Produktions- und Verkaufsmengen unter Berücksichtigung eines gegebenen regulatorischen Rahmens.

Weitergehend werden die Validität der Anforderungsprofile und deren mögliche Kostenstrukturen auf dem Strommarkt durch eine Analyse der historischen Marktdaten und möglicher, modellgestützter zukünftiger Entwicklungen des Strommarktes untersucht.

Aus den Branchen der energieintensiven Grundstoffindustrien Stahl, Glas, Zement, Chemie und Feuerfest wurde jeweils ein Prozess ausgewählt, der aufgrund seiner Bedeutung und Verbreitung in der jeweiligen Branche, seines elektrischen Energiebedarfs und seiner technischen Voraussetzungen als prinzipiell interessant und geeignet für die Bereitstellung von Flexibilität eingeschätzt wird.

Diese Prozesse werden mit ihren technischen Eigenschaften in den jeweiligen Kapiteln detailliert beschrieben. Mit Experten aus ausgewählten Unternehmen wurden die möglichen Flexibilitätsoptionen intensiv diskutiert und die Datengrundlage für eine Abschätzung der Flexibilitätspotenziale, -perspektiven und die Diskussion weitergehender Aspekte und Hemmnisse erhoben.

Diese Erkenntnisse wurden mit den technischen Experten innerhalb der Branchennetzwerke auf ihre Repräsentativität und Gültigkeit abgestimmt und bilden die Grundlage für die quantitativen Abschätzungen des technischen Flexibilitätspotenzials und der technischen Flexibilitätsperspektiven.

Im Kapitel 2 „Flexibilitätspotenziale und -perspektiven des Elektrolichtbogenofen“ wird der Elektrolichtbogenofenprozess für die Eisen- und Stahlherstellung analysiert. Mit diesem Prozess wird rund ein Drittel des Rohstahls in Deutschland produziert. Dabei wird Schrott in einem Elektrolichtbogen aufgeschmolzen, in einen Pfannenofen überführt und nach weiteren metallurgischen Schritten im Strang- und gegebenenfalls Blockguss weiterverarbeitet. Dabei wird der notwendige Energieeintrag in den Schrott durch den Elektrolichtbogen immer wieder aufgrund einzelner Prozessschritte, wie zum Beispiel erneutes Chargieren oder Gaseintrag, unterbrochen. Diese Unterbrechungen sind aber für eine Flexibilitätsbereitstellung nicht verfügbar, da ihre Taktung aus dem Prozess entsteht und keine zeitlichen Verschiebungen erlaubt. Insgesamt führt diese Betriebsweise zu einem Power-on Zeit Verhältnis von nur 50 %. Eine erhöhte Leistungsaufnahme ist in der Regel nicht möglich, da der Elektrolichtbogenofen unter Vollast betrieben wird, wenn er eingeschaltet ist. Eine Lastreduktion führt zu Produktionsausfall, wenn diese nicht in relativ kurzer Zeit nachgeholt werden kann. In einer Konfiguration mit nachfolgendem Strangguss kann innerhalb einer störungsfreien Schicht (8 Stunden) ein Zeitfenster von 20 Minuten für Flexibilität erzielt werden, da die Produktionskapazität der Strangguss-Anlage i.d.R. leicht unter der des Elektrolichtbogenofens dimensioniert ist. Dies ermöglicht prinzipiell das Anbieten von Flexibilität im Anforderungsprofil 1. Anforderungsprofil 2 und 3 führen zu Produktionsverlusten, die nicht mehr nachgeholt werden können.

Die Behälterglasherstellung, beschrieben im Kapitel 3 „Flexibilitätspotenziale und -perspektiven in der Behälterglasherstellung“, stellt mit einem Produktionsmengenanteil von über 50 % an der Gesamtmenge des verkaufsfähigen Glases einen bedeutenden Prozess in der Glasindustrie dar. Viele (rund $\frac{3}{4}$) der Behälterglasschmelzwannen sind mit einer elektrischen Zusatzheizung ausgestattet, die ca. 5–15 % der benötigten Heizenergie zur Schmelze des Glases beitragen kann und den Hauptenergieträger Erdgas ergänzt. Glasschmelzwannen werden kontinuierlich über Zeiträume von bis zu 15 Jahren und mehr betrieben und eine Unterbrechung des Schmelzvorganges ist nicht möglich. Eine eingeschränkte Variation des elektrischen Energieeintrags über die elektrische Zusatzheizung ist möglich. Eine elektrische Laständerung muss durch eine entsprechende Variation des fossilen Brennstoffes kompensiert werden. Eine Abweichung vom „normalen“ Betriebsfenster ist nur über relativ kurze Zeiträume, d.h. im Rahmen des Anforderungsprofils 1 möglich. Über längere Zeiträume besteht auch die Gefahr von lokalen vorzeitigen Korrosionsschäden an der Feuerfestauskleidung der Schmelzwanne.

Das Kapitel 4 „Flexibilitätspotenziale und -perspektiven der Roh- und Zementmahlung“ untersucht den Einsatz von Rohmühlen zur Mahlung des Rohmehls und Zementmühlen zur Mahlung des Zements in der integrierten Zementherstellung und in Zementmahlwerken. Diese Mühlen sind die bedeutendsten Stromverbraucher in der Zementindustrie. Der Mahlvorgang zielt auf eine möglichst homogene Verteilung und die Einhaltung spezifischer Materialspezifikationen ab. Prinzipiell ist ein kurzfristiges Abschalten der Mühlen eher möglich als ein kurzfristiges Anfahren, da sich bei Letzterem nicht die thermischen Bedingungen in der Mühle einstellen, die für die Einhaltung der Qualitätsanforderungen notwendig sind. Die Mühlen sind mit Silos für die Vorprodukte und Mahlprodukte in die Prozesskette integriert, so dass die Silokapazitäten

eine gewisse Flexibilität zulassen. Die Zementindustrie unterliegt einem saisonalen Produktionszyklus, der durch die Aktivitäten der Bauindustrie bestimmt wird. In der Hochsaison (Frühjahr-Herbst) produzieren die Zementwerke während einiger Zeit unter Volllast und weisen dann praktisch kein Flexibilisierungspotenzial auf. In der Nebensaison arbeiten viele Werke unter Teillast und können mit den Mühlen Flexibilität anbieten. Im Rahmen des VDZ-Modells wurden alle Mühlen in Deutschland im statistischen Durchschnitt erfasst und ihr möglicher Beitrag zur Flexibilität modelliert. Zu dem Anforderungsprofil 1 kann zu Betriebszeiten der Mühlen im ganzen Jahresverlauf ein Flexibilitätsbeitrag geleistet werden. Den Anforderungsprofilen 2 und 3 kann normalerweise entsprochen werden, wenn die Anforderungen in der Nebensaison oder in Zeiten teilweiser Auslastung anfallen.

Das Kapitel 5 „Flexibilitätspotenziale und -perspektiven der Chlor-Alkali Elektrolyse“ befasst sich mit den größten einzelnen Stromverbrauchern in der chemischen Industrie. Sie wird in den Verfahrensvarianten der Amalgam-, Diaphragma- und Membran-Elektrolyse betrieben. Chlor wird vor Ort im Rahmen der standortspezifischen Prozesskette weiterverarbeitet. Für die Chlor-Alkali Elektrolyse stehen verschiedene Flexibilitätsoptionen zur Auswahl. Alle Optionen wurden in Bezug auf ihr technisches Flexibilitätspotenzial analysiert und die Kosten abgeschätzt, nämlich: Betrieb der Anlage im Prozessfenster zwischen Volllast und minimaler Teillast, Pufferung der Produktion über einen eventuell vorhandenen Chlorspeicher, Betrieb der Elektrolyse in Kombination mit einer Batterie als virtuelles Kraftwerk, Pufferung der Produktion über Ethylendichlorid als speicherbares Zwischenprodukt der Polyvinylchlorid-Produktion sowie der Einsatz von schaltbaren Sauerstoffverzehrkathoden in der Membran-Elektrolyse. Alle diese Optionen können positive Flexibilität im Anforderungsprofil 1 anbieten, was in der Regel mit Produktionsverlust einhergeht, da die hohe Auslastung ($\geq 95\%$) das Anbieten von negativer Flexibilität und damit ein auch Nachholen der Produktion verhindert. Die Nutzung von Ethylendichlorid als Zwischenspeicher ermöglicht das Anbieten von positiver Flexibilität (d.h. Lastreduktion) in allen Anforderungsprofilen. Der Einsatz der schaltbaren Sauerstoffverzehrkathode führt, je nach Betriebsstrategie, bis hin zu einem symmetrischen Flexibilitätspotenzial/-perspektive, d.h. positive und negative Flexibilität können im gleichen Umfang angeboten werden. Die wesentlichen Faktoren in der Kostenabschätzung sind der Wertschöpfungsverlust durch entgangene Produktion, notwendige Investitionen sowie eventuell der Wegfall der Begünstigung für individuelle Netzentgelte.

Im Kapitel 6 „Flexibilitätspotenziale und –perspektiven in einer Rohstoffschmelzanlage für Feuerfestmaterialien“ wird eine Rohstoffschmelzanlage zur Herstellung synthetischer Rohstoffe für die Herstellung von Feuerfestmaterialien untersucht. Dafür werden sehr hohe Temperaturen von bis zu 3000 °C benötigt. In dieser Studie wurde ein Lichtbogenofen zur Herstellung von Schmelzkorund untersucht. Der Lichtbogenofen wird im Normalbetrieb mit einer Leistung zwischen 3,2 bis 3,7 MW betrieben. Der benötigte Energieeintrag ist durch die Schmelzenthalpie des Produktes definiert. Im Anforderungsprofil 1 kann mit einer Ankündigungszeit von einer Stunde eine negative Flexibilität durch Erhöhung der Ofenleistung auf bis zu 4 MW angeboten werden. Positive Flexibilität kann durch Absenken der Ofenleistung oder kurzzeitiges Abschalten angeboten werden, so die Leistung innerhalb des Produktionszyklus von vier Stunden nachgeholt werden kann. Ein Abkühlen und Erstarren der Schmelze ist unbedingt zu vermeiden. Sowohl die Eingangsstoffe als auch die Produkte sind als Feststoffe in Silos problemlos lagerbar und die Vor-/Weiterverarbeitung somit begrenzt nicht die Flexibilitätsoptionen.

Die modellgestützte wirtschaftliche Analyse im Kapitel 7 „Vergleich der wirtschaftlichen Potenziale ausgewählter Prozesse“ fokussiert sich auf die unternehmerischen Entscheidungsmöglichkeiten zur Minimierung der Strombeschaffungskosten bei gegebenen Produktions- und Verkaufsmengen unter Berücksichtigung von verschiedenen regulatorischen Rahmenbedingungen und praktischen Hemmnissen wie Schichtbegrenzungen und begrenzter Vorrausicht.

Im Kapitel 8 „Branchenübergreifende Auswertung“ wird eine integrierte Darstellung der Ergebnisse aus den branchenspezifischen Auswertungen durchgeführt. Die technischen Flexibilitätspotenziale der einzelnen untersuchten Prozesse ist in Tabelle 1 dargestellt.

Eine Übersicht über die Möglichkeiten der untersuchten Prozesse, im Rahmen der definierten Anforderungsprofile aktuell Flexibilität anzubieten, ist in Tabelle 2 dargestellt.

XVIII ZUSAMMENFASSUNG

Tabelle 1: Vergleich der technischen Flexibilitäts-
potenziale (positiv: Lastreduktion, negativ:
Lasterhöhung) der ausgewählten Prozesse

	Elektrolicht- bogenofen	Glasschmelz- wanne mit elektrischer Zusatzheizung	Roh- und Zementmahlung	Chlor-Alkali- Elektrolyse	Rohstoff- schmelzanlage	
Randbedingungen	Stranggussanlage in ausgelastetem Werk	Kontinuierlicher Betrieb über bis zu mehr als 15 Jahre	Mahlwerk und integriertes Werk	Teillastbetrieb, Chlorspeicher, EDC-Speicher	Voll ausgelastete Anlage	
Teillastbetrieb	Nein	EZH: Ja	Nein	Ja	Ja	
Technisches Flexibilitätspotenzial	Durchschnitt¹/ Median²		eine große Mühle flexibel betrieben: Positiv: ca. 3 MW Negativ: ca. 3 MW	Positiv: 13 MW ² Negativ: 1 MW ²	Positiv: 0,3 MW Negativ: 0,2 MW	
	Bereich (Min – Max)		Positiv: 0-11 MW ³ Negativ: 0-8 MW ³	Positiv: 0-77 MW Negativ: 0-4 MW	Positiv: 0-4 MW Negativ: 0-0,5 MW	
	Potenzial für Deutschland (Anzahl Werke/ Anlagen Verfügbarkeit)	Positiv: 766 MW Negativ: – (26 52 %)	Positiv: 25 MW Negativ: 25 MW (≈60 ≤75 %)	je Werk eine große Mühle flexibel betrieben: Positiv: 172 MW Negativ: 172 MW (55 saison- abhängig)	Positiv: 421 MW Negativ: 15 MW (21 95 %)	Positiv: 23 MW Negativ: 3 MW (13 45 %)
	Abrufdauer	Wenige Minuten	Minuten	Bis zu 12 h abhängig von Betriebssituation und Produktvorrat ggf. länger möglich	Teillast: 15 Min. EDC-Speicher: bis zu mehreren Tagen	Positiv: 5-60 Min. Negativ: 15 Min.
	Abrufhäufigkeit	Mehrmals täglich	Je nach Abrufdauer, ggf. mehrmals täglich	Ggf. mehrmals täglich möglich	Mehrmals täglich	Mehrmals täglich
Besonderheiten des Prozesses	Verfügbarkeit von Flexibilität nur bedingt planbar	Änderung der elektrischen Leistung muss durch Eintrag des fossilen Energieträgers substituiert werden	Starke Saisonalität; Mindestbetriebs- zeit von 4 h	Starke Einbindung in Prozessketten, Flexibilität abhängig von der Speicherbarkeit der Zwischen- produkte	Produktion in einem kontinuierlichen Chargenprozess	

¹ Durchschnitt; ² Median; ³ Maximalwert für ein integriertes Werk. Entspricht der Summe aus Roh- und Zementmahlung.

Tabelle 2: Grundlegende Erfüllbarkeit der Anforderungsprofile in Abstimmung mit dem Betriebsleiter bei aktueller hoher Auslastung, bestehenden Lieferverpflichtungen und ohne Investitionsmaßnahmen

Branche	Prozess (Art der Prozesskette)	Anforderungsprofil 1 - Kurzfristige Anpassung der Last - Abrufdauer: 15 min - Vorankündigungszeit: wenige Minuten	Anforderungsprofil 2 - Verschieben der Last über mehrere Stunden - Abrufdauer: 3–12 h - Vorankündigungszeit: 1 Tag	Anforderungsprofil 3 - Reduktion der Last über mehrere Tage - Abrufdauer: 1–5 Tage - Vorankündigungszeit: 2–5 Tage
Stahl	Elektrolichtbogenofen (nur Strangguss)	(✓) _{pos}	✗	✗
	Elektrolichtbogenofen (Strang- und Blockguss)	✗	✗	✗
Glas	Schmelzwanne mit elektrischer Zusatzheizung	(✓) _{pos u. neg}	✗	✗
Zement	Zementmühlen	(✓) _{pos}	(✓) _{pos u. neg}	(✓) _{pos} ^S
	Rohmühle	(✓) _{pos} ^S	(✓) _{pos} ^S	✗
Chemie	Chlor-Alkali-Elektrolyse (ohne speicherbare Zwischenprodukte)	✓ _{pos}	✗	✗
	Chlor-Alkali-Elektrolyse (EDC-Produktion)	✓ _{pos}	✓ _{pos}	(✓) _{pos}
Feuerfest	Rohstoffschmelzanlage	(✓) _{pos u. neg}	✗	✗

✓ Erfüllbar

(✓) Abhängig von den spezifischen Anforderungen der Prozesskette nur zu bestimmten Zeiten erfüllbar

✗ Nicht erfüllbar

S Nur an wenigen Standorten erfüllbar

pos/neg Vorwiegende Art der verfügbaren Leistung, positiv: Lastminderung, negativ: Lasterhöhung. Bei hohen Auslastungen meistens asymmetrische Leistungsverfügbarkeit, da hohe, kurze Lastminderungen durch lange, geringe Lasterhöhungen ausgeglichen werden müssen.

Des Weiteren werden die spezifischen Hemmnisse für das Heben der identifizierten technischen Flexibilitätspotenziale und volkswirtschaftliche Aspekte diskutiert. Darüber hinaus wird ein Ausblick über flexibilitätsrelevante Entwicklungen für die beschriebenen Prozesse gegeben.

Im Kapitel 9 „Regionale Verteilung der untersuchten Prozesse“ wird auf die räumliche Konzentration der Prozesse eingegangen und deren Auswirkung auf den Effekt von verfügbarer Flexibilität zur Netzstabilisierung für verschiedene Szenarien modelliert.

Im Kapitel 10 „Fazit und Ausblick“ werden die Methodik und die wesentlichen branchenspezifischen und -übergreifenden Erkenntnisse zusammengefasst und im Kontext der weiterführenden Arbeiten dargestellt. Branchenübergreifend ergeben sich dabei folgende Erkenntnisse:

1. Die Einhaltung von Lieferverpflichtungen gegenüber den Kunden hat immer Priorität vor dem Anbieten von Flexibilität.
2. Es gibt für die untersuchten Prozesse der Grundstoffindustrie eine gegenläufige Wechselwirkung zwischen energetischer Effizienz und Flexibilität.
3. Änderungen der Prozessbedingungen führen zu Veränderungen der Produktqualität.
4. Die Wechselwirkungen zwischen häufigen, schnellen Laständerungen und deren Auswirkung auf die Anlagen und ihre kritischen Komponenten sind bisher nicht ausreichend untersucht.
5. Die Möglichkeiten zur Flexibilisierung sind sehr stark von den standortspezifischen Prozessketten und den Möglichkeiten zur Produktspeicherung innerhalb der Prozesskette abhängig.
6. Die Potenziale zur Lasterhöhung bei hoher Produktnachfrage sind sehr gering, die Potenziale für eine Lastreduktion sind in der Regel mit Produktionsausfall verbunden.
7. Bei Lastverschiebung muss sichergestellt werden, dass ausgefallene Produktion innerhalb kürzerer Zeit nachgeholt werden kann.
8. Der mögliche Verlust der Berechtigung oder des Umfangs individueller Netzentgelte nach §19 Abs. 2 (StromNEV) stellt eine erhebliche Hürde für das Anbieten von Flexibilität dar.
9. Die Unternehmen der Grundstoffindustrie bestehen auf einem Primat der betrieblichen Erfordernisse gegenüber dem externen Aufruf von Flexibilitätsoptionen.
10. Für langfristig zu amortisierende Investitionen wird eine ausreichende Planungssicherheit benötigt.
11. Technische Limitierungen der Prozesse sind in der Regel nicht entscheidend für das Anbieten von Flexibilität.

Diese Ergebnisse spiegeln trotz der Diversität der betrachteten Prozesse die wesentlichen Herausforderungen der Grundstoffindustrien wider, sich dem zunehmenden Eintrag der fluktuierenden erneuerbaren Stromerzeugung anzupassen. Gleichzeitig ergeben sich durchaus Potenziale und auch Möglichkeiten zu Flexibilitätsoptionen über das heute genutzte Maß hinaus. Inwiefern diese Potenziale und Perspektiven gehoben werden können, hängt wesentlich von der Ausgestaltung der regulatorischen Rahmenbedingungen ab.

INHALTSVERZEICHNIS

Flexibilitätsoptionen in der Grundstoffindustrie

Herausgeber und Förderkennzeichen	I
Liste der Autoren	II
Beteiligte Projektpartner	III
Vorwort	IV
Executive Summary	VI
Zusammenfassung	XIII
Abbildungsverzeichnis	XXVIII
Tabellenverzeichnis	XXXII
Verwendete Abkürzungen	XXXIV
Sprachliche Abkürzungen	XXXIV
Abkürzungen für Gesetze und Regularien	XXXIV
Technische Abkürzungen	XXXIV
Physikalische Einheiten und Größen	XXXV
Präfixe	XXXV
Chemische Verbindungen und Mineralien	XXXVI
1. Methodisches Vorgehen und Voruntersuchungen zu Flexibilitätspotenzialen	1
1.1 Branchenübergreifende Methodik zur Erhebung von Flexibilitätspotenziale	2
1.1.1 Einheitliche Definitionen und branchenübergreifende Methodik	2
1.1.2 Problematik der Hochrechnung von Flexibilitätspotenzialen	15
1.1.3 Erstellung eines Fragebogens zur Erhebung des technischen Flexibilitätspotenzials	17
1.1.4 Steckbriefe zur Aggregation der Ergebnisse	17
1.1.5 Anhang	19
1.2 Methode zur Ermittlung technischer, organisatorischer und regulatorischer Hemmnisse	24
1.2.1 Problemstellung und Ziel der Methode	24
1.2.2 Vorgehen und Datenquellen	24
1.2.3 Ableitung des Analyserahmens	28
1.3 Methodik zur wirtschaftlichen Analyse	31
1.3.1 Interviews	31
1.3.2 Methodik zur Modellierung von Unternehmensentscheidungen unter Berücksichtigung regulatorischer, ökonomischer, technischer und praktischer Rahmenbedingungen	31
1.4 Charakteristische energiewirtschaftliche Situationen für die Bereitstellung von Flexibilität	33
1.5 Literaturverzeichnis	42

2. Flexibilitätspotenziale und -perspektiven des Elektrolichtbogenofens	47
2.1 Bedeutung des Elektrolichtbogenofens in der Stahlindustrie	48
2.2 Methodik der Datenerhebung	50
2.3 Wesentliche Charakteristika der Stahlbranche	51
2.4 Technische Beschreibung des Prozesses	52
2.5 Innerbetriebliche Organisation	58
2.6 Technisches Flexibilitätspotenzial des Elektrolichtbogenofens	60
2.6.1 Technische Flexibilität des Elektrolichtbogenofens	60
2.6.2 Technische Flexibilität der Prozessroute – Strangguss	61
2.6.3 Technische Flexibilität der Prozessroute – Strangguss und Blockguss	62
2.6.4 Prozessroute – Timeshift-Modell	62
2.6.5 Quantitative Bestimmung des theoretischen und technischen Flexibilitätspotentials	63
2.7 Erfüllbarkeit der Anforderungsprofile	66
2.7.1 Anforderungsprofil 1 – Potenziale und Hemmnisse	66
2.7.2 Anforderungsprofil 2 – Potenziale und Hemmnisse	67
2.7.3 Anforderungsprofil 3 – Potenziale und Hemmnisse	68
2.8 Wechselwirkungen zwischen Effizienz und Flexibilität	68
2.9 Flexibilitätsperspektiven des Elektrolichtbogenofens	70
2.10 Literaturverzeichnis	71
3. Flexibilitätspotenziale und -perspektiven in der Behälterglasherstellung	73
3.1 Einleitung	74
3.2 Grundsätzliche Prozessschritte	75
3.3 Glasarten und Produktgruppen, Glasanwendungen	76
3.4 Bedeutung der Behälterglasherstellung in der Glasindustrie	76
3.5 Prozesscharakterisierung	78
3.5.1 Schmelzaggregat	79
3.5.2 Temperatur und Viskosität	80
3.5.3 Schmelzprozess	81
3.5.4 Wannenauslaufzeit – kontinuierlicher Produktionsprozess	81
3.5.5 Energieflussbild einer typischen Glasschmelzwanne zur Behälterglaserzeugung	82
3.6 Methodik der Datenerhebung	82
3.7 Flexibilisierung des Anteils an elektrischer Energie bei der Behälterglasherstellung	83
3.7.1 Identifikation wesentlicher Hemmnisse – Methodik und Datengrundlage	83
3.7.2 Marktumfeld und Kundenbeziehungen	84
3.7.3 Organisatorische Hemmnisse	85
3.7.4 Technisches Flexibilitätspotenzial und Hemmnisse der Behälterglasherstellung	86

3.7.5	Anwendungsfall 1 - Potenziale und Hemmnisse	90
3.7.6	Anwendungsfall 2 und 3 – Potenziale und Hemmnisse	92
3.7.7	Wechselwirkungen zwischen Effizienz und Flexibilität	92
3.7.8	Flexibilitätsperspektiven der Behälterglasherstellung	93
3.8	Literaturverzeichnis	95
4.	Flexibilitätspotenziale und -perspektiven der Roh- und Zementmahlung	97
4.1	Bedeutung der Roh- und Zementmahlung	101
4.1.1	Flexibilitätspotenziale für kurz-, mittel- und langfristige Anforderungen	103
4.2	Technische Beschreibung der Referenzprozesse	104
4.2.1	Rohmahlung	104
4.2.2	Zementmahlung	105
4.3	Methodik der Datenerhebung	107
4.4	VDZ Modell zur Einschätzung der technischen Flexibilitätspotentiale	109
4.4.1	Produktionskapazität	110
4.4.2	Saisonale Nutzung der Produktionskapazität	112
4.4.3	Produktspeicherkapazität in Silos	113
4.5	Technisches Flexibilitätspotenzial der Roh- und Zementmahlung	114
4.5.1	Kurzfristige Flexibilität nach Anforderungsprofil 1	114
4.5.2	Mittelfristigen Flexibilität nach Anforderungsprofil 2	115
4.5.3	Einschätzung der technischen Potentiale zum flexiblen Energieeinsatz für langfristige Lastanpassungen nach Anforderungsprofil 3	119
4.5.4	Einschätzung maximaler technischer Potentiale zum flexiblen Energieeinsatz in der Roh- und Zementmahlung in Deutschland	120
4.5.5	Ergebnisübersicht	121
4.6	Hemmnisse und Einschränkungen des technischen Potentials	124
4.6.1	Technische Hemmnisse zur Flexibilisierung der Rohmühlen	124
4.6.2	Technische Hemmnisse zur Flexibilisierung der Zementmahlung	125
4.6.3	Einfluss der Silokapazität	125
4.6.4	Ökonomische Hemmnisse und Tarfsysteme	126
4.6.5	Personalplanung	128
4.6.6	Marktanforderungen und Saisonalität der Produktion	128
4.7	Wechselwirkungen zwischen Effizienz und Flexibilität	129
4.7.1	Erfahrungen aus einem Betriebsversuch im Zementwerk	130
4.8	Flexibilitätsperspektiven der Roh- und Zementmahlung	131
4.9	Literaturverzeichnis	132

5. Flexibilitätspotenziale und -perspektiven der Chlor-Alkali Elektrolyse	135
5.1 Chlor-Alkali Elektrolyse-Verfahren	136
5.1.1 Membran-Verfahren	137
5.1.2 Diaphragma-Verfahren	138
5.1.3 Amalgam- Verfahren	138
5.2 Chlor-Alkali Betreiber in Deutschland	139
5.2.1 Wertschöpfungsketten für die Produkte der Chlor-Alkali Elektrolyse	141
5.3 Rolle und Einbindung der Chlor-Alkali Elektrolyse in Chemiestandorten	142
5.3.1 Verknüpfung zu Folgeprozessen und Chlorspeicher	142
5.3.2 Folgeprozess des Membran-Verfahrens: PVC-Produktion	143
5.3.3 Folgeprozess des Diaphragma-Verfahrens: Epichlorhydrin Herstellung	144
5.4 Absehbare Entwicklungen für die Chlor-Alkali Elektrolyse	144
5.4.1 Zero-Gap Technologie	145
5.4.2 Sauerstoffverzehrelektrode (SVK)	145
5.4.3 Schaltbare Sauerstoffverzehrelektrode	145
5.5 Betriebswirtschaftliche Hemmnisse und Prioritäten	146
5.5.1 Standorteinbindung	146
5.5.2 Versorgung mit elektrischer Energie	147
5.5.3 Nutzung von KWK-Eigenerzeugung	148
5.5.4 Technische Limitierungen für die Bereitstellung von Flexibilität	149
5.5.5 Auftrags- und Schichtplanung	149
5.5.6 Wartung und Reparaturen	150
5.5.7 Bisherige Erfahrungen mit Flexibilität	150
5.6 Wissenschaftlich-technische Rahmenbedingungen für eine Flexibilisierung	151
5.6.1 Abhängigkeit des spezifischen Energiebedarfs von der Stromstärke	151
5.6.2 Randbedingungen für Lastverschiebungen	152
5.6.3 Flexibilität als Funktion der Anlagenauslastung	153
5.6.4 Wechselwirkung Energieeffizienz und Flexibilität	154
5.6.5 Effizienz der Chlor-Alkali Elektrolyse als Stromspeicher	154
5.6.6 Perfekte Voraussicht vs. Produktionsplanung	155
5.7 Abschätzung des Flexibilitätspotenzials und der -perspektiven für die Chlor-Alkali Elektrolyse in Deutschland	155
5.7.1 Modellansatz	156
5.8 Flexibilitätsoptionen für die Chlor-Alkali Elektrolyse	157
5.8.1 Flexibilität im Teillastbetrieb	158
5.8.2 Flexible Nutzung des Chlor-Speichers	159
5.8.3 Nutzung von EDC-Speichern	160
5.8.4 Kapazitätserweiterung	161
5.8.5 Virtuelles Kraftwerk	163
5.8.6 Schaltbare Sauerstoffverzehrkatode	164
5.8.7 Ergebnisse	166

5.9	Darstellung des Effekts der Flexibilitätsoptionen und -perspektiven der Chlor-Alkali Elektrolyse in Deutschland	170
5.10	Zusammenfassung	172
5.11	Ausblick	173
5.12	Anhang	174
5.12.1	Grundlagen der Berechnungen	174
5.12.2	Verwendete Parameter	175
5.12.3	Referenzanlage Chlor-Alkali Elektrolyse	176
5.12.4	Danksagung	177
5.13	Literaturverzeichnis	178
6.	Flexibilitätspotenziale und -perspektiven in einer Rohstoffschmelzanlage für Feuerfestmaterialien	181
6.1	Bedeutung der Rohstoffschmelzanlage in der Feuerfestindustrie	182
6.2	Rohstoffschmelzprozess – Methodik der Datenerhebung	184
6.3	Technische Beschreibung des Schmelzprozesses und dessen Einbettung in den Gesamtprozess	185
6.4	Identifikation wesentlicher Hemmnisse – Methodik und Datengrundlage	187
6.5	Technisches Flexibilitätspotenzial und Hemmnisse der Rohstoffschmelzanlage	188
6.5.1	Technische Limitationen im Hinblick auf Lastflexibilisierung	188
6.5.2	Einbettung in die Prozesskette/ Vernetzte Produktionsprozesse	188
6.6	Anforderungsprofil 1 – Potenziale und Hemmnisse	189
6.6.1	Kurzfristige Lastverschiebung	189
6.6.2	Mittelfristige Lastverschiebung	190
6.6.3	Vollständiger Lastabwurf	190
6.7	Anforderungsprofile 2 und 3 – Potenziale und Hemmnisse	191
6.8	Marktumfeld und Kundenbeziehungen	192
6.8.1	Konjunktur und Auslastung der Branche	192
6.8.2	Zukaufmoglichkeiten und Lieferfristen	192
6.9	Innerbetriebliche Organisation	193
6.9.1	Auftrags- und Schichtplanung	193
6.9.2	Geplante Revisionen	193
6.9.3	Regulatorische Hemmnisse	193
6.10	Wechselwirkungen zwischen Effizienz und Flexibilität	194
6.11	Flexibilitätperspektiven der Rohstoffschmelzanlage	195
6.12	Literaturverzeichnis	196
7.	Vergleich der wirtschaftlichen Potenziale ausgewählter Prozesse	199
7.1	Wirtschaftlicher Referenzprozess für hohe Auslastungsgrade mit Speichern (Chlor-Alkali)	200
7.1.1	Modellbeschreibung	200
7.1.2	Analysen	203
7.1.3	Einfluss von Auslastungsgrad auf Flexibilitätsbereitstellung	203

7.1.4	Die Abwägung zwischen Reserveteilnahme und flexibler Beschaffung am Markt	205
7.2	Wirtschaftlicher Referenzprozess für saisonale Auslastungsgrade mit Speichern (Zement)	206
7.2.1	Modellbeschreibung	207
7.2.2	Analysen	210
7.3	Literaturverzeichnis	213
8.	Branchenübergreifende Auswertung	215
8.1	Vergleich der technischen Flexibilitätspotenziale der ausgewählten Prozesse	217
8.2	Erfüllbarkeit der Anforderungsprofile	221
8.3	Hemmnisse zur Hebung der technischen Flexibilitätspotenziale	222
8.4	Wirtschaftlichkeit von Flexibilität	223
8.5	Vergleich der technischen Flexibilitätsperspektiven	224
8.6	Literaturverzeichnis	229
9.	Regionale Verteilung der untersuchten Prozesse	231
9.1	Literaturverzeichnis	235
10.	Fazit und Ausblick	237
10.1	Zielsetzung der Arbeiten	238
10.2	Methodische Vorgehensweise	238
10.3	Branchenübergreifende Ergebnisse	239
10.4	Branchenspezifische Ergebnisse	240
10.4.1	Eisen- und Stahlherstellung (Elektrolichtbogenofen)	240
10.4.2	Glasherstellung (Elektrische Zusatzheizung in der Behälterglasproduktion)	241
10.4.3	Zementherstellung (Roh- und Zementmahlung)	242
10.4.4	Herstellung chemischer Grundstoffe (Chlor-Alkali Elektrolyse)	243
10.4.5	Herstellung von Feuerfest-Materialien (Rohstoffschmelzanlage)	243
10.5	Auswertung und Ergebnisse	244
10.6	Was heißt das aktuell für die Grundstoffindustrie	245
10.7	Hemmnisse für die Umsetzung von Flexibilität	246
10.7.1	Technisch	246
10.7.2	Regulatorisch	246
10.7.3	Wirtschaftlich	247
10.7.4	Kulturell	248
10.8	Zukünftige Perspektiven	249
Impressum		250

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

1	Energieeinsatz in der Grundstoffindustrie 2015 (AGEB, FhG ISI) [1]	IV
1.1	Flexibilitätpotenziale der analysierten Studien – dargestellt als Boxplot	3
1.2	Abgrenzung der verschiedenen Potenzialbegriffe	10
1.3	Zuordnung der zu erhebenden Parameter je Potenzialbegriff	12
1.4	Vorlage für einen Branchensteckbrief	17
1.5	Vorlage für einen Referenzprozess-Steckbrief	18
1.6	Zeitlich-organisatorische Hemmnis-Ebenen	28
1.7	Methodisches Vorgehen der wirtschaftlichen Entscheidungsmodellerstellung und Analyse	32
1.8	Relevanz der Anforderungsprofile in den Stützjahren der übergeordneten SynErgie-Analyse	34
1.9	Mittlerer jährlicher Abrufgrad Minutenreserveleistung (eigene Darstellung, Daten von [34])	35
1.10	Häufigkeit von Day-Ahead Preisen größer als der Gebotspreis	36
1.11	Ereignisse zusammenhängender Stunden positiver Residuallast für drei illustrative Szenarien mit sehr hohen Anteilen erneuerbarer Energien.	37
1.12	Anzahl monatlicher Flauten unterschiedlicher Länge aggregiert über 10 Jahre (2003 bis 2012), definiert entsprechend der Unterschreitung der mittleren Leistung der Einspeisung aus Wind und Sonne während einer Dunkelflaute von a) 20 % (links), b) 30 % (Mitte) und c) 40 % (rechts) unter die mittlere 10-Jahresleistung	38
1.13	Steckbrief zu Profil 1: „Kurzfristige Anpassung der Last“	39
1.14	Auswertung zu Profil 1: Abruf von Minutenreserve am 15.04.2016	39
1.15	Steckbrief zu Profil 2: „Anpassung der Last über mehrere Stunden“	40
1.16	Auswertung zu Profil 2: Negative Strompreise während der Mittagsstunden aufgrund hoher EE-Einspeisung und vergleichsweise geringer Last	40
1.17	Steckbrief zu Profil 3: „Reduktion der Last über mehrere Tage“	41
1.18	Auswertung zu Profil 3: Hohe Strompreise im Januar 2017 aufgrund geringer EE-Erzeugung und hohem Verbrauch	41
1.19	Auswertung zu Profil 3: Die „Dunkelflaute“ als seltenes Phänomen	42
2.1	Erzeugungsrouten zur Stahlherstellung in Deutschland (2015) [1]	48
2.2	Standorte der Stahlerzeugung in Deutschland [1]	49

2.3	Stahlerzeugung der größten Stahlwerke in 2015.in Deutschland [1]	49
2.4	Branchensteckbrief Stahl	50
2.5	Prozessroute der Stahlherstellung im Elektrostahlwerk	52
2.6	Aufbau des Drehstrom- und Gleichstrom-Elektrolichtbogenofens [7]	53
2.7	Elektrische Leistung von Elektrolichtbogenöfen in Deutschland mit Abstichgewicht ≥ 35 t (AC=Wechselstrom, DC=Gleichstrom) [6]	53
2.8	Prinzipieller Ablauf der Stahlherstellung im Elektrolichtbogenofen [7]	54
2.9	Zusatzbrenner und Injektoren am Elektrolichtbogenofen (RCB-Refining Combined Burner, C-Kohlestaubinjektion, PC-Nachverbrennungsinjektor, B-Brenner) [8]	54
2.10	Verlauf des Schmelzvorgangs und der jeweils in den Betriebsphasen vorliegenden Beheizung mittels Lichtbogen und Zusatzbrennern [8]	55
2.11	Lastgang der elektrischen Leistung eines Elektrolichtbogenofens [9]	55
2.12	Leistungsstufen im Chargenverlauf des Elektrolichtbogenofens [8]	56
2.13	Typische Massenbilanz des Elektrolichtbogenofens [7]	57
2.14	Typische Energiebilanz eines Elektrolichtbogenofens [7]	57
2.15	Schmelzleistung des EAF beim Timeshift-Konzept [11]	62
2.16	Zulässigkeit der Flexibilisierungsmaßnahme über die flexibilisierbare Vorlaufzeit	66
3.1	Branchensteckbrief Glasindustrie	74
3.2	Kunden des Grundstoffindustriezweiges der Glasindustrie [1]	74
3.3	Jahresproduktionsmenge der Glasindustrie in D an verkaufsfähigem Glas in den letzten 20 Jahren in kt [1]	75
3.4	Jahresproduktion der Glasbranchen an verkaufsfähigem Glas in D im Jahr 2016.[2]	75
3.5	Behälterglashersteller in Deutschland [4]	77
3.6	Regenerativ beheizte U-Flammenwanne zur Schmelze von Glas [5]	78
3.7	Viskositäts-Temperatur-Verlauf einer Glasschmelze mit Benennung typischer Viskositätsbereiche oder -punkte zur Herstellung von Glas, wobei die Temperaturabhän- gigkeit der Viskosität grob das Verhalten sogenannter Massengläser (Kalk-Natron-Silicatglas) wiedergibt. [6]	80
3.8	Viskositäts-Temperatur-Verhalten bei unterschiedlicher Glaschemie. (1: Kieselglas; 2: Erdalkali-Alumino-Silicat- glas; 3: Borosilicatglas A; 4: Borosilicatglas B; 5: Kalk- Natron-Silicatglas; 6: Bleiglas; 7: Lotglas) [7]	80
3.9	Sankey-Diagramm des Energieflusses einer typischen Behälterglaswanne	82
3.10	Strömungsprofil in der Schmelzwanne mit Schmelzphasen	87

4.1	VDZ Schema zum Verfahrensablauf im Zementwerk [1]	98
4.2	Zementwerke in Deutschland 2014 [2]	99
4.3	VDZ Branchensteckbrief zur Zementindustrie	101
4.4	Spezifischer elektrischer Energiebedarf (Deutschland, 2014): 110 kWh/t Zement [1], [10]	102
4.5	Entwicklung des spezifischen Energiebedarfs der Zementherstellung [1], [10]	102
4.6	Zementversand Inland (Monatsdaten) [14]	106
4.7	Schematische Darstellung Modell 1: Mahlwerk mit Zementmahlprozess	110
4.8	Schematische Darstellung Modell 2: Integriertes Zementwerk mit Rohmahlprozess und Zementmahlprozess	111
4.9	Geschätzter Verlauf des Mühlenbetriebs für Modell 1. und 2. und des Zementversands von Zementwerken in Deutschland	112
5.1	Schematische Darstellung der verschiedenen Verfahren der Chlor-Alkali Elektrolyse [1]	136
5.2	Branchensteckbrief der Chemische Industrie für die Chlor-Alkali Elektrolyse	137
5.3	Benchmarking des elektrischen Energiebedarfs der Chlor-Alkali Elektrolyse ohne Nebenaggregate und Hilfsenergie in Deutschland	141
5.4	Übersicht über die Verknüpfungen und Produkte, bei denen Chlor in der Umsetzung beteiligt ist [10]	141
5.5	Schematische Darstellung der VCM-Produktion auf Basis des Vinnolit-Prozesses [11]	144
5.6	Energieversorgung durch interne KWK Strom- und Wärmeerzeugung	148
5.7	Beispielhafter Verlauf des spezifischen elektrischen Energiebedarfs als Funktion der Stromdichte für das Membran-Verfahren [4]	151
5.8	Flexibilität bei gegebener durchschnittlicher Produktion	152
5.9	Zusammenhang von Auslastung und Flexibilität	153
5.10	Produktionsausgleich für eine initiierte Laständerung	158
5.11	Interaktion Chlorproduktion, -speicher und -verbraucher [17]	159
5.12	Effekt eines Kapazitätsausbaus auf die maximale Flexibilität und die durchschnittliche Auslastung	162
5.13	Standorte und technisches Teillastpotenzial für eine Auslastung von 95 % der Chlor-Alkali Elektrolyse in Deutschland hinterlegt mit den aktuellen Stromnetz- strukturen [20]	171
6.1	Anteile der Nutzer-Industrien an feuerfesten Erzeugnissen in %	182
6.2	Branchensteckbrief für die Feuerfest-Industrie	184

6.3	Steckbrief des Schmelzprozesses: Rohstoffschmelzanlage zur Herstellung von Schmelzkorund (4 MW Lichtbogenofen)	185
6.4	Prozesskette der Schmelzkorund-Herstellung	186
7.1	Spezifische Strombeschaffungskosten in Abhängigkeit des Auslastungsgrads	203
7.2	Preisdauerlinie mit Produktionsanpassung in Abhängigkeit des Auslastungsgrades	203
7.3	Flexibilitätsabruflänge in Abhängigkeit des Auslastungsgrades	204
7.4	Abwägung zwischen Reserveteilnahme und Flexibilitätsbereitstellung am DA-Markt	206
7.5	Stilisierte saisonale Zementnachfrage	208
7.6	Preisdauerlinien mit und ohne Nachtschichtbegrenzung unter verschiedenen Speicherszenarien	211
7.7	Kontinuierliche Stillstände in der Zementmahlung	211
7.8	Durchschnittliche tägliche Produktionszeitpunkte	212
7.9	Einfluss des Planungshorizontes auf Einsparungen in der Strombeschaffung, bei ausschließlich kurz- fristiger Optimierung innerhalb des Planungs- horizontes und Nichtberücksichtigung von mittel- fristigen Opportunitätskosten des Speicherinhaltes	213
9.1	Standorte der untersuchten Prozesse in Deutschland	232
9.2	Standorte der untersuchten Prozesse in Deutschland und Jahressumme der Residuallast auf Basis des konservativen Szenarios aus MONA 2030 [1]	233
9.3	Standorte der untersuchten Prozesse in Deutschland und maximale Residuallast auf Basis des konservativen Szenarios aus MONA 2030 [1]	234
9.4	Standorte der untersuchten Prozesse in Deutschland und minimale Residuallast auf Basis des konservativen Szenarios aus MONA 2030 [1]	234

TABELLENVERZEICHNIS

Table 1	Comparison of technical flexibility potentials (positive: Load reduction, negative: load increase) of the investigated processes.	X
Table 2	Process compliance towards the defined flexibility profiles under consideration of the currently high degrees of capacity utilization, delivery commitments towards the customers and without additional investments.	XI
Tabelle 1	Vergleich der technischen Flexibilitätspotenziale (positiv: Lastreduktion, negativ: Lasterhöhung) der ausgewählten Prozesse	XVIII
Tabelle 2	Grundlegende Erfüllbarkeit der Anforderungsprofile bei aktueller hoher Auslastung, bestehenden Lieferverpflichtungen und ohne Investitionsmaßnahmen	XIX
Tabelle 1.1	Übersicht über identifizierte Problemfelder und deren Fragestellungen	4
Tabelle 1.2	Ausgewählte Prozesse der untersuchten Branchen	14
Tabelle 1.3	Übersicht über 28 analysierte Studien	19
Tabelle 1.4	Vergleich der analysierten Studien anhand der identifizierten Problemfelder	20
Tabelle 1.5	In der Literatur benannte Hemmnisse	26
Tabelle 2.1	Beispiel der jährlichen Betriebszeit eines Elektrolichtbogenofens	58
Tabelle 3.1	Typische Glasarten bzw. Glaschemie für unterschiedliche Glasprodukte	76
Tabelle 4.1	Daten der Zementindustrie in Deutschland für die Bestimmung der Referenzprozesse	108
Tabelle 4.2	Beschreibung der Mühlen in den VDZ Modellen 1 und 2	111
Tabelle 4.3	Geschätzte Mühlennutzung in Deutschland, 2014	113
Tabelle 4.4	Geschätzte Silogrößen und -nutzung	113
Tabelle 4.5	Einschätzung der technischen Potentiale zum flexiblen Energieeinsatz für kurzfristige Lastminderung nach Anforderungsprofil 1	114
Tabelle 4.6	Einschätzung der technischen Potentiale zum flexiblen Energieeinsatz für kurzfristige Lasterhöhung nach Anforderungsprofil 1	115
Tabelle 4.7	Einschätzung der technischen Potentiale zum flexiblen Energieeinsatz für mittelfristige Lastminderung nach Anforderungsprofil 2	117
Tabelle 4.8	Einschätzung der technischen Potentiale zum flexiblen Energieeinsatz für mittelfristige Lasterhöhung nach Anforderungsprofil 2	118

Tabelle 4.9	Einschätzung maximaler technischer Potentiale zum flexiblen Energieeinsatz in der Roh- und Zementmahlung in Deutschland. Hochrechnung als Summe für alle Werke entsprechend Modell 1 für Mahlwerke und Modell 2 für integrierte Zementwerke mit Klinkerproduktion.	121
Tabelle 4.10	Einschätzung technischer Potentiale zum flexiblen Energieeinsatz in der Roh- und Zementmahlung in Deutschland. Hochrechnung als Summe für Zementwerke in Deutschland entsprechend Modell 1 für Mahlwerke und Modell 2 für integrierte Zementwerke mit Klinkerproduktion.	122
Tabelle 5.1	Übersicht der Chlor Elektrolysen in Deutschland. Grün eingefärbt sind die Standorte, die Chlor für die PVC Produktion produzieren [8]	140
Tabelle 5.2	Freie Leistung für den Speicher in Abhängigkeit der Auslastung	160
Tabelle 5.3	Übersicht der Flexibilitätspotenziale und -perspektiven (grau hinterlegt) der Chlor-Alkali Elektrolyse in Deutschland	168
Tabelle 5.4	Abgeschätzte Kosten für die Flexibilitätspotenziale und -perspektiven (grau hinterlegt) in den verschiedenen Anforderungsprofilen. In Klammern die Kostenabschätzung für die Referenzanlage	168
Tabelle 5.5	Übersicht über die verwendeten Parameter	175
Tabelle 5.6	Parameter der Referenzanlage	176
Tabelle 7.1	Beschreibung der Variablen	201
Tabelle 7.2	Beschreibung der Parameter	201
Tabelle 7.3	Beschreibung der Zielfunktion und Nebenbedingungen	202
Tabelle 7.4	Beschreibung der Modellvariablen	208
Tabelle 7.5	Beschreibung der Modellparameter	209
Tabelle 7.6	Mathematische Ausformulierung der Zielfunktion und Nebenbedingungen und deren Beschreibung	209
Tabelle 8.1	Vergleich der technischen Flexibilitätspotenziale (positiv: Lastreduktion, negativ: Lasterhöhung) der ausgewählten Prozesse	220
Tabelle 8.2	Grundlegende Erfüllbarkeit der Anforderungsprofile bei aktueller hoher Auslastung, bestehenden Lieferverpflichtungen und ohne Investitionsmaßnahmen	221
Tabelle 8.3	Hemmnisse zur Hebung grundlegend verfügbarer technischer Flexibilitätspotenziale	222
Tabelle 8.4	Für die Stromlastflexibilität relevante Innovationen der ausgewählten Prozesse	226

VERWENDETE ABKÜRZUNGEN

SPRACHLICHE ABKÜRZUNGEN

#	Anzahl
bzw.	beziehungsweise
ca.	circa
d.h.	das heißt
etc.	et cetera (Latein), und so weiter
Ggf., Ggfs.	gegebenenfalls
Ggü.	Gegenüber
i. d. R.	in der Regel
i.e.	id est (Latein), im Englischen that is, das heißt
n	Anzahl
o.ä.	oder ähnliche
rd.	rund
s.	siehe
s. a.	siehe auch
s. h.	siehe hierzu
sog.	sogenannte
s. u.	siehe unten
u.a.	unter anderem
u.a.m.	und anderes mehr
u. U.	unter Umständen
vgl.	vergleiche
z. B.	zum Beispiel
z. T.	zum Teil
z. Zt.	zur Zeit

ABKÜRZUNGEN FÜR GESETZE UND REGULARIEN

AbLaV	Verordnung über Vereinbarungen zu abschaltbaren Lasten
BImSchG	Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge
EEG	Gesetz für den Ausbau Erneuerbarer Energien
StromNEV	Verordnung über die Entgelte für den Zugang zu Elektrizitätsversorgungsnetzen
TA-Luft	Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft

TECHNISCHE ABKÜRZUNGEN

AC	alternating current, Wechselstrom
BAT	best available technology, beste verfügbare Technologie
CAE	Chlor-Alkali Elektrolyse
DA	Day-ahead
DC	direct current, Gleichstrom
DRI/HBI	Direct reduction iron/hot bricketed iron
DSM	Demand Side Management, Lastmanagement
EAF	Electric Arc Furnace, Lichtbogenofen
ECU	Electrochemical Unit, Elektrochemische Einheit
EE	Erneuerbare Energien
EU	Europäische Union

EZH	Elektrische Zusatzheizung
€	Euro
€ct	Cent (Euro)
GWI	Gas- und Wärme-Institut Essen e.V.
HT	Hochtarif
IHK	Industrie- und Handelskammer
IS	Individual Section
KWK	Kraft-Wärme Kopplung
Mrd.	Milliarden
MRL	Minutenregelleistung
NT	Niedertarif
PV	Fotovoltaik
Std.	Stunden
SVK	Sauerstoffverzehr Kathode
VDEh	Verein Deutscher Eisenhüttenleute
VES	Vollelektrische Schmelzwanne
VPSA	Vapor Pressure Swing Adsorption

PHYSIKALISCHE EINHEITEN UND GRÖSSEN

a	Jahr, Zeiteinheit
A	Ampere, Einheit der elektrischen Stromstärke
°C	Grad Celsius, Einheit der Temperatur
d	Tag
g	Gramm, Masseinheit
Gew.-%	Gewichtsprozent, Konzentrationseinheit
h	Stunde, Zeiteinheit
η	Viskosität
J	Joule, Energieeinheit
K	Kelvin, Temperatureinheit
M	Meter, Längeneinheit
m ²	Quadratmeter, Flächeneinheit
min	Minute, Zeiteinheit
Pa	Pascal, Druckeinheit
t	metrische Tonne, Gewichtseinheit, entspricht 1000 kg
V	Volt, Einheit der elektrischen Spannung
Vol.-%	Volumenprozent, Konzentrationseinheit
W	Watt, Einheit der Leistung
W _{el}	Watt, elektrisch

PRÄFIXE

μ	Mikro (10 ⁻⁶)
m	Milli (10 ⁻³)
c	Zenti (10 ⁻²)
d	Dezi (10 ⁻¹)
k	Kilo (10 ³)
M	Mega (10 ⁶)
G	Giga (10 ⁹)
T	Tera (10 ¹²)
P	Peta (10 ¹⁵)

CHEMISCHE VERBINDUNGEN UND MINERALIEN

Al_2O_3	hier Edelkorund oder Normalkorund
$\text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13}$	hier Schmelzmullit
Cl^-	Chlorid-Ionen
Cl_2	Chlor
CO_2	Kohlendioxid
e^-	Elektron
EDC	Ethylendichlorid ($\text{ClH}_2\text{CCH}_2\text{Cl}$)
$\text{H}_2\text{C}=\text{CH}_2$	Ethylen
H_2	Wasserstoff
HCl	Wasserstoffchlorid, Salzsäure
H_2O	Wasser
Hg	Quecksilber
MgAl_2O_4	hier Schmelzspinell
MgCr_2O_4	hier Schmelzpikrochromit
MgO	hier Schmelzmagnesia
n	generischer stöchiometrischer Faktor
Na^+	Natrium-Ionen
NaCl	Natriumchlorid (Kochsalz)
NaHg	Natrium-Quecksilber Amalgam
NaOH	Natronlauge
O_2	Sauerstoff
OH^-	Hydroxonium-Ionen
SiO_2	hier Quarzglas
SO_3	Schwefeltrioxid
PVC	Polyvinylchlorid
VCM	Vinylchlorid Monomer ($\text{ClHC}=\text{CH}_2$)
$\text{ZrSiO}_4\text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13}$	hier Schmelzzirkonmullit
$\text{ZrSiO}_4\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$	hier Schmelzzirkonkorund



KAPITEL 1

METHODISCHES VORGEHEN UND VORUNTERSUCHUNGEN ZU FLEXIBILITÄTSPOTENZIALEN

Verantwortliche Autoren:

ABSCHNITT 1.1

Christa Dufter, Anna Gruber, Andrej Guminski, Serafin von Roon,
Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH, München

Clara Orthofer,
Technische Universität München,
Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik

ABSCHNITT 1.2

Karin Arnold, Georg Holtz,
Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH, Wuppertal

Ralph-Uwe Dietrich, Stefan Estelmann,
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Stuttgart

ABSCHNITT 1.3

Jörn Richstein, Karsten Neuhoff,
Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung e.V., Berlin

ABSCHNITT 1.4

Jörn Richstein, Karsten Neuhoff,
Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung e.V., Berlin

Christa Dufter, Anna Gruber, Andrej Guminski, Serafin von Roon,
Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH, München

Karin Arnold, Tomke Janßen, Georg Holtz,
Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH, Wuppertal

In diesem Kapitel wird das methodische Vorgehen der wissenschaftlichen Institutionen beschrieben. Eine Metastudienanalyse in Kapitel 1.1 zeigt zunächst den wissenschaftlichen Kenntnisstand auf, und analysiert Stärken und Schwächen der insgesamt 28 betrachteten Studien. Darauf aufbauend wird ein zielführender methodischer Ansatz zur Ermittlung von Flexibilitätspotenzialen und -perspektiven entwickelt. Darüber hinaus wird auf die Problematik einer Hochrechnung der erhobenen Flexibilitätspotenziale in der Grundstoffindustrie eingegangen.

In Kapitel 1.2 wird ergänzend dazu eine Methodik entwickelt, anhand derer technische, organisatorische und regulatorische Hemmnisse identifiziert werden können, die der Hebung der Flexibilitätspotenziale entgegenstehen. Ausgehend von grundlegenden Vorbedingungen für die Bereitstellung von Flexibilität bezieht diese Hemmnisanalyse drei zeitlich-organisatorische Ebenen (Markumfeld, innerbetriebliche Organisation, technische Anlage) und deren regulatorische Rahmenbedingungen mit ein.

Der Ansatz zur Hemmnisanalyse wird in Kapitel 1.3 durch eine Methode zur wirtschaftlichen Analyse komplementiert, durch welche ökonomische Potenziale für ausgewählte Prozesse ausgewiesen werden. In diesem Zusammenhang werden numerische Entscheidungsmodelle erstellt, um beispielsweise den Einfluss der Auslastung auf die Flexibilitätsbereitstellung und die Strombeschaffungskosten zu ermitteln.

In Abschnitt 1.4 dieses Methodik-Kapitels wird das Energiesystem und dessen Bedarf an Flexibilitätsdienstleistungen genauer beschrieben. Da der Strommarkt in stetigem Wandel und eine detaillierte Prognose des zukünftigen Flexibilitätsbedarfs sowie des Designs zugehöriger Marktinstrumente nicht möglich ist, wird auf grundlegende strukturelle Eigenschaften des Stromsystems zurückgegriffen, um den Flexibilitätsbedarf darzustellen. Es lassen sich drei Nachfragetypen charakterisieren, welche sich in Abrufdauer und Vorankündigungszeit deutlich unterscheiden, und im Folgenden als „Anforderungsprofile“ bezeichnet werden. Die Anforderungsprofile werden detailliert beschrieben und mit realen Beispielen hinterlegt. Sie bieten einen Orientierungsrahmen für die gesamte Analyse.

1.1 BRANCHENÜBERGREIFENDE METHODIK ZUR ERHEBUNG VON FLEXIBILITÄTSPOTENZIALE

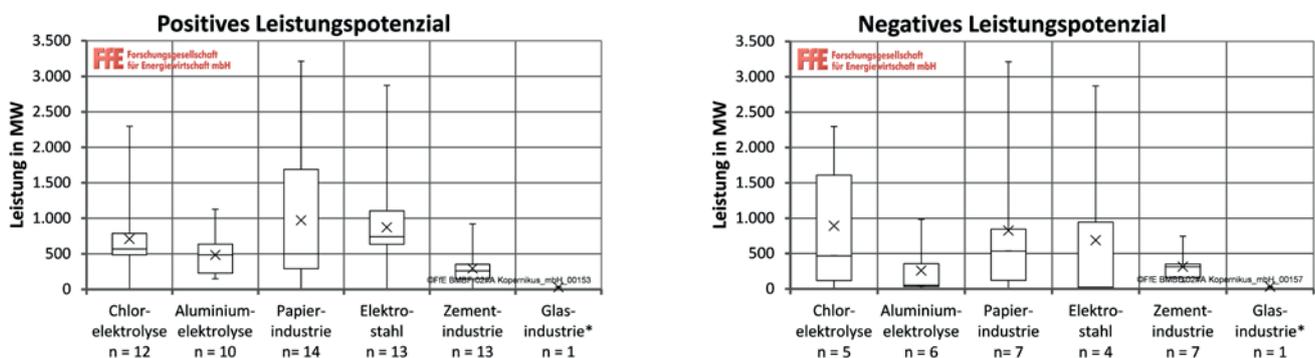
1.1.1 EINHEITLICHE DEFINITIONEN UND BRANCHENÜBERGREIFENDE METHODIK

Die folgenden Kapitel basieren im Wesentlichen auf [1].

Es existiert bereits eine Vielzahl an Studien, die entsprechende Potenziale verschiedener Branchen untersuchen. Allerdings werden hier teilweise deutliche Streuungen bei den ausgewiesenen Potenzialen ersichtlich. Gründe hierfür sind die Anwendung unterschiedlicher Methoden sowie

ein fehlendes übereinstimmendes Verständnis zentraler Potenzialbegriffe. Aufbauend auf einer Metastudienanalyse werden daher einheitliche Definitionen relevanter Begrifflichkeiten sowie eine transparente Methode zur Potenzialerhebung ausgearbeitet.

Zu Beginn werden wesentliche Kriterien festgelegt, die es bei der Entwicklung einer Methode zur Erhebung von Flexibilitätspotenzialen zu beachten gilt. Im Rahmen der Metastudienanalyse werden die verwendeten Methoden von 28 Studien analysiert (siehe Tabelle 1.3). In einem ersten Schritt werden die ausgewiesenen Flexibilitätspotenziale der verschiedenen Branchen bzw. Prozesse verglichen. Die Darstellung als Boxplot in Abbildung 1.1 zeigt die deutliche Streuung der angegebenen Potenziale. Gründe hierfür sind unterschiedliche Annahmen und methodische Herangehensweisen sowie ein fehlendes einheitliches Verständnis relevanter Begrifflichkeiten.



* Potenzial der Glasindustrie bezieht sich nur auf Potenziale für Behälterglas

Daher werden im zweiten Schritt acht relevante Problemfelder identifiziert, anhand derer die Methoden zur Potenzialerhebung im Detail verglichen werden. Der Fokus liegt hierbei auf den stromintensiven Prozessen. Einige Studien erheben zusätzlich Potenziale für Querschnittstechnologien, die angewendeten Methoden werden jedoch nicht näher betrachtet. Um die weitere eingehende Analyse zu ermöglichen, wird der Vergleich auf 14 Studien beschränkt. Hieraus ergeben sich teilweise deutliche Unterschiede zwischen den methodischen Ansätzen der einzelnen Studien. Das Ziel der dieser Veröffentlichung zugrunde liegenden Studie ist daher die Entwicklung einer transparenten und einheitlichen Methodik zur Erhebung von Lastflexibilisierungspotenzialen.

Abbildung 1.1: Flexibilitätspotenziale der analysierten Studien dargestellt als Boxplot ^{1,2}

¹ n entspricht der Anzahl an berücksichtigten Studien je Branche / Prozess.

² eigene Darstellung auf Basis von [2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15]

1.1.1.1 KRITERIEN FÜR DIE METHODIK ZUR POTENZIALERHEBUNG

Bei der Entwicklung der Methodik werden insbesondere folgende drei Kriterien beachtet:

- Vorrangiges Ziel ist die branchenübergreifende Anwendbarkeit. Der Fokus der Metastudienanalyse liegt zwar auf Studien zur Erhebung von Flexibilitätspotenzialen in der Grundstoffindustrie, die entwickelte Methodik ist jedoch auch für andere Branchen sowie für Querschnittstechnologien anwendbar.

- Ein hohes Maß an Transparenz wird durch die eindeutige Definition und Abgrenzung relevanter Begrifflichkeiten sowie die detaillierte Beschreibung der Vorgehensweise garantiert.
- In allen Schritten der Methodenentwicklung wird auf die Ausrichtung der Ergebnisse auf die Zielgruppe geachtet. Hier stehen besonders die Politik sowie Entwickler von Simulationsmodellen im Vordergrund. Aber auch einzelne Betriebe der analysierten Branchen, welche ihre Flexibilität vermarkten wollen, sollen bei der Bestimmung ihrer Potenziale unterstützt werden.

1.1.1.2 METASTUDIENANALYSE

Grundlage für die Metastudienanalyse bildet die Identifikation relevanter Aspekte, anhand derer die Methoden zur Potenzialerhebung verglichen werden. Die Auswahl dieser Aspekte basiert zum einen auf ihrer Relevanz für die Höhe der ausgewiesenen Potenziale. Zum anderen ergibt sie sich aus der Identifikation von Unterschieden und Widersprüchen zwischen den Methoden der untersuchten Studien. Diese Unterschiede umfassen ferner Unsicherheiten aufgrund von fehlender oder unzureichender Beschreibung der verwendeten Methode bzw. einzelner Teilschritte derselben. Letztendlich ergeben sich die folgenden acht Aspekte:

Tabelle 1.1: Übersicht über identifizierte Problemfelder und deren Fragestellungen

Problemfelder		Entscheidende Fragestellungen
Potenzialbegriffe		Welche Potenzialbegriffe werden verwendet?
Erhobene Parameter		Welche Parameter werden für die Bestimmung der verschiedenen Potenziale erhoben?
Art der Laständerung		Wird zwischen Lastreduktion und -erhöhung unterschieden? Wird die Option „Produktionsausfall“ mit berücksichtigt oder wird die uneingeschränkte Wertschöpfung als Randbedingung gesetzt?
Betrachtungszeitraum		Werden Potenziale auf Basis der heute installierten Anlagen erhoben oder werden zukünftige Entwicklungen berücksichtigt?
Art und Bilanzraum der Datenerhebung		Werden Potenziale für gesamte Industrien oder separat für einzelne Prozesse erhoben?
Bilanzraum ausgewiesener Potenziale		Werden die erhobenen Potenziale für einzelne Prozesse oder gesamte Industrien ausgewiesen?
Berechnungsmethode		Erfolgt eine Hochrechnung der erhobenen Potenziale? Auf welcher Basis erfolgt diese?
Differenzierung	Techno-ökonomisch	Werden Potenziale auf Basis technoökonomischer Randbedingungen (bspw. für verschiedene Vermarktungsoptionen) separat erhoben?
	Zeitlich	Wird unterschieden wann Potenziale zur Verfügung stehen?
	Örtlich	Werden Potenziale georeferenziert erhoben?

Für den detaillierten Vergleich der Methoden zur Potenzialerhebung werden 14 Studien ausgewählt. Für die Auswahl sind zwei Kriterien entscheidend. Zum einen werden nur Studien aufgenommen, deren Fokus explizit auf der Erhebung von Potenzialen und nicht auf Marktsimulationen, bei denen Flexibilitätspotenziale nur einen kleinen Teil ausmachen, liegt. Zum anderen muss ein ausreichender Informationsgehalt gegeben sein, der eine detaillierte Analyse erlaubt. Hieraus ergibt sich, dass nicht alle Studien, deren Potenziale in Abbildung 1.1 enthalten sind, in die umfassenden Metastudienanalyse aufgenommen werden. Der Vergleich der Studien anhand der identifizierten Problemfelder ist in Tabelle 1.4 zusammengefasst.

VIELZAHL VERSCHIEDENER POTENZIALBEGRIFFE

Insgesamt werden in den analysierten Studien 15 verschiedene Potenzialbegriffe verwendet. Diese lassen sich folgendermaßen zusammenfassen: theoretische Größen, Berücksichtigung von technischen, wirtschaftlichen und sozialen Aspekten, realisierte Potenziale sowie verschiedene Mischformen. Letztendlich ergeben sich hieraus vor allem fünf Probleme.

Erstens werden für gleiche Potenziale unterschiedliche Bezeichnungen verwendet. Dies wird besonders deutlich bei Potenzialen, welche wirtschaftliche Aspekte berücksichtigen. Hier existieren die Begriffe wirtschaftlich, wirtschaftlich realisierbar, ökonomisch und ökonomisch nutzbar, welche synonym verwendet werden [2, 3, 5, 8, 9, 13, 15, 16, 17, 18]. Zweitens definieren einzelne Studien eigene Potenziale, die in dieser Form in anderen Studien nicht erfasst werden. So lässt sich aufgrund der erhobenen Parameter darauf schließen, dass das in [13] erhobene soziotechnische Potenzial zwischen dem technischen und realisierbaren Potenzial aus [5, 8, 17] einzuordnen ist. Diese spezifischen Potenzialbegriffe sind allerdings nur begrenzt vergleichbar.

Drittens werden identische Bezeichnungen verwendet, aber bei der Potenzialerhebung unterschiedliche Aspekte berücksichtigt bzw. Annahmen zugrunde gelegt. [16] versteht unter technischem Potenzial, dasjenige welches unter Berücksichtigung der Anlagencharakteristik realisiert werden kann. In [13] wird es hingegen weiter eingeschränkt, da die Laständerung für eine Abruflaufzeit von mindestens einer Stunde möglich sein muss. In [14] werden hingegen technisches und theoretisches Potenzial gleichgesetzt. Das fehlende einheitliche Verständnis bezüglich der Begrifflichkeiten erschwert die Vergleichbarkeit der ausgewiesenen Potenziale zwischen den Studien.

Viertens enthalten nicht alle Studien vollständige Definitionen der erhobenen Potenziale bzw. Informationen über berücksichtigte Aspekte. So wird beispielsweise in [12, 14] festgehalten, dass das technische Potenzial untersucht wird, eine genaue Definition oder Angaben zu berücksichtigten Aspekten fehlen hingegen.

Fünftens existiert kein einheitliches Verständnis bezüglich der Beziehungen der einzelnen Potenzialbegriffe untereinander. In [13, 15, 16] ergeben sich die einzelnen Potenziale jeweils als Teilmengen übergeordneter Potenziale. [17] definiert sowohl das wirtschaftliche als auch das akzeptierte Potenzial als Teilmenge des technischen Potenzials. Das realisierbare Potenzial ergibt sich dann wiederum aus der Schnittmenge dieser beiden. Werden Potenziale nur aus Teilmengen übergeordneter Poten-

ziale gebildet, kann beispielsweise der Fall eines wirtschaftlichen Potenzials, welches aufgrund regulatorischer Hemmnisse (noch) nicht umgesetzt werden kann, nicht dargestellt werden.

KEIN EINHEITLICHES VERSTÄNDNIS UND INTRANSPARENZ BEZÜGLICH ZU ERHEBENDER PARAMETER

Die abweichenden Definitionen der verschiedenen Potenzialbegriffe deuten bereits darauf hin, dass bei der Erhebung der entsprechenden Potenziale unterschiedliche Parameter berücksichtigt werden. Vereinfachend können die relevanten Parameter in folgende Gruppen zusammengefasst werden: Stromverbrauchsdaten, technische Kennzahlen, Speicherdaten, Kosten, Erlöse sowie weiche Faktoren. Da nicht immer detaillierte Informationen zu den erhobenen Parametern bereitgestellt werden, ist eine genauere Gruppierung nicht möglich. Stromverbrauchsdaten und technische Kennzahlen sind in fast allen Studien Gegenstand der Untersuchung. Auch Kosten und weiche Faktoren werden häufig erhoben. Daten zu Speichern und Erlösen werden hingegen lediglich in je einer Studie abgefragt. Diese Unterschiede beruhen letztendlich darauf, welche Art von Potenzial – technisch, wirtschaftlich etc. – erhoben wird.

Maßgeblich ist darüber hinaus auch, inwiefern die betreffenden Studien genaue Informationen zu den einzelnen erhobenen Parametern oder lediglich ungefähre Angaben zu Parametergruppen enthalten. In [13, 19] ist der jeweils verwendete Fragebogen im Anhang verfügbar. [2, 5, 7, 8, 17] stellen zwar keinen Fragebogen zur Verfügung, es sind jedoch Informationen zu den erhobenen Parametern in Form von Auflistungen oder Erläuterungen enthalten. Die Notwendigkeit zur Angabe erhobener Parameter ist auch durch die Methode der Potenzialerhebung bedingt. Werden beispielsweise eine Metaanalyse oder Hochrechnung vorheriger Studienergebnisse durchgeführt, sind genaue Angaben zu erhobenen Parametern nicht notwendig bzw. möglich [3, 16]. Die übrigen fünf analysierten Studien enthalten indessen keine oder nur begrenzte Informationen [9, 12, 14, 15, 18]. Dies schränkt die Transparenz und Nachvollziehbarkeit der angewandten Methoden ein.

ART DER LASTÄNDERUNG

Bei den Arten der Laständerung, welche in den analysierten Studien untersucht werden, sind zwei kritische Aspekte erkennbar. Zum einen wird nicht immer klar zwischen Potenzialen der Lastreduktion und Lasterhöhung unterschieden. [3, 7] fassen diese unter Potenzialen für Lastverschiebung, Lastmanagement oder ähnlichen Begriffen zusammen. Aus dem Kontext wird klar, dass es sich hier um Potenziale zur Lastverschiebung handelt, bei der die Last zunächst reduziert wird und dann eine Phase des Ausgleichs durch entsprechende Lasterhöhung erfolgt. Potenziale für Lasterhöhung werden somit nicht angegeben. [19] weisen Verschiebepotenziale aus, wobei es sich letztendlich um Potenziale zur Lastreduktion handelt. [5, 8, 18] begrenzen ihre Analyse auf Potenziale zur Lastreduktion. Die übrigen Studien differenzieren zwischen Lastreduktion und Erhöhung.

Zum anderen unterscheiden sich die analysierten Studien inwiefern mögliche Produktionsausfälle aufgrund von Lastreduktion berücksichtigt werden. [2, 17, 19] weisen ein technisches Potenzial aus, welches den Produktionsausfall explizit zulässt. Die in [12, 14] ausgewiesenen Potenziale beinhalten ebenfalls den Produktionsausfall, was sich in diesen beiden

Fällen jedoch nur aus dem Kontext ergibt. [1, 5, 8, 18] setzen die weitgehend uneingeschränkte Wertschöpfung als Randbedingung und schließen somit den Produktionsausfall bei der Potenzialerhebung eindeutig aus. In [7, 13, 16] werden die Fälle mit und ohne Produktionsausfall untersucht und die entsprechenden Potenziale separat ausgewiesen. [9, 15] gehen hingegen nicht darauf ein wie bei der Potenzialerhebung mit möglichen Produktionsausfällen durch Lastreduktion umgegangen wird. Die analysierten Studien wählen folglich unterschiedliche Ansätze inwiefern ein möglicher Produktionsausfall berücksichtigt wird.

BETRACHTUNGSZEITRAUM

Die Frage, ob die Erhebung auf Basis heute installierter Anlagen erfolgt oder ob zukünftige technische Entwicklungen mit berücksichtigt werden, hat erheblichen Einfluss auf die ausgewiesenen Potenziale. [2, 12, 13, 16, 17] geben explizit an, dass die ausgewiesenen Potenziale eine Momentaufnahme auf Basis aktuell installierter Anlagen darstellen. Zukünftige Flexibilitätspotenziale, welche erst durch technische Weiterentwicklungen oder Veränderungen an Prozessen und Anlagen möglich werden, sind somit nicht Gegenstand der Untersuchung. [19] unterscheiden drei Fälle: Potenziale, die bereits heute genutzt werden können, solche, welche nur durch Neuerrichtungen von Anlagen oder Erneuerung wesentlicher Anlagenteile gehoben werden können und solche, die erst mittel- bis langfristig zur Verfügung stehen, da weiterer Forschungsbedarf oder die Errichtung von Demonstrationsanlagen notwendig sind. In [7] werden über die Entwicklung der spezifischen Verbräuche und Produktionsmengen zukünftige Potenziale für 2020, 2025 und 2030 berechnet. In den übrigen Studien werden keine direkten Angaben diesbezüglich gemacht. Allerdings lässt sich meist aus dem Kontext ableiten, dass sich die Erhebungen ebenfalls auf aktuelle Potenziale beziehen. In einigen Fällen werden Potenziale aus Stromverbräuchen und installierten Leistungen bestimmter Jahre abgeleitet. In anderen Fällen lässt die Durchführung von Befragungen darauf schließen, dass der Erhebung Anlagen, welche dem aktuellen Stand der Technik entsprechen, zugrunde gelegt werden. Wird bei Befragungen nicht explizit erwähnt, dass auch technische Weiterentwicklungen mit einbezogen werden, kann davon ausgegangen werden, dass dies nicht der Fall ist. Nichtsdestotrotz werden diese Rückschlüsse nur auf Basis der veröffentlichten Dokumente getroffen und es bleibt offen, ob die analysierten Studien tatsächlich identische Annahmen über den technischen Ausstattungsgrad der installierten Anlagen treffen.

ART UND BILANZRAUM DER DATENERHEBUNG

Die Datenerhebung erfolgt in den analysierten Studien auf drei Arten: bottom-up, in einer Kombination aus top-down und bottom-up oder auf Basis einer Metaanalyse. Die gewählte Art der Datenerhebung beeinflusst die Höhe der ausgewiesenen Potenziale, da unterschiedliche Aspekte Eingang in die Erhebung finden. [7, 9, 13, 17, 19] wählen einen bottom-up Ansatz. Hierzu werden telefonische oder Vor-Ort-Befragungen von Experten und Unternehmen durchgeführt. In den beiden Studien der FfE [7, 17] fließen zudem Datenauswertungen aus Begehungen ein. Die ausgewiesenen Potenziale werden dann durch entsprechende Aggregation der Daten bestimmt. In [2, 3, 5, 8, 12, 14] werden die Flexibilitätspotenziale in einer Kombination aus top-down und bottom-up Ansatz erhoben. In einem ersten Schritt wird hierbei top-down der mittlere Leistungsbedarf ermittelt. Hierzu wird über Tonnage und spezifischen Verbrauch

der Jahresstromverbrauch berechnet. Unter Berücksichtigung der Volllaststunden ergibt sich hieraus der mittlere Leistungsbedarf. In einem zweiten Schritt wird dann durch Multiplikation mit dem flexibilisierbaren Anteil das Flexibilitätspotenzial bestimmt. Dieser flexibilisierbare Anteil stammt aus Befragungen und wird somit bottom-up bestimmt. Eine Metaanalyse zur Potenzialenerhebung wird in [16] angewendet. Zu diesem Zweck werden Potenziale aus drei Studien nach ihrer Umsetzbarkeit kategorisiert und um Expertenschätzungen ergänzt. Eine genaue Beschreibung wie die Daten bzw. Potenziale aus den drei entsprechenden Studien in die Berechnung der ausgewiesenen Potenziale einfließen ist in dieser Studie nicht enthalten. In [15] ist die Art der Datenerhebung nicht eindeutig bestimmbar. Vermutlich ergeben sich die Potenziale ebenfalls aus der Aggregation von Daten vorrangigere Studien, da nicht auf Ergebnisse der selbst durchgeführten Befragung verwiesen wird.

Der Bilanzraum ergibt sich größtenteils bereits implizit aus der Art der Datenerhebung. In den Studien, welche einen bottom-up Ansatz über eine Befragung wählen, ist der Bilanzraum der Prozess bzw. die Anlage des betreffenden Betriebs. Wird hingegen eine Kombination aus top-down und bottom-up verfolgt, ist der zugehörige Bilanzraum der Prozess im gesamten Untersuchungsgebiet, also in den meisten Fällen ganz Deutschland. Der mittlere Leistungsbedarf ergibt sich hierbei aus den deutschlandweiten Produktionsmengen, dem durchschnittlichen spezifischen Stromverbrauch und den Betriebsstunden. Nur die Ermittlung des flexibilisierbaren Anteils bezieht sich auf die Befragung einzelner Betriebe.

BILANZRAUM AUSGEWIESENER POTENZIALE

Zusätzlich zum Bilanzraum der Datenerhebung sind auch beim Bilanzraum der ausgewiesenen Potenziale Diskrepanzen erkennbar. Mögliche Ausprägungen sind hier einzelne Prozesse, Branchen sowie die energieintensive Industrie als Ganzes. [2, 3, 7, 8, 17] wählen den engsten Bilanzraum und geben die erhobenen Potenziale auf Prozessebene – beispielsweise für die Aluminiumelektrolyse – an. Letztere Studie bildet hier noch einmal eine Ausnahme, da nicht das deutschlandweit hochgerechnete Potenzial des Prozesses, sondern das Potenzial eines einzelnen typischen Prozesses bzw. einer typischen Anlage ausgewiesen wird. Auch in [13] ist der Bilanzraum der ausgewiesene Prozess. Allerdings werden hier aus Datenschutzgründen die Potenziale einzelner Prozesse (z. B. Aluminiumelektrolyse und Luftzerlegung) zusammengefasst. Den weitesten Bilanzraum setzt [16]. Hier werden die erhobenen Potenziale aus der Metaanalyse auf Sektoren aggregiert und so lediglich ein Potenzial für die gesamte energieintensive Industrie angegeben. In den übrigen Studien ist der Bilanzraum der ausgewiesenen Potenziale die jeweilige Branche – beispielsweise die Chemieindustrie.

Auch in diesem Fall erschwert die Wahl unterschiedlicher Bilanzräume die Vergleichbarkeit der Ergebnisse. Darüber hinaus zeigt der Vergleich, dass der Bilanzraum der Datenerhebung und der Bilanzraum der ausgewiesenen Potenziale in einigen Fällen nicht übereinstimmen. Es ist fraglich, inwiefern eine Datenerhebung auf Prozessebene eine Hochrechnung der entsprechenden Potenziale auf eine gesamte Branche überhaupt zulässt. Wird beispielsweise das Potenzial des Holzschleifers untersucht und dieses dann auf die gesamte Papierindustrie übertragen, so ist dies als obere Grenze zu verstehen.

BERECHNUNGSMETHODE

Die Berechnungsmethode gibt an, wie die erhobenen Potenziale hochgerechnet bzw. skaliert werden. Hierbei sind zwei Aspekte maßgeblich: die Basis sowie die Kennzahl, über die hochgerechnet wird.

[5, 8] wählen einen top-down Ansatz, wodurch eine Hochrechnung der erhobenen Potenziale nicht notwendig ist. Die Berechnungen in [15] basieren auf den deutschlandweiten Potenzialen vorangegangener Studien. Auch hier bedarf es folglich keiner Hochrechnung der Potenziale. In [16] wird die Vorgehensweise umgekehrt. Das deutschlandweite Potenzial wird auf Basis dreier Studien ermittelt und dann über Produktionskapazitäten auf Nordrhein-Westfalen skaliert. Schließlich wird in [17] ganz auf eine Hochrechnung verzichtet und das Flexibilitätspotenzial für einen typischen Prozess bzw. eine typische Anlage ausgewiesen. In jener Studie wird insbesondere auf die Schwierigkeiten bei der Hochrechnung aus Erhebungen einer ausgewählten Stichprobe eingegangen. Enthält die Stichprobe hauptsächlich Unternehmen, die sich bereits in der Vermarktung befinden, so besteht die Gefahr einer Überschätzung der Flexibilitätspotenziale. Es ist anzunehmen, dass sich zunächst Unternehmen mit vergleichsweise niedrigen Implementierungs- und Betriebskosten bzw. hohen Erlösen zur Vermarktung entschließen. Diese Unternehmen sind jedoch höchstwahrscheinlich nicht repräsentativ für die Gesamtheit der Industriebetriebe. Wird die Stichprobe jedoch von Unternehmen dominiert, die noch nicht an einer Vermarktung teilnehmen, so ist eine Unterschätzung der Potenziale zu erwarten. Es wird angenommen, dass im Verlauf der Implementierung von Flexibilisierungsmaßnahmen weitere Potenziale aufgedeckt werden, welche die erste Einschätzung der Unternehmen übersteigen. Letztendlich können insbesondere Hochrechnungen aus kleinen Stichproben zu verfälschten Ergebnissen führen. Eine detaillierte Diskussion zur möglichen Problematik der Hochrechnung von Flexibilitätspotenzialen findet sich in Kapitel 1.1.2)

Die übrigen Studien rechnen die erhobenen Potenziale über verschiedene Kennzahlen hoch. Hierzu zählen Produktionsmengen und -kapazitäten, Stromverbrauch sowie Leistung. Während in einigen Fällen detaillierte Angaben gemacht werden, bleibt in anderen offen, welche Größen für die jeweilige Branche gewählt werden. Die Berechnungsmethode und die Wahl der Kennzahlen beeinflussen die Höhe der ausgewiesenen Potenziale und sind daher für deren deutliche Streuung mit verantwortlich.

TECHNO-ÖKONOMISCHE, ZEITLICHE UND ÖRTLICHE DIFFERENZIERUNG

Schließlich zeigt sich bei der Analyse der Studien, dass verschiedene Differenzierungen nach techno-ökonomischen, zeitlichen und örtlichen Gesichtspunkten vorgenommen werden.

Die größte Vielfalt zeigt sich hier bei der Differenzierung nach techno-ökonomischen Aspekten. [18, 19] weisen die erhobenen Potenziale separat für verschiedene Abrufdauern aus. [13] differenzieren die Potenziale zudem nach zehn Nutzungsformen, welche in Anlehnung an verschiedene Vermarktungsoptionen definiert werden. [5, 7] entwickeln Kosten-Potenzial-Kurven, in denen die Potenziale aufsteigend nach ihren Kosten sortiert werden. [2, 3, 8, 17] berücksichtigen verschiedene Aspekte bei der Erhebung, weisen die Potenziale jedoch nicht explizit differenziert aus.

Eine zeitliche Differenzierung der Potenziale steht in den analysierten Studien nicht im Fokus, da die Produktion in der Grundstoffindustrie typischerweise keinen tageszeitlichen und saisonalen Schwankungen unterliegt. Eine Ausnahme sind hier lediglich Zementwerke, deren Produktion in den Wintermonaten geringer ist, zudem wird vorwiegend nachts produziert.

Eine örtliche Differenzierung der ausgewiesenen Potenziale wird in [7] realisiert. Nichtsdestotrotz wird die örtliche Verfügbarkeit auch in anderen Studien beachtet. Insbesondere wenn Unternehmensbefragungen Teil der Erhebung sind, ist davon auszugehen, dass die Potenziale zumindest teilweise standortscharf vorliegen.

1.1.1.3 LÖSUNGSVORSCHLÄGE FÜR DIE IDENTIFIZIERTEN PROBLEMFELDER ZUR ENTWICKLUNG EINER METHODIK ZUR POTENZIALERHEBUNG

EINHEITLICHE DEFINITION UND KLARE ABGRENZUNG DER POTENZIALBEGRIFFE

In einem ersten Schritt erfolgt die Auswahl von fünf relevanten Potenzialbegriffen, für die einheitliche Definitionen festgelegt werden. Abbildung 1.2 stellt dar wie sich die einzelnen Potenziale aus Schnittmengen bzw. Teilmengen übergeordneter Potenziale ergeben.

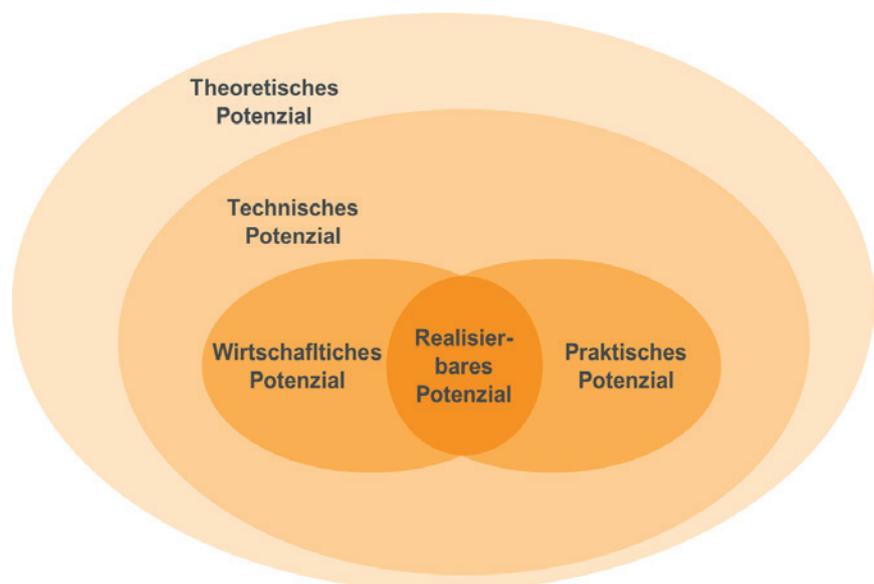


Abbildung 1.2: Abgrenzung der verschiedenen Potenzialbegriffe

Das theoretische Potenzial ist eine rein rechnerische Größe. Es wird zu jedem Zeitpunkt durch die installierte Leistung der Anlage und die Ist-Last bestimmt. Im Rahmen der vorliegenden Studie wird dieses Potenzial nicht ausgewiesen, da es zu Fehlinterpretationen und Überschätzung der verfügbaren Flexibilität führen kann.

Beim technischen Potenzial werden hingegen zusätzlich sicherheits- und anlagenrelevante Restriktionen berücksichtigt. Es stellt somit die Last dar, welche aus technischer Sicht zu- bzw. abgeschaltet werden kann. Im Rahmen dieser Studie wird das technische Potenzial unter der Nebenbedingung erhoben, dass keine Lieferverpflichtungen verletzt werden (bzw. Ausbringungsmenge und Qualität konstant gehalten werden).

Das wirtschaftliche Potenzial ist eine Teilmenge des technischen Potenzials. Es entspricht dem Anteil des technischen Potenzials, der wirtschaftlich genutzt werden kann. Dies ist der Fall, wenn unter Berücksichtigung des Zeitwerts des Geldes die durch die Flexibilisierung generierten Erlöse die entsprechenden Kosten übersteigen. Das wirtschaftliche Potenzial wird in dieser Studie nicht ausgewiesen. Soweit wie möglich werden Kosten erhoben.

Das praktische Potenzial ist ebenfalls eine Teilmenge des technischen Potenzials. Bei der Erhebung des praktischen Potenzials werden zusätzlich unternehmensinterne, regulatorische und administrative Hemmnisse mit einbezogen. Im Rahmen dieser Studie werden relevante Hemmnisse qualitativ untersucht. Das praktische Potenzial wird jedoch nicht ausgewiesen.

Das realisierbare Potenzial ergibt sich schließlich als Schnittmenge des wirtschaftlichen und des praktischen Potenzials. Es ist damit das Potenzial, das betriebswirtschaftlich sinnvoll von Unternehmen genutzt und gleichzeitig auch von den Unternehmen selbst für Flexibilisierungen freigegeben werden kann. Das realisierbare Potenzial wird in dieser Studie nicht ausgewiesen.

Es ist zu beachten, dass alle fünf Potenzialbegriffe unabhängig vom Zeithorizont definiert sind und daher sowohl für heutige als auch zukünftige Zeitpunkte erhoben werden können. Die Unterscheidung der Betrachtungszeiträume wird über Definition von Flexibilitätspotenzialen und Flexibilitätsperspektiven realisiert (siehe Abschnitt zur klaren Abgrenzung der Betrachtungszeiträume).

EINDEUTIGE ZUORDNUNG DER ZU ERHEBENDEN PARAMETER JE POTENZIALBEGRIFF

Um die Transparenz der Potenzialerhebung zu gewährleisten, werden den Potenzialbegriffen jeweils Parameter zugeordnet, die für deren Erhebung abgefragt werden müssen. Abbildung 1.3 stellt diese Zuordnung graphisch dar.

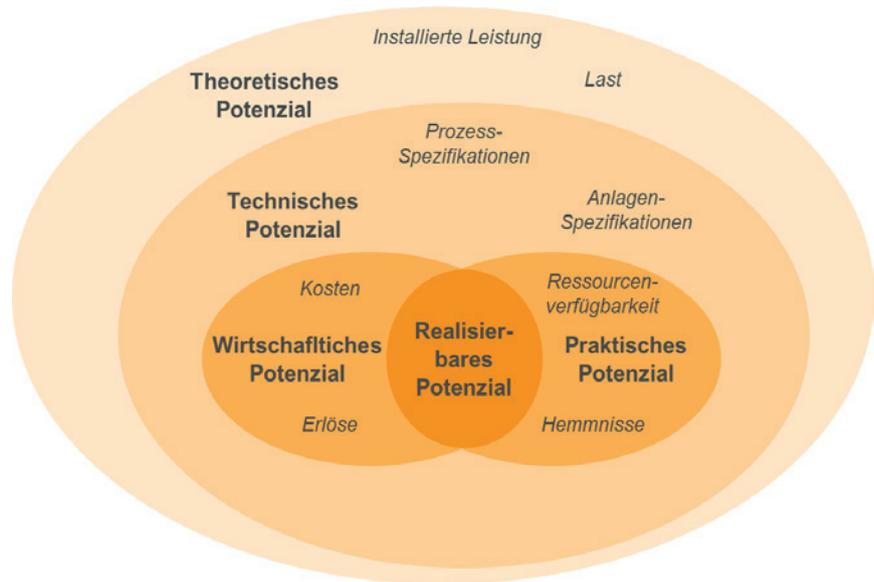


Abbildung 1.3: Zuordnung der zu erhebenden Parameter je Potenzialbegriff

Das theoretische Potenzial ist demnach aus der installierten Leistung der Anlage und der Last zum entsprechenden Zeitpunkt ableitbar.

$$\text{Positives Potenzial} = \text{Ist-Last} \quad (1)$$

$$\text{Negatives Potenzial} = \text{Installierte Leistung} - \text{Ist-Last} \quad (2)$$

Da die Erhebung des technischen Potenzials sicherheits- und anlagenrelevante Restriktionen einschließt, müssen hierfür Prozess- und Anlagenspezifikationen abgefragt werden. Hierzu zählen beispielsweise Vorankündigungszeiten und Sperrzeiten bis zur nächsten Laständerung sowie die maximale Abrufdauer. Darüber hinaus sind bei Bedarf Daten zu Materialspeichern für Vorprodukte und Produkte zu erfassen.

Zur Ermittlung des wirtschaftlichen Potenzials müssen zusätzlich mit der Flexibilisierung verbundene Kosten und Erlöse erhoben werden. Die Erlöse setzen sich aus möglichen Einsparungen bei den Stromkosten und Erlösen, welche durch die Vermarktung der Flexibilität generiert werden, zusammen. Zu den Kosten zählen Investitionen, fixe und variable Betriebskosten sowie Opportunitätskosten für den Fall verminderter Produktion. Diese entsprechen hierbei den „Entgangene[n] Erträge[n] oder Nutzen im Vergleich zur besten, nicht realisierten Handlungsalternative“ [20]. Im Kontext der Lastflexibilisierung entstehen diese im Falle einer Lastreduktion, die nicht ausgeglichen werden kann. Sie entsprechen dem entgangenen Deckungsbeitrag durch die verminderte Produktion [7]. Die notwendigen Investitionen müssen sich hierbei innerhalb einer definierten Dauer amortisieren. Diese Amortisationsdauer kann zwischen Betrieben bzw. Analagentypen variieren.

Beim praktischen Potenzial werden unternehmensinterne, regulatorische und administrative Hemmnisse mitbetrachtet. Hierzu zählen beispielsweise tarifrechtliche Bestimmungen, welche einer Anpassung der Produktion entgegenstehen können. Des Weiteren werden Ressourcenverfügbarkeit sowie Planbarkeit bzw. Prognosesicherheit der Laständerung berücksichtigt. Unter Ressourcen sind hierbei die Verfügbarkeit von Mitarbeitern und das Vorhandensein von Rohstoffen im Prozess vorge-

lagerten Speicher zu verstehen. Ein ausreichend großer nachgelagerter Produktspeicher findet hingegen Eingang in die Ermittlung des technischen Potenzials, da sich hieraus unter Umständen sicherheitsrelevante Probleme ergeben können. Dies ist beispielsweise der Fall, wenn die Lasterhöhung bei der Chlorelektrolyse zu einer Mehrproduktion von Chlor führt, die vom nachgelagerten Speicher nicht mehr aufgenommen werden kann.

Das realisierbare Potenzial ergibt sich aus der Schnittmenge des wirtschaftlichen und des praktischen Potenzials. Daher müssen für dessen Bestimmung alle Parameter dieser beiden Potenziale erhoben werden.

ANALYSE VERSCHIEDENER ARTEN DER LASTÄNDERUNG

Im Rahmen der Studie bezeichnet eine Laständerung die Änderung der bezogenen Leistung gegenüber der bezogenen Leistung im Referenzbetrieb. Diese ist nach oben durch die Kapazität und nach unten durch die Teillastfähigkeit der Anlage begrenzt.

Ein wichtiger Aspekt ist hierbei die klare Unterscheidung zwischen Lastreduktion und -erhöhung. Ersteres wird in Anlehnung an die Definition des Regelleistungsmarkts auch als positives Leistungspotenzial bezeichnet und bedeutet Reduktion der Leistungsaufnahme im Vergleich zum Referenzbetrieb. Zweiteres, auch negatives Leistungspotenzial genannt, entspricht der Erhöhung der Leistungsaufnahme im Vergleich zum Referenzbetrieb. Die alleinige Ausweisung eines dieser beiden Potenziale zur Lastflexibilisierung ist nicht ausreichend, da Reduktion und Erhöhung der Last in der Regel nicht in gleichem Maße möglich sind.

Bei der Lastreduktion muss zusätzlich ein möglicher Ausgleichsbedarf berücksichtigt werden. Bei Querschnittstechnologien (z. B. Beleuchtung) ist eine Lastreduktion teilweise auch ohne späteren Ausgleich möglich. Bei stromintensiven Prozessen führt die Lastreduktion ohne folgenden Ausgleich jedoch häufig zu Produktionsausfall. Eine Ausnahme bilden hier Hybridlösungen. In diesem Fall kann eine Reduktion der elektrischen Last direkt durch eine Erhöhung des Erdgasbedarfs ausgeglichen werden und es ergibt sich kein nachträglicher Ausgleichsbedarf. Demzufolge sind im Wesentlichen zwei Aspekte von Bedeutung. Im ersten Schritt ist zu klären, ob durch die Lastreduktion ein Ausgleichsbedarf entsteht. Ist dies der Fall, ist weiterhin ausschlaggebend, ob dieser Bedarf bedient wird, um zu beurteilen, ob es zu einem Produktionsausfall kommt. Entscheidend ist in diesem Kontext immer auch innerhalb welches Zeitrahmens die Lastreduktion ausgeglichen werden muss, um einen Produktionsausfall zu vermeiden. Wie oben erwähnt gilt in dieser Studie die Nebenbedingung, dass durch eine Lastreduktion keine Lieferverpflichtungen verletzt werden.

KLARE ABGRENZUNG DER BETRACHTUNGSZEITRÄUME

Um eindeutig zwischen Flexibilitäten, die bereits heute zur Verfügung stehen, und solchen, welche erst zukünftig realisiert werden können, abzugrenzen, werden die Begriffe Flexibilitätspotenziale und Flexibilitätsperspektiven eingeführt.

Flexibilitätspotenziale bezeichnen die flexibilisierbare Last der aktuell installierten Anlagen unter heutigen Rahmenbedingungen. D.h. es ist lediglich die Nachrüstung von entsprechender Hard- und Software not-

wendig, um eine flexible Fahrweise der Anlage zu ermöglichen. Flexibilitätspotenziale stellen den Schwerpunkt der Studie dar und werden durch eine quantitative Analyse ermittelt.

Flexibilitätsperspektiven hingegen bezeichnen zukünftige Potenziale, welche durch Weiter- und Neuentwicklungen der technischen, wirtschaftlichen und praktischen Rahmenbedingungen nutzbar werden. In dieser Studie liegt der Fokus auf technischen Flexibilitätsperspektiven, welche nur durch technische Eingriffe bzw. Veränderungen an Prozessen umgesetzt werden können. Diese werden dabei in die folgenden drei Kategorien unterteilt. Erstens kann durch einen Energieträgerwechsel – d.h. durch Elektrifizierung bzw. Hybridisierung – zusätzliche Flexibilität geschaffen werden. Zweitens fallen die Erweiterung von Stoff- und Energiespeichern unter Flexibilitätsperspektiven. Durch die Vergrößerung eines Produktspeichers kann beispielsweise die Abrufdauer einer Lasterhöhung verlängert werden, da ausreichende Lagerkapazitäten für die Mehrproduktion zur Verfügung stehen. Somit steigt das technische Potenzial der Lasterhöhung. Drittens zählen der Umbau bzw. die Weiterentwicklung von Anlagen bzw. des gesamten Prozesses, welche die Flexibilität erhöhen, zu möglichen Flexibilitätsperspektiven. Die Analyse der Flexibilitätsperspektiven erfolgt zunächst im Rahmen einer qualitativen Beschreibung. Eine genauere Analyse erfolgt ggf. in Folgeprojekten.

IDENTISCHER BILANZRAUM DER DATENERHEBUNG UND DER AUSGEWIESENEN POTENZIALE

Die Erhebung der Potenziale erfolgt bottom-up über Referenzprozesse. Diese sind für eine Branche repräsentative Prozesse und werden entsprechend parametrisiert. Das technische Potenzial des Referenzprozesses wird anschließend über geeignete Kennzahlen wie z. B. Produktionsmengen oder den Stromverbrauch auf Deutschland hochgerechnet. Das ausgewiesene Potenzial bezieht sich auch nach der Hochrechnung nicht auf die gesamte Branche, sondern weiterhin auf den jeweiligen Referenzprozess. Durch den Ansatz über Referenzprozesse wird eine Überschätzung bzw. Unterschätzung bei der Hochrechnung der erhobenen Potenziale vermieden.

Im ersten Schritt werden in dieser Studie durch die Branchenvertreter für die einzelnen Branchen relevante Prozesse bestimmt. Diese sind für die jeweilige Branche typische Prozesse. Sie werden jedoch hinsichtlich technischer Kennzahlen im Gegensatz zu Referenzprozessen nicht einheitlich und anlagenübergreifend parametrisiert, da sich dies im Projektverlauf als nicht möglich erweist. Die gewählten relevanten Prozesse sind Tabelle 1.2 zu entnehmen.

Tabelle 1.2: Ausgewählte Prozesse der untersuchten Branchen

Branche	Ausgewählte Prozesse
Chemieindustrie (DEC)	Chlor-Alkali-Elektrolyse
Feuerfestindustrie (FGF)	Rohstoffschmelzanlage
Glasindustrie (HVG)	Behälterglasherstellung
Stahlindustrie (BFI)	Elektrostahlöfen
Zementindustrie (VDZ)	Roh- und Zementmahlung

In dieser Studie liegt der Fokus zunächst auf der Erhebung der Flexibilitätspotenziale einzelner relevanter Prozesse. Soweit möglich wird anschließend eine Hochrechnung auf Deutschland vorgenommen. Aufgrund des Ansatzes über relevante Prozesse ist die Hochrechnung der ermittelten Flexibilitätspotenziale nur in einzelnen Branchen möglich.

TECHNO-ÖKONOMISCHE, ZEITLICHE UND ÖRTLICHE DIFFERENZIERUNG

Idealerweise werden bei der Potenzialerhebung techno-ökonomische Differenzierungen sowie zeitliche und örtliche Verfügbarkeit bedacht. Werden die Parameter auf geeignete Weise ausgewählt und abgefragt, so können im Nachhinein verschiedene techno-ökonomische Differenzierungen – wie beispielsweise nach der Abrufdauer oder nach Vermarktungsoptionen – sowie die Erstellung von Kosten-Potenzial-Kurven realisiert werden. Um der zeitlichen Verfügbarkeit gerecht zu werden, müssen tageszeitliche, wochentags und jahreszeitliche Abhängigkeiten des Lastverlaufs in die Erhebung miteinfließen. Die Beachtung der örtlichen Verfügbarkeit kann über die Ausweisung georeferenzierter Potenziale umgesetzt werden. Selbstverständlich können nicht all diese Aspekte gleichzeitig berücksichtigt werden. Vielmehr muss in Hinblick auf die einzelnen Zielgruppen stets sorgfältig abgewogen werden, welche Differenzierungen der Potenziale am geeignetsten sind.

In dieser Studie werden im Rahmen einer techno-ökonomischen Differenzierung die folgenden drei Anforderungsprofile aus Sicht des Energiesystems entwickelt:

- Kurzfristige Anpassung der Last
- Anpassung der Last über mehrere Stunden
- Reduktion der Last über mehrere Tage

Eine detaillierte Beschreibung dieser Profile findet sich in Kapitel 1.4.

1.1.2 PROBLEMATIK DER HOCHRECHNUNG VON FLEXIBILITÄTSPOTENZIALEN

Bei der Hochrechnung von Flexibilitätspotenzialen aus Erhebungen kann es vorrangig zu den folgenden drei Problemen kommen:

- Einzelne Werke sind sehr heterogen
- Anlagen einzelner Standorte sind nicht alle zu jedem Zeitpunkt in Betrieb
- Über- oder Unterschätzung der Flexibilitätspotenziale in Abhängigkeit der Stichprobe

Erstens sind die Voraussetzungen für Flexibilität in den einzelnen Betrieben sehr unterschiedlich. Das Flexibilitätspotenzial hängt sehr stark von der Auslastung der einzelnen Betriebe ab. Diese kann jedoch stark zwischen einzelnen Betrieben einer Branche variieren und ist nicht für alle Betriebe bekannt. Darüber hinaus sind die internen Betriebsabläufe der einzelnen Betriebe sehr heterogen. Daher ist die Hochrechnung anhand der Ergebnisse aus einzelnen Unternehmensbefragungen mit Unsicherheiten verbunden.

Zweitens befinden sich nicht alle Anlagen eines Referenzprozesses an allen Standorten zu jedem Zeitpunkt im gleichen Betriebspunkt. Zum einen wird die Fahrweise und damit Leistungsaufnahme einzelner Anlagen durch die spezifische Werksauslastung bestimmt. Zum anderen wird die Last bei Prozessen mit variierender Leistungsaufnahme wie beispielsweise der Elektrostahlerzeugung durch den jeweiligen Zeitpunkt im Prozessablauf bestimmt. Es ist anzunehmen, dass sich zu einem beliebigen Zeitpunkt nicht alle Anlagen im gleichen Prozessschritt befinden und daher eine unterschiedlich hohe Leistungsaufnahme aufweisen. Ferner werden Wartungsintervalle werkspezifisch geplant. D.h. es kann nicht davon ausgegangen werden, dass zu einem beliebigen Zeitpunkt alle Anlagen eines Referenzprozesses in Betrieb sind. Wird also das in Befragungen ermittelte Flexibilitätspotenzial beispielsweise durch Multiplikation mit der Anzahl der Werke hochgerechnet, so führt dies zu einer Überschätzung des verfügbaren Flexibilitätspotenzials. Um diesen Fehler zu korrigieren, müsste bei der Hochrechnung ein entsprechender Gleichzeitigkeitsfaktor berücksichtigt werden. Dieser ist jedoch nicht bekannt.

Drittens kann es durch die Zusammensetzung der Stichprobe zu einer Über- oder Unterschätzung der Flexibilitätspotenziale kommen. Im Rahmen des Projektes werden die Flexibilitätspotenziale mittels Unternehmensbefragungen durch die Branchenvertreter erhoben, woraus sich folgende Probleme ergeben können³. Werden vorrangig Unternehmen befragt, welche sich bereits in der Vermarktung von Flexibilität befinden, kann es zu einer Überschätzung der Potenziale kommen. Die Vermarktung von industrieller Flexibilität befindet sich noch im Aufbau. Daher kann davon ausgegangen werden, dass sich zunächst Unternehmen mit besonders niedrigen spezifischen Implementierungs- und Betriebskosten und/oder hohen Erlösen für die Vermarktung entscheiden. Diese sind voraussichtlich nicht repräsentativ für die Grundstoffindustrie als Ganzes. Werden jedoch hauptsächlich Unternehmen befragt, die sich noch nicht in der Vermarktung befinden, so werden die vorhandenen Flexibilitätspotenziale unterschätzt. Gespräche mit Vermarktern im Rahmen des DSM-Bayern Projektes der FfE GmbH [17] und des IHK-Projektes [21] zeigten, dass im Laufe Implementierung von industrieller Flexibilität weitere Potenziale identifiziert werden, die über die erste Einschätzung der DSM-Potenziale durch die Unternehmen hinausgehen. Gründe hierfür sind einerseits mangelnde Kenntnisse seitens der Unternehmen über die Möglichkeiten der Vermarktung und andererseits ein grundsätzlich eher vorsichtiges Vorgehen aufgrund von Befürchtungen, vermehrte Flexibilität könnte die Produktion negativ beeinflussen. Für Unternehmen ohne eigene Vermarktungserfahrung ist es oft schwer, Parameter wie Vorankündigungsdauern, Abrufdauern, Abrufhäufigkeiten und mögliche Kosten abzuschätzen.

³ Eine detaillierte Diskussion dieser Probleme findet sich in [17]

1.1.3 ERSTELLUNG EINES FRAGEBOGENS ZUR ERHEBUNG DES TECHNISCHEN FLEXIBILITÄTSPOTENZIALS

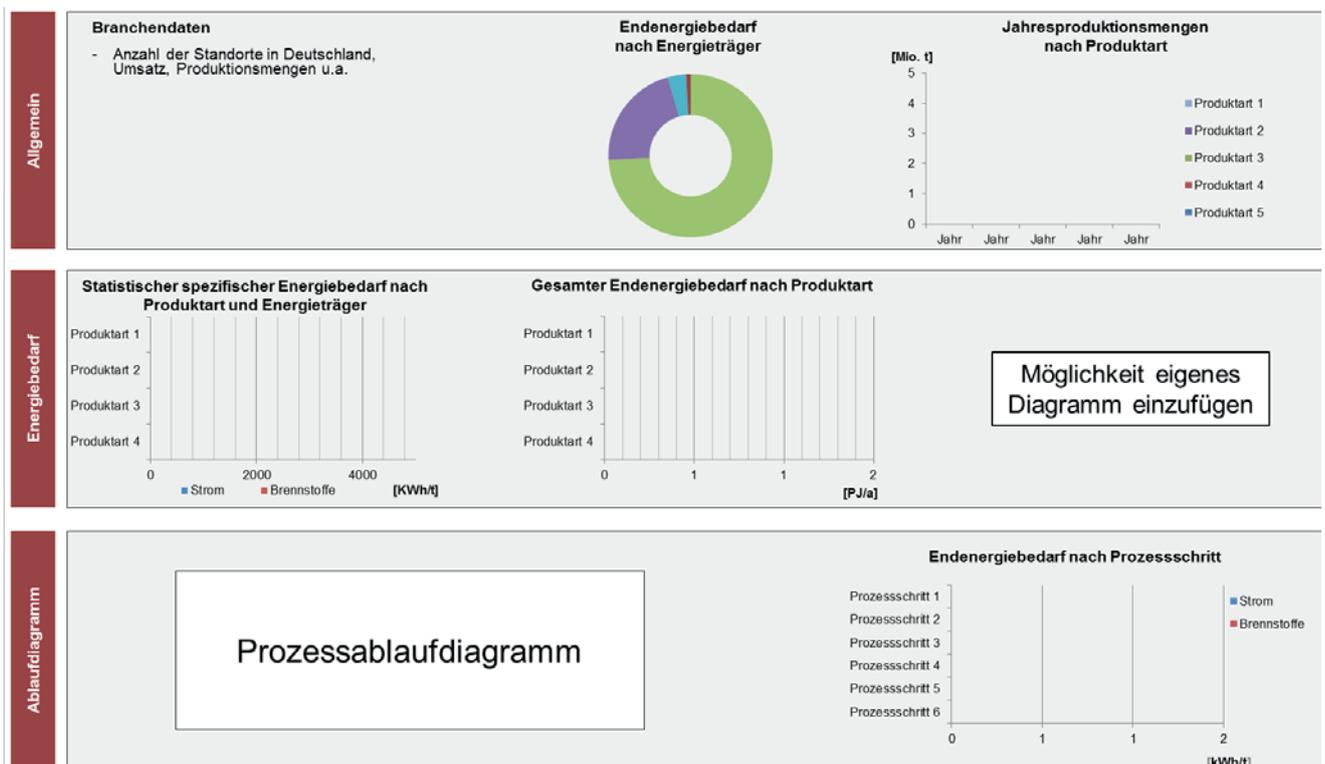
Auf Basis der Parameterzuordnung je Potenzialbegriff (siehe Abbildung 1.3) wird eine Liste zu erhebender Daten erstellt. In Zusammenarbeit mit den Branchenexperten wird geklärt, inwiefern die entsprechenden Daten bereits vorliegen bzw. erhoben werden können. Aufbauend auf diesen Informationen wird ein Fragebogen erstellt. Um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten, wird dieser anschließend mit der Befragung in Cluster I und V des Projektes SynErgie abgestimmt. Dieser Fragebogen bildet dann die Grundlage für die Unternehmensbefragung der Branchenexperten.

1.1.4 STECKBRIEFE ZUR AGGREGATION DER ERGEBNISSE

BRANCHENSTECKBRIEF

Um einen ersten Überblick über die ausgewählten Referenzprozesse und deren Bedeutung in der jeweiligen Branche zu liefern, werden entsprechende Vorlagen entwickelt (siehe Abbildung 1.4). Die ausgefüllten Branchensteckbriefe finden sich in den Kapiteln der Branchen.

Abbildung 1.4: Vorlage für einen Branchensteckbrief



STECKBRIEF FÜR REFERENZPROZESS

Zur Aggregation der Ergebnisse werden ferner Steckbriefe für die einzelnen Referenzprozesse entwickelt. Diese erleichtern die Vergleichbarkeit der Ergebnisse zwischen den Referenzprozessen.

Abbildung 1.5: Vorlage für einen Referenzprozess-Steckbrief

Referenzprozess	Referenzprozess			
	Typische Anlagengröße in MW	XX – YY		
	Technisches Potenzial	Negativ	Positiv	
	Potenzial in MW oder %			
	Abrufdauer in Min.			
Abrufhäufigkeit				
Perspektiven und Effizienz	Flexibilitätperspektiven		Das Wichtigste in Kürze	Wechselwirkungen zwischen Effizienz und Flexibilität
	Beschreibung verschiedener FlexPerspektiven, deren Auswirkungen auf die Flexibilität des Referenzprozesses, Hemmnisse bei der Umsetzung u.a.		• ...	
Energiewirtschaftliche Bedeutung	Anforderungsprofile			<div style="border: 1px solid black; padding: 10px; width: fit-content; margin: auto;"> Feld für weitere wichtige Informationen </div>
	1	Welche Anforderungsprofile können erfüllt werden, warum nicht u.a.		
	2			
	3			

1.1.5 ANHANG

Tabelle 1.3: Übersicht über 28 analysierte Studien

Autor / Institut	Jahr	Titel
acatech, Fraunhofer ICT, WI	2015	Flexibilitätskonzepte für die Stromversorgung 2050: Technologien – Szenarien – Systemzusammenhänge
Agora, Ecofys	2016	Flex-Efficiency. Ein Konzept zur Integration von Effizienz und Flexibilität bei industriellen Verbrauchern
BEE	2013	Möglichkeiten zum Ausgleich fluktuierender Einspeisungen aus erneuerbaren Energien
BMVIT	2011	Demand Response Potential of the Austrian industrial and commerce sector
Dena	2010	dena Netzstudie II - Integration erneuerbarer Energien in die deutsche Stromversorgung im Zeitraum 2015–2020 mit Ausblick 2025
DIW, FfE	2013	Lastmanagement für Systemdienstleistungen und zur Reduktion der Spitzenlast
DLR	2014	Möglichkeiten und Grenzen des Lastausgleichs durch Energiespeicher, verschiebbare Lasten und stromgeführte KWK bei hohem Anteil fluktuierender erneuerbarer Stromerzeugung
Energieagentur NRW	2016	Lastmanagement in Nordrhein-Westfalen: Potenziale, Hemmnisse, Handlungsoptionen
ETH Zürich (Klobasa)	2007	Dynamische Simulation eines Lastmanagements und Integration von Windenergie
EWI (Paulus, Borggrefe)	2010	The potential of demand-side management in energy-intensive industries for electricity markets in Germany
FfE	2014	Demand Response in der Industrie
FfE	2016	Regionale Lastmanagementpotenziale stromintensiver Prozesse
FfE	2016	Lastflexibilisierung in der Industrie und GHD – Teilprojekt aus Merit Order der Energiespeicherung 2030 (MOS 2030)
FfE	2016	Wissenschaftliche Projektbegleitung des Projektes DSM Bayern
FfE, Agora, Fraunhofer ISI	2013	Lastmanagement als Beitrag zur Deckung des Spitzenlastbedarfs in Süddeutschland
Fraunhofer ISI (Focken, Klobasa)	2011	Kurz- bis Mittelfristig realisierbare Marktpotenziale für die Anwendung von Demand Response im gewerblichen Sektor
Fraunhofer ISI (Klobasa)	2009	Integration von Windenergie in ein zukünftiges Energiesystem unterstützt durch Lastmanagement
Frontier Economics	2014	Strommarkt in Deutschland – Gewährleistet das derzeitige Marktdesign Versorgungssicherheit?
IER Universität Stuttgart	2013	Identifikation und Bewertung des intelligenten Lastmanagementpotenzials in der Industrie in Baden-Württemberg
IER Universität Stuttgart	2015	Identifikation und Realisierung wirtschaftlicher Potenziale für Demand Side Integration in der Industrie in Deutschland
IfE TU München (Atabay)	2015	FOREnergy – Die Energieflexible Fabrik
r2b, Connect Energy Economics, Fraunhofer ISI, consentec	2014	Endbericht Leitstudie Strommarkt. Arbeitspaket Funktionsfähigkeit EOM & Impact-Analyse der Kapazitätsmechanismen
Siemens (Orioli)	2015	Potentials of industrial load management in Germany
TU Darmstadt	2012	Lastmanagementpotenziale der stromintensiven Industrie zur Maximierung des Anteils regenerativer Energien im bezogenen Strommix
TU München (Graßl)	2014	Bewertung der Energieflexibilität in der Produktion
UBA	2015	Potentiale regelbarer Lasten in einem Energieversorgungssystem mit wachsendem Anteil erneuerbarer Energien
VDE	2012	Demand Side Integration: Lastverschiebungspotenziale in Deutschland
Wuppertal Institut	2016	FlexInd – Flexibilisation of industries enables sustainable energy systems

		BMVIT 2011 [19]	DENA 2010 [2]	DIW 2013 [3]
Potenzialbegriffe		Technisch, wirtschaftlich	Technisch, ökonomisch nutzbar	Ökonomisch
Erhobene Parameter		Stromverbrauchsdaten, technische Kennzahlen, Kosten	Technische Kennzahlen, Kosten, Speicherdaten	Technische Kennzahlen, weiche Faktoren
Art der Laständerung		Lastreduktion Inklusive Produktionsausfall	Unterscheidung Lastreduktion und -erhöhung Inklusive Produktionsausfall	Keine Unterscheidung Lastreduktion und -erhöhung, Exklusive Produktionsausfall
Betrachtungszeitraum		Aktuell installierte Anlagen und zukünftige Potenziale	Aktuell installierte Anlagen (explizit)	Aktuell installierte Anlagen (Befragung)
Art und Bilanzraum der Datenerhebung		Top-down je Branche Bottom-up über Prozess	Kombination aus top-down und bottom-up für Prozess	Kombination aus top-down und bottom-up für Prozess
Bilanzraum ausgewiesener Potenziale		Branche	Prozess	Prozess
Berechnungsmethode		Basis: Potenzial der befragten Betriebe, Hochrechnung über Stromverbrauch	Basis: Potenzial der befragten Betriebe Hochrechnung je nach Branche über Produktionsmengen	Basis: Potenzial Süddeutschland Hochrechnung über Produktionsmengen auf Gesamtdeutschland
Differenzierung	Techno-ökonomisch	Abrufdauer, Kosten-Potenzial-Kurven für verschiedene Abrufdauern	Verschiedene Aspekte werden berücksichtigt, aber Potenziale werden nicht differenziert ausgewiesen	Verschiedene Aspekte werden berücksichtigt, aber Potenziale werden nicht differenziert ausgewiesen
	Zeitlich	Tages- und jahreszeitliche Verfügbarkeit wird berücksichtigt, aber Potenziale werden nicht differenziert ausgewiesen	Tages- und jahreszeitliche Verfügbarkeit wird berücksichtigt, aber Potenziale werden nicht differenziert ausgewiesen	Tageszeit, Werktag und Sonntag, Jahreszeit
	Örtlich	Österreich	Deutschland	Deutschland

Tabelle 1.4: Vergleich der analysierten Studien anhand der identifizierten Problemfelder

	EANRW 2016 [16]	ETH 2007 [5]	FFE 2016 [7]	FFE 2013 [8]
	Technisch, wirtschaftlich, erschlossen	Technisch, ökonomisch, technisch-ökonomisch, realisierbar	Technisch	Technisch, wirtschaftlich/ökonomisch, realisierbar oder praktisch
	keine, da Potenzial-erhebung aus Metastudienanalyse	Stromverbrauchsdaten, technische Kennzahlen, Kosten	Stromverbrauchsdaten, technische Kennzahlen, weiche Faktoren, Kosten	Technische Kennzahlen, weiche Faktoren, Mindestersparnis/-erlös
	Unterscheidung Last-reduktion und -erhöhung Inklusiv und exklusiv Produktionsausfall	Lastreduktion Exklusiv Produktions-ausfall	Keine Unterscheidung Last-reduktion und -erhöhung Inklusiv und exklusiv Produktionsausfall	Lastreduktion Exklusiv Produktions-ausfall
	Aktuell installierte Anlagen	Aktuelle installierte Anlagen (Berechnung für spezifisches Jahr)	Aktuell installierte Anlagen, zusätzliche Ausweisung der Potenziale für 2020, 2025, 2030	Aktuell installierte Anlagen (Befragung)
	Metaanalyse auf Prozessebene	Kombination aus top-down und bottom-up für Prozess (für Bestimmung des flex. Anteils)	Bottom-up über Prozess	Top-down über Prozess und bottom-up Validierung
	Energieintensive Industrie	Branche	Prozess	Prozess
	Basis: deutschlandweites Potenzial der energieintensiven Industrie aus Metaanalyse Skalierung auf NRW über Produktionskapazitäten zzgl. Aufschlag gemäß Expertenschätzung	Durchschnittlicher Leistungsbedarf (aus Produktionsmenge, spez. Stromverbrauch und Betriebsstunden) multipliziert mit flexiblem Anteil in %	Basis: Potenzial je Standort Hochrechnung über Produktionsmengen je Standort	Basis: Anzahl der Standorte, Produktion und Stromverbrauch zur Ermittlung des maximalen Leistungsbedarfs, dann Anwendung flexibilisierbarer Anteil
	Kosten-Potenzial Kurven (für Betriebskosten)	Kosten-Potenzial Kurven (für Betriebskosten)	Kosten-Potenzial Kurven (variable Kosten, spezifische Gesamtkosten) für 1 h, 10 h, 1.000 h Abruf pro Jahr	- Abrufdauer, Betriebszustand, Vorankündigungszeiten - Abrufhäufigkeit - Eignung der Potenziale für einen Abruf im Rahmen von Redispatch, SRL
	Tageszeitliche Verfügbarkeit wird berücksichtigt, aber Potenziale werden nicht differenziert ausgewiesen	Tageszeitliche Verfügbarkeit wird berücksichtigt, aber Potenziale werden nicht differenziert ausgewiesen	Tages- und jahreszeitliche Verfügbarkeit wird berücksichtigt, aber Potenziale werden nicht differenziert ausgewiesen	Tageszeit (Schichten), Werktag und Sonntag
	Deutschland	Deutschland	Landkreise Deutschland und Bezirke Österreich	Süddeutschland

		FFE 2016 [17]	FFE 2010 [18]	IER 2015 [9]
Potenzialbegriffe		Theoretisch, technisch, wirtschaftlich, akzeptiert, realisierbar	Theoretisch, technisch, wirtschaftlich, praktisch	Wirtschaftlich realisierbar, realisiert
Erhobene Parameter		Stromverbrauchsdaten, technische Kennzahlen, Kosten	Keine Angabe	Stromverbrauchsdaten, technische Kennzahlen, weiche Faktoren, Kosten
Art der Laständerung		Unterscheidung Lastreduktion und -erhöhung Inklusive und exklusive Produktionsausfall	Lastreduktion Exklusive Produktionsausfall	Unterscheidung Lastreduktion und -erhöhung Keine Angabe zum Produktionsausfall
Betrachtungszeitraum		Aktuell installierte Anlagen (explizit)	Keine Angabe	Aktuell installierte Anlagen (Befragung)
Art und Bilanzraum der Datenerhebung		Kombination aus top-down und bottom-up für Prozess	Kombination aus top-down und bottom-up über Prozess	Bottom-up über Prozess, top-down Validierung
Bilanzraum ausgewiesener Potenziale		Branche	Branche	Branche
Berechnungsmethode		Basis: Potenzial der befragten Betriebe Hochrechnung über Leistung, Speicherkapazität oder Strombedarf	Basis: Stromverbrauch je Branche, Literaturangaben und Expertenschätzung zu flexibilisierbaren Anteilen	Basis: Potenzial der befragten Betriebe Hochrechnung mittels statistischer Verfahren (keine Angabe zu verwendeten Kennzahlen)
Differenzierung	Techno-ökonomisch	Verschiedene Aspekte werden berücksichtigt, aber Potenziale werden nicht differenziert ausgewiesen	Abrufdauer	Keine Angabe
	Zeitlich	Nein	Nein	Nein
	Örtlich	n.z.	Deutschland	Deutschland

Tabelle 1.4.2: Vergleich der analysierten Studien anhand der identifizierten Problemfelder

	TUD 2012 [12]	UBA 2015 [13]	VDE 2012 [14]	WI 2016 [15]
	Technisch	Technisch, soziotechnisch, wirtschaftlich, genutzt	Theoretisch, technisch, praktisch (theoretisches und technisches Potenzial sind identisch)	Theoretisch, technisch, technisch-ökonomisch, ökonomisch, sozio-ökonomisch, praktisch (Begriffe aus dem Englischen übersetzt)
	Technische Kennzahlen	Stromverbrauchsdaten, technische Kennzahlen, weiche Faktoren, Kosten	Keine Angabe	Unklar
	Unterscheidung Lastreduktion und -erhöhung, Inklusive Produktionsausfall	Unterscheidung Lastreduktion und -erhöhung Inklusive Produktionsausfall für technisches Potenzial, exklusive für soziotechnisches Potenzial	Unterscheidung Lastreduktion und -erhöhung Inklusive Produktionsausfall	Unterscheidung Lastreduktion und -erhöhung, Keine Angabe zum Produktionsausfall
	Aktuell installierte Anlagen (explizit)	Aktuell installierte Anlagen (explizit)	Aktuelle installierte Anlagen (Berechnung für spezifisches Jahr)	Keine Angabe
	Kombination aus top-down und bottom-up für Prozess	Bottom-up über Prozess	Kombination aus top-down und bottom-up für Prozess	Unklar
	Branche	Prozess	Branche	Branche
	Basis: Potenzial der befragten Betriebe Hochrechnung über Leistung, Speicherkapazität oder Strombedarf	Basis: Potenzial der befragten Betriebe, Hochrechnung je Branche über Produktionsmengen, Produktionskapazität oder Stromverbrauch	Basis: Potenzial der befragten Betriebe, Hochrechnung (keine Angabe zu verwendeten Kennzahlen)	Metaanalyse
	Keine Angabe	Vermarktungsoptionen	Keine Angabe	Keine Angabe
	Nein	Saisonale Verfügbarkeit wird berücksichtigt, aber Potenziale werden nicht differenziert ausgewiesen	Nein	Nein
	Deutschland	Deutschland	Deutschland	Deutschland

1.2 METHODE ZUR ERMITTLUNG TECHNISCHER, ORGANISATORISCHER UND REGULATORISCHER HEMMNISSE

1.2.1 PROBLEMSTELLUNG UND ZIEL DER METHODE

Das Projekt SynErgie hat zum Ziel, im Einklang mit rechtlichen und sozialen Aspekten, alle technischen und marktseitigen Voraussetzungen zu schaffen, um den Energiebedarf der deutschen Industrie maßgeblich mit dem volatilen Energieangebot zu synchronisieren. Das Cluster V.6 widmet sich in diesem Zusammenhang der Frage, welches Potenzial in der Nachfrageflexibilisierung von ausgewählten stromintensiven Produktionsprozessen der Grundstoffindustrie auszuweisen ist. Die Erhebung der flexiblen Last, die unter den heute gegebenen Rahmenbedingungen mit den derzeit existierenden technischen Anlagen nutzbar wäre erfordert dabei eine Berücksichtigung der Auswirkungen einer Flexibilisierung der Produktionsprozesse auf die betrieblichen Abläufe. Aus einem vertieften Verständnis dieser Einbettung der Produktionsprozesse in den betrieblichen Ablauf können dann für die Erschließung von nutzbaren Flexibilitätspotenzialen nötige Maßnahmen identifiziert werden.

Ziel der in diesem Kapitel entwickelten Methode ist es daher, Hemmnisse zu identifizieren, die einer Flexibilisierung von stromintensiven Produktionsprozessen aus organisatorischer und technischer Sicht entgegenstehen. Da diese Hemmnisse spezifisch für die Branche und den entsprechenden Produktionsprozess sind und ebenso von der Charakteristika (z.B. Abrufdauer) der Flexibilitätsmaßnahme abhängen, sollen die Hemmnisse nach Prozess und Anforderungsprofil differenziert untersucht werden. Damit einher geht eine erste Sondierung möglicher Maßnahmen zur Beseitigung einiger dieser Hemmnisse.

Die Erkenntnisse aus der durchgeführten Hemmnisanalyse sollen an Politik und Entscheidungsträger ein realistisches Bild der Möglichkeiten und Grenzen der Grundstoffindustrie vermitteln, und ein Verständnis der jeweiligen branchen- und prozessspezifischen Gegebenheiten und daraus resultierender Möglichkeiten und Einschränkungen bei der Bereitstellung von Flexibilität schaffen.

1.2.2 VORGEHEN UND DATENQUELLEN

Eine tiefgehende Analyse branchen- und prozessspezifischer Gegebenheiten, und daraus resultierender Möglichkeiten und Einschränkungen bei der Bereitstellung von Flexibilität, existiert (entsprechend unserer Recherche) bisher in der Literatur nicht. Insbesondere ist derzeit keine systematische Herangehensweise verfügbar, welche die Vielzahl der möglichen Hemmnisse methodisch einordnet und dadurch allgemein bearbeitbar macht. Einige Hemmnisse werden in existierenden Studien berücksichtigt (vgl. Tabelle 1.5). Die Hemmnisse werden jedoch entweder nur benannt und nicht weiter erläutert und eingeordnet, was die Nachvollzieh-

barkeit und Vergleichbarkeit vermindert. Oder die Hemmnisse werden nicht branchen- bzw. prozessscharf diskutiert. Die Studie von Holtrup [32] bildet aufgrund ihrer umfassenden Darstellung von betrieblichen Hemmnissen für das Beispiel der Chloralkali-Elektrolyse eine Ausnahme.

Aufgrund der begrenzten Aussagekraft der Literatur waren die wesentlichen Datenquellen für die Hemmnisanalyse daher Gespräche mit Branchenvertretern, ergänzt und unterstützt durch eigene Recherchen in branchenspezifischen Medien (z.B. Webseiten der Verbände, Branchenberichte, Analysen der Wettbewerbssituation). Um einerseits einen Vergleich der Ergebnisse der Analyse der unterschiedlichen Branchen zu ermöglichen, und andererseits die Analyse offen für vorab unbekannte spezifische Hemmnisse jeder Branche zu halten, wurde ein hypothesengeleitetes, datengetriebenes, iteratives Vorgehen gewählt. Damit wird zugleich eine systematische Methodik zur Bearbeitung der vielfältigen Hemmnisse vorgelegt. Diese ist im Projektverlauf erarbeitet und angewandt worden.

Die Hemmnisanalyse erfolgte in vier aufeinander aufbauenden Schritten:

1. Basierend auf grundlegenden Vorbedingungen für die Bereitstellung von Flexibilität durch die Grundstoffindustrie sowie einer ersten Sichtung wesentlicher technischer und organisatorischer Charakteristika der Produktionsprozesse wurde ein Analyserahmen erstellt (s. unten, Kapitel 1.2.3).
2. Entsprechend des Analyserahmens wurde das anhand von Literatur und branchenspezifischen Medien erlangte (Vor-)Wissen aufbereitet und entsprechende weiterführende Fragen identifiziert und ein branchenspezifischer Fragenkatalog erstellt.
3. Im nächsten Schritt wurden semi-strukturierte Interviews mit Verbänden und Unternehmensvertretern durchgeführt. Die Leitfragen für die Interviews wurden dabei entlang des Analyserahmens formuliert und basierend auf den im vorherigen Arbeitsschritt gewonnenen Erkenntnissen auf die jeweilige Branche und den jeweiligen Prozess angepasst. Für jede Branche wurden separat einzeln oder mehrere Gespräche geführt. Die Interviews wurden entlang der Leitfragen in Interviewprotokollen zusammengefasst, und diese Protokolle im Nachgang mit den entsprechenden Interview-Teilnehmer/innen abgestimmt.
4. Darauf aufbauend wurde im letzten Schritt die Analyse und Synthese der Daten (Interviewprotokolle, Literatur) und Ausarbeitungen von Hemmnissen und Möglichkeiten – differenziert nach Prozess und Anforderungsprofil – vorgenommen.

Der Analyserahmen wurde dabei entsprechend der gewonnenen Erkenntnisse in einem iterativen Prozess erstellt und erweitert, und in die in Kapitel 1.2.3 dargestellte Form gebracht. Er ermöglichte, die Situation in den unterschiedlichen Branchen strukturiert abzubilden, so dass die in ihm identifizierten Hemmnisebenen und -dimensionen prinzipiell als relevant für die gesamte Grundstoffindustrie erachtet werden.

Studie	Branche	Identifizierte Hemmnisse
Klobasa 2007 [5]	Grundstoffindustrie (allgemein)	Informationsdefizite und Unsicherheiten bzgl. Akzeptanz und zukünftigen Erlösmöglichkeiten; Zeitverfügbarkeit relevanter Akteure für Umsetzung eines Lastmanagements; Auslastung.
	Chlor-Alkali-Elektrolyse	Hohe Auslastung; Qualitätseinbußen bei der Natronlauge.
Von Roon und Gobmaier 2010 [18]	Grundstoffindustrie (allgemein)	Beeinflussung nachfolgender Prozesse; Schichtpläne und Besetzung von Produktionsstationen.
Apel et al. 2012 [14]	Elektrostahl (EAF)	Sobald Masse in flüssigem Zustand ist kann Herstellung nicht mehr unterbrochen werden.
	Zement	Speicherreichweiten der Zementsilos; Qualitätsverluste beim Hoch-/Runterfahren der Mühlen; Witterungsbedingter Produktionsrückgang im Winter ohne typischen Lastverlauf; Aufgrund von Produktionszeiten der Zementmühlen Beschränkung des Potenzials für positives Lastmanagement auf Werktage (tagsüber) und für negatives auf Werktage (nachts) sowie Wochenenden.
	Chlor-Alkali-Elektrolyse	Notwendige Synchronisation mit anderen Stoffströmen und Prozessen beim (Wieder-)Hochfahren der CAE.
Klobasa et al. 2013 [8]	Grundstoffindustrie (allgemein)	Technisches Risiko einer Produktionsstörung; Mögliche Beeinträchtigung der Produktqualität; Störung der Arbeitsabläufe; Zusätzlicher Arbeitsaufwand; Mangelnde Qualifikation der Mitarbeiter; Technische Möglichkeiten nicht bekannt; Datensicherheit.
	Elektrostahl (EAF)	Wärmeverluste bei Abschalten des EAF während des Betriebs bzw. durch Auskühlen bei längerem Stillstand.
	Zement	Begrenzte Größe der Silos für Rohmehl; Auskühlen der Rohmühlen führt nach 1–2h zu Effizienzverlusten.

Tabelle 1.5: In der Literatur benannte Hemmnisse

Studie	Branche	Identifizierte Hemmnisse
Langrock et al. 2015 [13]	Grundstoffindustrie (allgemein)	Unkenntnis von Rückwirkungen einer Lasterhöhungen bzw. Lastreduktionen auf die Qualität der Produkte; Organisatorischer Aufwand im Vergleich zu Erlösmöglichkeiten zu hoch (Bspw. Verhandlung eines Service-Level-Agreements zur Abwicklung von Lasterhöhungen und Lastreduktionen zwischen der Abteilung Energiemanagement und der Produktionsabteilung); Verfügbarkeit von Personal sowie Arbeitszeitregelungen; Design der Regelleistungsmärkte (u.a. Voraussetzen der Fernsteuerbarkeit durch Dritte, zu lange Ausschreibungszeiträume und Vorhaltungsdauern); Durch Lasterhöhung höhere abrechnungsrelevante Bezugsspitze nach §19 NEV; Durch Lastreduktion Nicht-Erreichen der für eine Netzentgeltreduktion nach § 19 StromNEV nötigen Vollaststunden.
	Elektrostahl (EAF)	Kontinuierliche Beschickung der nachgeschalteten Stranggussanlage.
	Zement	Größe der Zementsilos; Kopplung der Rohmühlen mit Betrieb des Drehrohrofens über Abwärmenutzung zur Trocknung des Rohmaterials beim Mahlvorgang; Qualitätsschwankungen bei An-/Abfahren der Zementmühlen.
	Chlor-Alkali-Elektrolyse	Größe des Chlorspeichers; Aktivierungsgeschwindigkeit der Lastveränderung hat Auswirkungen auf die Qualität des Chlors und insbesondere der Natronlauge; Hohe Auslastung der Anlagen und dadurch limitierte Möglichkeiten Produktion im Zuge einer Lastverschiebung nachzuholen.
	Behälterglas	Größe des Scherbenlagers; Zukauf von Zwischen- oder Endprodukt in gewünschter Qualität nicht möglich.
Holtrup 2015[32]	Chlor-Alkali-Elektrolyse	Gleichzeitige Produktion verschiedener Produkte (Chlor, Wasserstoff, Natronlauge); Hohe Auslastung der Anlagen und dadurch limitierte Möglichkeiten Produktion im Zuge einer Lastverschiebung nachzuholen; Auswirkungen einer volatilen Fahrweise auf die Anlagenlebensdauer; Auswirkungen einer volatilen Fahrweise auf die Produktqualität der Natronlauge; Durch Lasterhöhung höhere abrechnungsrelevante Bezugsspitze nach §19 NEV; Strenge Auflagen für den Zubau von Chlorspeichern.
Kollmann et al. 2015* [33]	Chlor-Alkali-Elektrolyse	Planmäßig hohe Auslastung – Minderproduktion führt zu Verletzung von Lieferverpflichtungen.
	Zement	Mahlkapazität und Speichervolumina; Füllstände der Silos; Verschiebung der Arbeitszeit zum Wochenende und damit verbundene höhere Personalkosten (Zuschläge); Abstimmung der Kapazitäten der Rohmühlen auf Drehrohrofen; Mehrstündiger Betrieb der Zementmühlen erforderlich für Produktqualität; Schwankungen in der Nachfrage und zeitweise hohe Auslastung; Insbesondere bei kleinen Betrieben kleine Lager und „just in time“-Produktion.

* Bezieht sich auf Österreich

Die durchgeführten Interviews gaben Einblicke in unternehmensspezifische Prozesse und daraus resultierende Hemmnisse und Möglichkeiten. Im Zuge der Gespräche wurde jedoch immer wieder deutlich, dass diese nicht in jedem Fall auf die gesamte Branche verallgemeinert werden können – es mag andere Unternehmen geben, für die sich die spezielle Situation anders darstellt und für die andere Hemmnisse bestehen und sich andere Potenziale zeigen. Der Einbezug der Verbandsvertreter als aktive Projektpartner, welche die Interviews begleiteten, ermöglichte eine qualifizierte Einordnung der Verallgemeinerbarkeit der Interviewergebnisse.

1.2.3 ABLEITUNG DES ANALYSERAHMENS

Aus der oben aufgeführten Literatur sowie ersten Gesprächen mit Verbandsvertretern ließen sich zunächst einige grundlegende Vorbedingungen für die Bereitstellung von Flexibilität durch die Grundstoffindustrie ableiten (siehe auch Diskussion zur Definition der Potenziale in Kapitel 1.1.1.3):

- Die technische Anlage darf keinen Schaden nehmen.
- Die Kundenzufriedenheit muss gewährleistet bleiben. Entsprechend darf die Produktqualität nicht leiden, und Lieferfristen müssen eingehalten werden.
- Die Produktionsmenge wird (nur) durch die Nachfrage bestimmt. Demzufolge kommt als einzige Form der Laständerung eine Lastverschiebung in Betracht.⁴
- Die (regelmäßige) Durchführung von Flexibilitätsmaßnahmen muss in (angepasste) innerbetriebliche Abläufe integriert werden können.
- Bestehende regulatorische Rahmenbedingungen müssen berücksichtigt werden.
- Es muss für das Unternehmen wirtschaftlich sein.

⁴ Eine Ausnahme existiert für den Fall der Möglichkeit eines Zukaufs oder Verkaufs von (Zwischen-) Produkten zur Kompensation eigener Lastreduktion oder -steigerung.

Aus diesen Vorbedingungen ergab sich über mehrere iterative Schritte eine Differenzierung möglicher Hemmnisse auf drei verschiedenen zeitlich-organisatorischen Ebenen und deren regulatorischen Rahmenbedingungen, die nachfolgend näher erläutert werden (vgl. Abbildung 1.6).



Abbildung 1.6: Zeitlich-organisatorische Hemmnis-Ebenen

1. MARKTUMFELD UND KUNDENBEZIEHUNGEN

Ob Lieferfristen eingehalten und damit die Kundenbeziehungen gepflegt werden können, hängt neben betriebsinternen Auswirkungen einer Flexibilisierung (s.u.) von den existierenden „Spielräumen“ des Unternehmens am Markt ab. Diese Spielräume werden von einer Vielzahl von Faktoren bestimmt: die Konjunktur bestimmt die Auslastung der technischen Anlage und damit (verbleibende) zeitliche Spielräume und Kapazitäten für eine Lastverschiebung. Die Produktvielfalt bzw. die Herstellung von spezifisch auf die jeweiligen Kundenwünsche zugeschnittenen Produkten beeinflusst die Möglichkeiten für Vorproduktion und Lagerung. Die Ausgestaltung von Lieferverträgen und die darin vereinbarten Lieferfristen definieren den Planungshorizont und zeitlichen Spielraum bei der Abarbeitung von Aufträgen. Die Möglichkeit, ein (Zwischen-)Produkt zuzukaufen, bestimmt, ob eigener Lastverzicht durch Zukauf bzw. Lasterhöhung durch Verkauf kompensiert werden könnte.

2. INNERBETRIEBLICHE ORGANISATION

Der zeitliche Versatz von Produktion im Zuge einer Lastverschiebung erfordert eine Anpassung innerbetrieblicher Abläufe, da ggf. Arbeitskräfte zu anderen Zeiten benötigt werden und Arbeitsabläufe zwischen vor-/nachgelagerten Produktionsschritten (um-)organisiert werden müssen. Um Flexibilität im Alltagsbetrieb regelmäßig anbieten zu können, darf der Ablauf zur Durchführung einer Flexibilitätsmaßnahme nicht durch Einzelfallbetrachtungen und Einzelentscheidungen organisiert werden. Stattdessen müssen innerbetriebliche Ablaufprotokolle und Entscheidungsbefugnisse definiert oder geändert und getestet werden. Dies betrifft die Auftragsplanung, die Schichtplanung sowie geplante Reparaturen. Um regelmäßig Flexibilitätsmaßnahmen zu ermöglichen, können Zukäufe sowie – bei hybride zu betreibenden Prozessen – die Verwendung alternativer Energieträger, wie z.B. Brenngas, mitgedacht und geplant werden. Allerdings liegt der Fokus im Rahmen des vorliegenden Projektberichts auf dem Bezug und der Verwendung von Strom; eine weitergehende Analyse zum Einsatz alternativer Energieträger erfolgt an dieser Stelle nicht. Die Auswirkungen eines flexibilisierten Betriebs auf Personalfragen (Schichtführungen, Betriebsvereinbarungen etc.) wird in einem angrenzenden Arbeitspaket innerhalb des Cluster V bearbeitet und daher an dieser Stelle nicht vertieft analysiert, aufgrund der Relevanz für das praktische Potenzial jedoch mit berücksichtigt.

3. TECHNISCHE ANLAGE

Die technischen Eigenschaften der relevanten Prozesse selbst können das Flexibilitätspotenzial reduzieren. So führt beispielsweise ein (längerer) Stillstand des Schmelzofens in der Behälterglasherstellung zu Schäden an der Anlage. Zudem kann eine flexible Fahrweise die Produktqualität beeinträchtigen. Auch beim Betrieb eines Elektrolichtbogenofens kann es durch zu langes Vorhalten der Schmelze zu Verunreinigung des geschmolzenen Stahls durch sich ablösendes feuerfestes Material kommen. Die anlagenrelevanten Restriktionen der relevanten Prozesse wurden nach Abschnitt 1.2.2, mittels der vier aufeinanderfolgenden Schritte ermittelt. Entsprechend wurde zu jedem betrachteten Prozess ein spezifischer Fragenkatalog erstellt und mit den Verbänden und Unternehmensexperten Punkt für Punkt abgearbeitet.

Dies ermöglichte eine detaillierte technische Hemmnisbeschreibung, in welcher die zentralen technischen Einschränkungen identifiziert und

beschrieben werden konnten. Zu diesen zählen in erster Linie chemische Umwandlungsprozesse (die Einstellung des Sulfatträgers in der Zementindustrie), sowie physikalische Eigenschaften und Prozessbedingungen (wie die Temperatur, der Aufbau stabiler Strömungsprofile oder das Erreichen der erforderlichen Verweilzeiten sowie des Energieeintrags), die in den relevanten Prozessen exakt vorliegen beziehungsweise eingehalten werden müssen, um die Produktionsqualität aufrecht zu erhalten.

Da es sich bei drei der fünf betrachteten Prozesse um Hochtemperaturanwendungen handelt, ist der Spielraum für eine Variation des Wärmeeintrages auf Grund der hohen thermischen Materialbelastungen, des einzuhaltenden Aggregatzustandes, oder auf Grund ungewollter chemischer Reaktionen stark beschränkt. In diesen Fällen wurden die chemischen, physikalischen und materialtechnischen Restriktionen beschrieben, welche bei Missachtung zur Reduktion der Lebensdauer oder Zerstörung des Aggregates führen.

Neben den technischen Eigenschaften der relevanten Prozesse selbst, ist außerdem die Einbettung in die Produktionskette zu berücksichtigen. Eine Flexibilisierung relevanter Prozesse kann durch Auswirkungen auf vor-/nachgelagerte Prozessschritte indirekt die Produktqualität beeinträchtigen, Verzögerungen im Betriebsablauf bedingen, eine mögliche Gefährdung anderer Anlagenteile, oder Betrachtungen der Wirtschaftlichkeit erfordern. Mögliche Faktoren, die die Wirtschaftlichkeit beeinflussen, sind beispielsweise die erforderlichen Kosten für zusätzliche Speicher oder erhöhte Energieverbräuche aufgrund von sinkenden (Teillast-) Wirkungsgraden oder aufgrund steigender Wärmeverluste. Des Weiteren sind mögliche Auswirkungen auf vernetzte bzw. gekoppelte Produktionsprozesse zu beachten. Dies umfasst mögliche Auswirkungen auf das Stoffstrom- und Wärmemanagement der teilweise hochintegrierten Produktionsprozesse.

4. REGULATORISCHE RAHMENBEDINGUNGEN

Auf allen zeitlich-organisatorischen Ebenen sind spezifische regulatorische Rahmenbedingungen zu berücksichtigen. Die spezifischen Regularien für Flexibilitätsangebote (z.B. Produkte am Strommarkt, Präqualifizierungsbedingungen für Regelenergie) sind in stetigem Wandel. Der Fokus der Analysen in Cluster V.6 liegt zudem auf den Potenzialen für die in Kapitel 1.4 definierten Anforderungsprofile. In diesen Anforderungsprofilen wird von den (aktuellen) regulatorischen Rahmenbedingungen für Flexibilität abstrahiert, um auch eine mittel- bis längerfristige Betrachtung zu ermöglichen. Daher werden die flexibilitätsspezifischen aktuellen regulatorischen Rahmenbedingungen auch in der Hemmnisanalyse zunächst nicht als Hemmnisse für die Erfüllung der Anforderungsprofile betrachtet.⁵ Andere regulatorische Rahmenbedingungen (z.B. Effizienzrichtlinien, Arbeitszeitgesetze, Tarifverträge, Auflagen für Speicher usw.) spielen jedoch für das praktische Potenzial zum Teil eine erhebliche Rolle und werden daher auf allen betrachteten Ebenen berücksichtigt.

⁵ Sie werden jedoch im Rahmen der Diskussion der Diskrepanz zwischen identifizierten praktischen Potenzialen und momentanem Stand der Umsetzung thematisiert (s. Kapitel 8.3)

Die Wirtschaftlichkeit unterliegt vielfältigen Einflussfaktoren, und kann insbesondere durch Änderungen der flexibilitätsspezifischen regulatorischen Rahmenbedingungen stark beeinflusst werden. Die Wirtschaftlichkeit wird daher in der Hemmnisanalyse nicht näher betrachtet. Eine wirtschaftliche Analyse wird stattdessen gesondert durchgeführt (vgl. Kapitel 1.3, Kapitel 7.4 und Kapitel 7.5).

1.3 METHODIK ZUR WIRTSCHAFTLICHEN ANALYSE

Die wirtschaftliche Analyse erörtert begleitend zu und aufbauend auf den Ergebnissen der technischen und praktischen Hemmnisanalyse das ökonomische Potential ausgewählter Prozesse zur Flexibilitätsbereitstellung. Die wesentliche verwendete Methodik in der wirtschaftlichen Analyse ist einerseits die Einbringung ökonomischer Parameter in die Durchführung der Interviews, sowie die Erstellung numerischer Entscheidungsmodelle zur Strombeschaffung und Bereitstellung von Flexibilität und die Nutzung der Modelle zur Analyse von Flexibilitätspotentialen.

1.3.1 INTERVIEWS

Es wurden ökonomische Fragestellungen in die Interview-Führung eingebracht, u.a. zu den Themengebieten Kosten (Anteil der Stromkosten, Anteil der fixen und variablen Kosten, Anteil an Arbeitskosten), Strommarktteilnahme (Day-Ahead-Markt, Intraday-Markt, Regelenergiemärkte, Markt für Abschaltbare Lasten), sowie Anreize, die sich durch die Netzentgeltstrukturierung ergeben.

1.3.2 METHODIK ZUR MODELLIERUNG VON UNTERNEHMENS- ENTSCHEIDUNGEN UNTER BERÜCKSICHTIGUNG REGULATORISCHER, ÖKONOMISCHER, TECHNISCHER UND PRAKTISCHER RAHMENBEDINGUNGEN

Prinzipiell ist das bedeutendste Ziel unternehmerischer Tätigkeit die Gewinnmaximierung, welche sich aus der Differenz von Erlösen und Kosten ergibt. Auf der Erlösseite steht der Verkauf des Hauptproduktes der Firma, auf der Kostenseite fixe Kosten (für Anlagen, Maschinen etc.) und variable Kosten (z.B. Strombeschaffungskosten, Arbeitskosten etc.). Für die Diskussion wird hier Flexibilisierung als Minderung der variablen Strombeschaffungskosten durch flexiblere Nachfrage definiert⁶. Prinzipiell ist eine flexible Strombeschaffung für Prozesse nur dann möglich, wenn die Produktionsanlagen einen Auslastungsgrad von unter 100 % vorweisen (d.h., dass die Anlagen nicht 100 % der Zeit laufen) und wenn ein Speicher für das Produkt zur Verfügung steht. Dies kann einerseits der Fall sein, da 1) ohnehin leichte Überkapazitäten und Speicher vorhanden sind, sei es aus konjunkturellen Gründen, Erwartung auf steigende Nachfrage oder saisonalen Nachfrageunterschieden. Andererseits kann es für Unternehmen aber auch ökonomisch sinnvoll sein 2) in Überkapazitäten und Speicher zu investieren, und so die variablen Kosten zu senken, oder auch 3) die Verkaufsmenge zu reduzieren, um Stunden der Produktion zu vermeiden, in welchen der Deckungsbeitrag negativ ist.

⁶ Eine Flexibilisierung der Stromnachfrage kann je nach Interpretation und Anwendungsprofil als eine Minderung der Strombeschaffungskosten oder als zusätzliche Erlösquelle durch Einnahmen auf Flexibilitätsmärkten (oder Wiederverkauf langfristig erworbener Grundlast) kategorisiert werden. Hier interpretieren wir Erlöse aus Flexibilitätsmärkten als Minderung der Gesamtstrombeschaffungskosten.

Allen 3 Formen der Flexibilisierung können technische, praktische und wirtschaftliche Faktoren entgegenstehen (z.B. existierende Lieferbedingungen), welche in den folgenden Kapiteln prozessabhängig erörtert werden.

Da die aktuelle Phase des Projektes auf Flexibilitätspotentiale (nicht Perspektiven mit Investitionen oder Anpassung langfristiger Lieferverpflichtungen) fokussiert war und die Verkaufsmenge und Produktionskapazitäten als gegeben angenommen werden, konzentriert sich die Analyse auf die Entwicklung eines Entscheidungsmodells aus Unternehmenssicht, welches die Minimierung der Strombeschaffungskosten unter Berücksichtigung technischer und praktischer Hemmnisse, sowie unter Einbeziehung regulatorischer Rahmenbedingungen zum Ziel hat.

Dies geschieht unter Einsatz von Optimierungsmodellen (lineare Optimierung, gemischt-ganzzahlige Optimierung), welche durch eine Zielfunktion (hier die Strombeschaffungskosten) und Nebenbedingungen (technische und praktische Hemmnisse, welche in der Lösung berücksichtigt sein müssen) charakterisiert sind. Dieses Modelle werden dann numerisch gelöst (GAMS 24.3.3 / CPLEX). Ähnliche Ansätze (ohne Modellierung verschiedener Elektrizitätsmärkte und regulatorischer Gegebenheiten) wurden in der Literatur bereits zur optimalen Planung verschiedener industrieller Prozesse anhand von Elektrizitätspreisen oder der Produktion von erneuerbaren Energien eingesetzt (z.B. in [39, 40]).

Das methodische Vorgehen zur Modellerstellung ist in Abbildung 1.7 abgebildet, und basiert auf einer Prototyperstellung auf Basis der Interviews, welches durch Industrie und Verbände anhand von Modellbeschreibung und ersten Ergebnissen kritisch geprüft und in dem darauffolgenden Schritt durch den Modellierer angepasst wird.



Abbildung 1.7 Methodisches Vorgehen der wirtschaftlichen Entscheidungsmodellerstellung und Analyse

Das entwickelte Modell wird dann eingesetzt um spezifische Aspekte, welche sich in Interviews und vorhergehenden Analysen als besonders relevant für die Flexibilitätsbereitstellung erwiesen haben zu analysieren. Dazu gehören u.a.:

- Der Einfluss von Auslastungsgrad auf Flexibilitätsbereitstellung und Strombeschaffungskosten
- Die Häufigkeit und Dauer von Flexibilitätsbereitstellungen
- Der Trade-off zwischen der Teilnahme an Strommarktreserven oder am Energiehandel und der Einfluss von Netzengeltstrukturen auf die Flexibilitätsbereitstellung
- Quantifizierung von technischen und praktischen Hemmnissen auf Flexibilitätsbereitstellung, wie begrenzte Voraussicht und Schichtbegrenzungen

1.4 CHARAKTERISTISCHE ENERGIEWIRTSCHAFTLICHE SITUATIONEN FÜR DIE BEREITSTELLUNG VON FLEXIBILITÄT

Das Potenzial zur Bereitstellung von Flexibilität kann für Unternehmen je nach Vorankündigungszeit und Abrufdauer variieren. In ähnlicher Weise hat auch das Energiesystem unterschiedliche Nachfragetypen an Flexibilitätsdienstleistungen. Dazu werden drei typische Situationen charakterisiert, welche sich primär hinsichtlich Vorankündigungszeit und Abrufdauer unterscheiden. Darauf aufbauend wird untersucht welchen Beitrag die untersuchten Prozesse der Grundstoffindustrie jeweils leisten können.

1. KURZFRISTIGE ANPASSUNG DER LAST

Im aktuellen Strommarktdesign kaufen die Netzbetreiber Systemdienstleistungen von Erzeugung und Nachfrage, um damit kurzfristige Schwankungen auszugleichen. Dabei wird zunächst ein fester Betrag (Leistungspreis) für die Bereitstellung (entsprechend dem Auktionsergebnis) gezahlt. Bei einem tatsächlichen Abruf der Flexibilität wird eine weitere Zahlung (Arbeitspreis) getätigt.

Für Anbieter von Flexibilität bedeutet das, dass sie

- (I) langfristig die Fähigkeiten für die Bereitstellung von Flexibilität entwickeln und präqualifizieren müssen. Bei einer Weiterentwicklung des Strommarktes sind dabei keine Einschränkungen durch Produktdesign zu erwarten (min MW, Rampe).
- (II) am Vortag entscheiden, ob diese Fähigkeit angeboten wird (Anpassungen unter Preisrisiken im Intraday-Bereich möglich) um
- (III) auf kurzfristige Signale des Netzbetreibers reagieren und innerhalb von Minuten bei Abruf der Flexibilität die Nachfrage für einen Zeitraum von 15 Minuten entsprechend anpassen.

2. ANPASSUNG DER LAST ÜBER MEHRERE STUNDEN

Vor der umfassenden Nutzung von PV standen hohe Preise im Tagesverlauf deutlich geringeren Preisen zur Nacht gegenüber und entsprechend wurden zum Beispiel elektrisch betriebene Wärmespeicher nachts aufgeheizt. Mit der Verbreitung von PV wird sich dieses Preisprofil häufig invertieren und zu deutlich geringeren Preisen während der Tages- und höheren Preisen während der Nachtstunden führen. Ein weiterer entscheidender Faktor für das Preisprofil ist die Windproduktion. Da sowohl Wind- als auch Solarproduktion am Vortag großräumig prognostiziert werden können, könnten die Reduktion von Nachfrage spätestens am Vortag, gegebenenfalls jedoch auch längerfristig, eingeplant werden. Hiermit könnten entweder Erzeugungsspitzen (deswegen drei Stunden als Ausgangspunkt) oder ein dunkler Tag/windstille Nacht/eine Produktionsschicht abgedeckt werden (entweder über mehrere Akteure sequentiell, oder einen Akteur der bis zu 12 Stunden abdecken kann).

3. REDUKTION DER LAST ÜBER MEHRERE TAGE

Der Energiebedarf in nördlichen Ländern ist heizungsbedingt im Winter am größten. Während die Solareinstrahlung im Winter fällt, steigt im Durchschnitt die Windproduktion. Eine Wetterlage, mit mehreren aufeinanderfolgenden windstillen und bewölkten Wintertagen könnte ein wichtiges Szenario für die Auslegung des Energiesystems darstellen. Diese Wetterlagen könnten entweder durch die sequentielle Reduktion mehrerer Flexibilitätsanbieter, die für jeweils einen Tag reduzieren, oder durch einzelne Akteure, die ihre Last für bis zu fünf Tagen reduzieren, abgedeckt werden. Da die Wetterlage sich nicht erst kurzfristig realisiert, wäre davon auszugehen, dass mit mindestens zwei bis fünf Tagen Vorlaufzeit über den Strommarkt Signale für die Nutzung der Flexibilitätsoption in den nächsten 1–5 Tagen gegeben werden (höhere Preise, die dann Anreize für die Reduktion der Nachfrage geben). Mit der Änderung der Witterungslage kann dann in den folgenden Wochen die reduzierte Produktion ausgeglichen werden und zum Beispiel die für die Flexibilisierung geschaffenen Zwischenlager wieder aufgefüllt werden.

Wie erwähnt, tritt das Phänomen dieses Anforderungsprofils in den Wintermonaten auf. Ziel ist es dann, den Verbrauch während dieser Tage weitestgehend zu reduzieren, um die ungünstige Witterungslage zu überbrücken. Ist die Last einzelner Verbraucher während dieser Zeit im Rahmen der ursprünglichen Produktionsplanung – beispielsweise aufgrund eines Wartungsintervalls – vergleichsweise niedrig, so ist keine Anpassung des Verbrauchs notwendig. Entscheidend ist bei diesem Anforderungsprofil der lange Zeithorizont im Gegensatz zur vergleichsweise kurzfristigen Bereitstellung von Flexibilität in den Anforderungsprofilen 1 und 2.

RELEVANZ DER ANFORDERUNGSPROFILE IN DEN STÜTZJAHREN DER ÜBERGEORDNETEN SYNERGIE-ANALYSE

Abbildung 1.8 zeigt die Relevanz der Anforderungsprofile in den Stützjahren 2020, 2030 und 2040.

Abbildung 1.8: Relevanz der Anforderungsprofile in den Stützjahren der übergeordneten SynErgie-Analyse

	2020	2030	2040
1 <ul style="list-style-type: none"> ▪ Kurzzeitige Anpassung ▪ Geringe Vorankündigungszeit 	✓	✓	✓
2 <ul style="list-style-type: none"> ▪ Verschiebung über 3 – 12 Std. ▪ 1 Tag Vorankündigungszeit 	(✓)	✓	✓
3 <ul style="list-style-type: none"> ▪ Lastreduktion über 1 – 5 Tage ▪ 2 – 5 Tage Vorankündigungszeit 	✗	(✓)	✓

Anforderungsprofil 1 entspricht den Charakteristika der Minutenreserve (neben anderen kurzfristigen Märkten und Reserven) und in ähnlicher Form der Teilnahme am Intraday-Handel und ist daher bereits heute relevant. Auch Primär- und Sekundärregelleistung lassen sich dem Anforderungsprofil 1 zuordnen, wobei sich diese durch deutlich kürzere Vorankündigungszeiten von respektive 30 Sekunden und 5 Minuten auszeichnen. Zukünftig wird die Notwendigkeit für kurzfristige Lasterhöhungen und -reduktionen weiter steigen. Als Beispiel stellt Abbildung 1.9 den Abrufgrad positiver und negativer Minutenreserveleistung (MRL) dar. Der Abrufgrad ist dabei definiert als der Quotient aus der mittleren abgerufenen Leistung und der mittleren bezuschlagten Leistung, ist also hier unabhängig von den Arbeitspreisen einzelner Angebote [17].

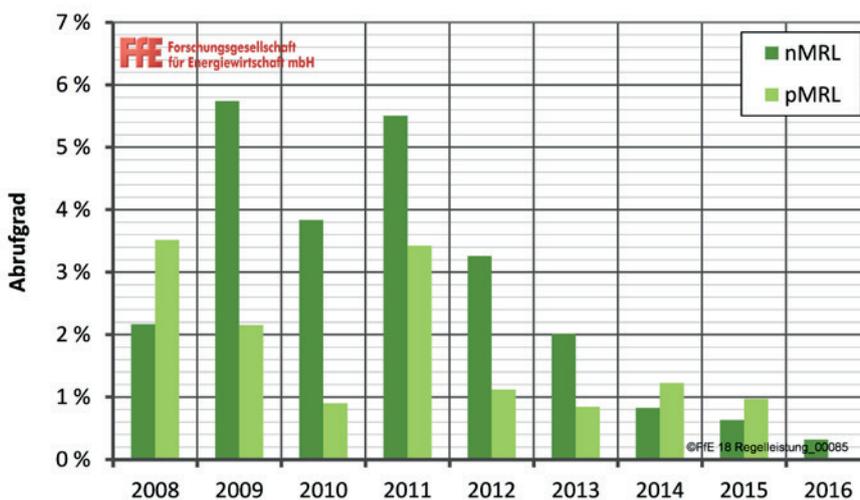


Abbildung 1.9: Mittlerer jährlicher Abrufgrad Minutenreserveleistung (eigene Darstellung, Daten von [34])

Bei Betrachtung der jährlichen Mittelwerte der Abrufgrade verzeichnen insbesondere die Werte der negativen MRL seit 2011 einen starken Rückgang. Die Abrufgrade positiver MRL zeigen keinen eindeutigen Trend.

Auch Situationen, die dem Anforderungsprofil 2 entsprechen, treten bereits heute auf. Beispielsweise kam es am 08.05.2016 aufgrund der hohen EE-Einspeisung zu negativen Strompreisen während der Mittagsstunden (siehe Abbildung 1.16). Durch Verschieben der Produktion in diese Stunden könnten die Strombezugskosten bei einem entsprechenden Stromliefervertrag reduziert werden. Auch sehr hohe Strompreise traten in der Vergangenheit durchaus auf. Abbildung 1.10 stellt als Referenz die Anzahl von Stunden mit Preisen größer als einem gegebenen Day-Ahead Preis in verschiedenen vergangenen Jahren dar. Wie ersichtlich wird unterscheidet sich der Wert von Flexibilität am vortätigen Handel im Verlaufe der Jahre extrem. Im Jahr 2006 trat zum Beispiel ein Spitzenpreis von 2.437 Euro/MWh auf, und im Jahr 2007 traten 52 Stunden im Jahr Preise von höher als 188 Euro/MWh auf. Die aktuelle Differenz zwischen Grund- und Spitzenlastpreisen ist dagegen historisch niedrig. Derartige Situation sind und waren alles in allem eher selten, werden jedoch mit zukünftig steigendem Anteil volatiler Einspeisung an Bedeutung gewinnen.

Anforderungsprofil 3, auch als „Dunkelflaute“ bekannt, da in Zukunft durch gleichzeitig geringe Wind- und Solareinspeisung definiert, spielt zum jetzigen Zeitpunkt eine untergeordnete Rolle. Es treten zwar bereits

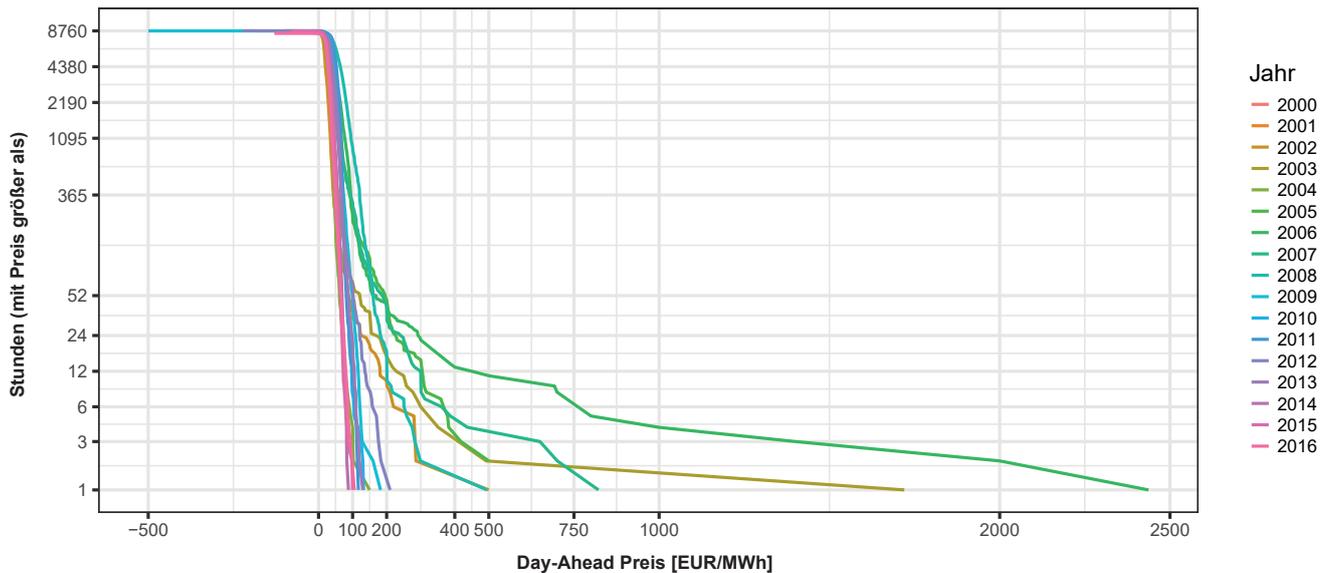


Abbildung 1.10: Häufigkeit von Stunden in denen der Day-Ahead Preis größer ist als auf der X-Achse angegebene Wert

Zeiten mit hohen Strompreisen (siehe Abbildung 1.18) auf, allerdings ist die geringe EE-Einspeisung nicht die einzige Ursache hierfür. Beispielsweise kam es im Januar 2017 zusätzlich zu Kraftwerksausfällen in Frankreich.

Zukünftig wird dieses Anforderungsprofil jedoch von größerer Relevanz sein, denn das Energiekonzept der Bundesregierung sieht vor, die Stromversorgung bis 2050 überwiegend auf erneuerbare Energieträger umzustellen. Dies bedeutet, dass das zukünftige Energiesystem eine zunehmende Menge fluktuierender Erzeugung integrieren muss. Es existiert eine Vielzahl an Szenarien für die mögliche Ausgestaltung eines solchen, nachhaltigen Energiesystems. Kontrovers diskutiert wird insbesondere auch wie die Bereitstellung von Flexibilität, die zum Ausgleich der fluktuierenden Leistungsbereitstellung durch Wind und PV und der schwankenden Nachfrage gebraucht wird, erfolgen soll. Neben flexibel einsetzbaren Erzeugungsanlagen (z.B. Gaskraftwerke) werden Speicher sowie das Lastmanagement und auch der Netzausbau eine Rolle spielen. Die jeweils längsten Zeiträume von Schwachwindphasen bei gleichzeitiger Bewölkung oder Dunkelheit sind mitentscheidend für die Struktur des zukünftigen Energiesystems.

Ein erster Anhaltspunkt für das Maß an Flexibilität, welches in einem zukünftigen Energiesystem mit hohen Anteilen fluktuierender Erzeuger gebraucht wird, ist der Verlauf der Residuallast. Bei der Residuallast handelt es sich um die Differenz zwischen nachgefragter Leistung und der Einspeisung aus fluktuierenden Erzeugern. Eine positive Residuallast spiegelt entsprechend den, vor Einsatz der Flexibilitäten, verbleibenden Strombedarf dar. Illustrativ sind im Folgenden für drei, jeweils ein zukünftiges Energiesystem beschreibende Szenarien⁷ die Verläufe der positiven Residuallast ausgewertet worden. Diese basieren auf einem identischen Wetterjahr und einer identischen angenommenen räumlichen Verteilung der Erzeugung aus fluktuierenden Erneuerbaren. Vor dem Hintergrund der Frage, inwieweit zur Bewältigung von Dunkelflauten Lastreduktionen mehrerer Tage in zukünftigen Energiesystemen relevant werden können, sind nur Zeiträume von mehr als 24 h berücksichtigt worden. Abbildung 1.11 zeigt das Vorkommen von Zeiträumen positiver Residuallast verschiedener Länge Dauern. Es wird deutlich, dass in allen drei Szenarien jeweils insgesamt zwischen 30 und 40 solcher

⁷ Szenarien mit sehr hohen Anteilen erneuerbarer Energien an der Stromerzeugung mit unterschiedlichen Anteilen an PV und Wind on- und offshore. Es handelt sich um die Szenarien „Regionenverbund“ aus [35] „Szenario 2.1.a“ aus [36] und das „Referenzszenario“ aus [37]. Als Teil eines umfangreichen Vergleichs wurden die hier genutzten Residuallasten in (acatech/Leopoldina/Akademienunion (Hrsg.) 2015 [22]) aufbereitet. Weitere Informationen zum Vorgehen der Residuallastberechnung finden sich in zuletzt genannter Studie ab Seite 21.

Ereignisse pro Jahr gezählt werden können. Die jeweils längsten Zeiträume positiver Residuallast erstrecken sich in den betrachteten Szenarien je über 11 bis 15 Tage. Länger als einwöchig andauernde Zustände positiver Residuallast treten insgesamt je 2–3 Mal pro Jahr auf, 5–7 tägige Ereignisse jeweils 1 bis 4 mal und 3–4 tägige jeweils zwischen 13 und 14 mal.

Zum Ausgleich der Residuallast stehen zukünftig (je nach Dauer, Amplitude und Rampen der Schwankungen) verschiedene Flexibilisierungsoptionen zur Verfügung. Die vorangegangene Analyse kann keinen Aufschluss darüber geben, welche der vielfältigen Flexibilitätskonzepte zukünftig zu welchem Anteil zum Ausgleich der (mehrtägigen) Schwankungen genutzt werden. Sie zeigt jedoch den Bedarf an Flexibilität bei hoher Abhängigkeit der Erzeugung von den Energieträgern Wind und Sonne auf. Des Weiteren wird deutlich, dass dieser Bedarf bei den verschiedenen Ausbauszenarien in derselben Größenordnung liegt. Dies ist ein Indiz dafür, dass die exakten Anteile von Photovoltaik- und Windanlagen an der Erzeugungsstruktur für die Relevanz von Dunkelflauten nicht ausschlaggebend ist.

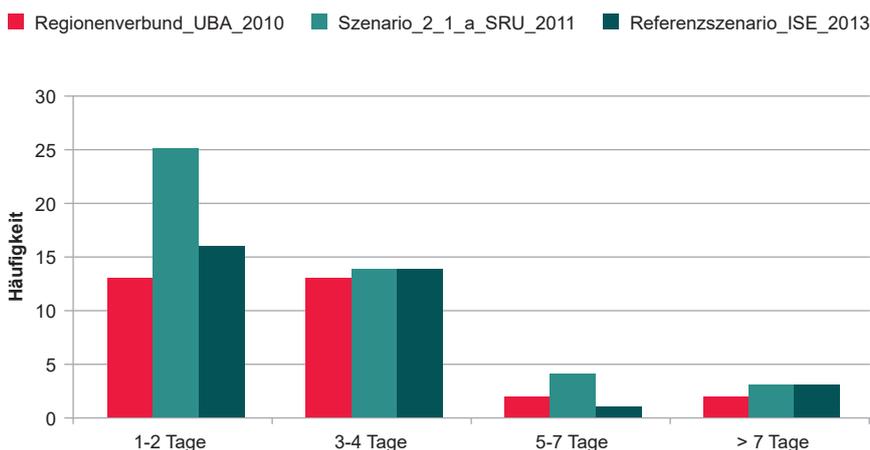


Abbildung 1.11: Ereignisse zusammenhängender Stunden positiver Residuallast für drei illustrative Szenarien mit sehr hohen Anteilen erneuerbarer Energien

Die Modellrechnungen, die den mithilfe von Szenarien dargestellten möglichen Zukünften zugrunde liegen, sind unter anderem stark von den verwendeten Wetterdaten und der angenommenen räumlichen Verteilung der Erzeuger abhängig. Aus diesem Grund sind im Folgenden ergänzend zur obigen Analyse verschiedener Ausbauszenarien die variierenden Einspeiseleistungen aus Wind- und PV für einen denkbaren Ausbaustand in 2050 für verschiedene Wetterjahre betrachtet und einer „Dunkelflautenanalyse“ unterzogen worden. Für die hier detektierten Dunkelflauten ist als Definition die Unterschreitung der mittleren Leistung der Einspeisung aus Wind und Sonne während einer Flaute unter den Schwellwert von a) 20 %, b) 30 % und c) 40 %⁸ der mittleren 10-Jahresleistung der Einspeisung aus Wind und Sonne zugrunde gelegt. Auf diese Weise können Monate als auch Jahre untereinander verglichen werden. Genutzt werden Wetterdaten aus 10 Jahren (2003–2012) und eine entsprechend Szenario B der Studie „Tangible ways towards climate protection in the European Union“ [38]⁹ verteilte installierte Kapazität an PV- und Winderzeugungskapazitäten für das Jahr 2050. Bei den detektierten Flauten werden (wie auch in Abbildung 1.11) Zeiträumen von 1–2 Tagen, 3–4 Tagen, 5–7 Tagen und mehr als 7 Tagen unterschieden.

⁸ Die Auswahl der Schwellwerte erfolgt unter der Annahme, dass die Einspeisung in einem System stattfindet, das zu sehr hohen Anteilen auf fluktuierenden Erzeugern beruht. Entsprechend können mehrtägige Einspeiseleistungen, die im Mittel unter 20 %, 30 % bzw. 40 % der mittleren 10-Jahresleistung liegen, relevant für die Systemgestaltung sein.

⁹ Demnach ist die installierte Leistung der fluktuierenden Erneuerbaren Erzeuger in 2050 wie folgt: Wind onshore: 54,4GW, Wind offshore: 50,2GW, PV: 69GW. Im ersten Fortschrittsbericht des Forschungsvorhabens wird die räumliche Verteilung wie folgt beschrieben: „In Abhängigkeit von den mittleren meteorologischen Ressourcen (Strahlung auf geneigte Fläche bzw. Windgeschwindigkeit in 100 m Höhe) modelliert und lehnt sich dabei an den Ausbaustand in Deutschland Ende 2012 an.“ (http://forschung-energiespeicher.info/fileadmin/user_upload/projektassets/RESTORE_2050/Fortschrittsbericht.pdf)

In dem gesetzten Rahmen zeigt sich (vgl. Abbildung 1.12), dass die Dunkelflautehäufigkeit erwartungsgemäß einer starken Saisonalität unterliegt. In den Herbst und Wintermonaten treten diese deutlich häufiger und außerdem mit deutlich längeren Dauern auf, insbesondere im November, Dezember und Januar. Im Vergleich der Abbildungen 1.12a, 1.12b und 1.12c zeigt sich zudem, dass die Bestimmung der Häufigkeit von Dunkelflauten zunächst einer Festlegung bedarf, welches Maß an Mindereinspeisung aus fluktuierenden Erneuerbaren zugrunde gelegt wird. Schwächere Dunkelflauten (40 %-Kriterium, Abbildung 1.12c) treten sehr viel häufiger auf als stärkere (20 %-Kriterium, Abbildung 1.12a). Je nach Position einer Flexibilitätsoption in der Merit-Order der Flexibilitätsoptionen wird die zu erwartende Häufigkeit von Dunkelflauten demnach unterschiedlich zu bewerten sein. Während für die Bewältigung der schwächeren Dunkelflauten ggf. zunächst (nur) auf vergleichsweise günstige Flexibilitätsoptionen zurückgegriffen wird, werden für die Bewältigung stärkerer Dunkelflauten ggf. auch teurere Optionen herangezogen werden müssen.

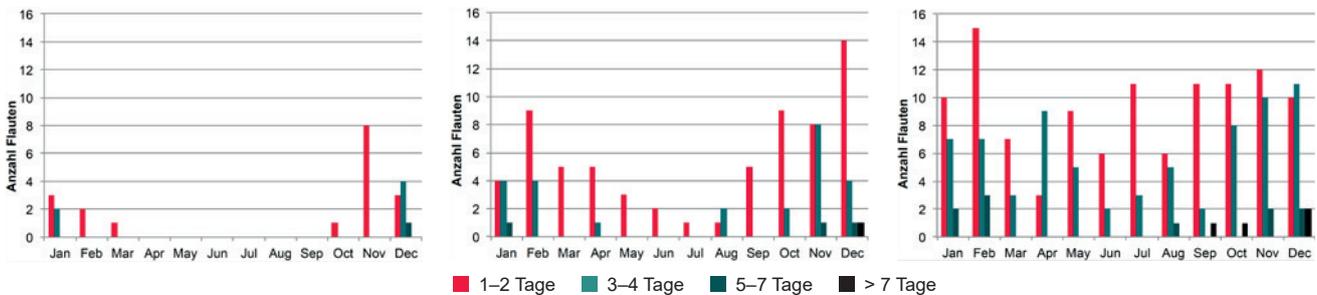


Abbildung 1.12: Anzahl monatlicher Flauten unterschiedlicher Länge aggregiert über 10 Jahre (2003 bis 2012), definiert entsprechend der Unterschreitung der mittleren Leistung der Einspeisung aus Wind und Sonne während einer Dunkelflaute von a) 20 % (links), b) 30 % (Mitte) und c) 40 % (rechts) unter die mittlere 10-Jahresleistung

WERT DER FLEXIBILITÄT

Der Wert von Flexibilität entsprechend dieser Anforderungsprofile hängt von vielen Faktoren ab, insbesondere (I) dem Anteil von Wind und Solarenergie im Gesamtsystem, (II) dem Grad der Umsetzung der Sektorkopplung einschließlich verstärkter Nutzung von Strom als Energieträger und (III) den alternativen Flexibilitätsoptionen einschließlich dem Netzausbau im System. Deswegen kann aus den heutigen Marktpreisen nur in sehr beschränktem Maße auf den Wert von Flexibilität entsprechend der Anforderungsprofile für die späteren 2020 Jahre geschlossen werden. Wir untersuchen stattdessen aus der Perspektive der einzelnen Flexibilitätsoptionen welche finanziellen Anreize notwendig wären, um die wirtschaftliche Realisierung zu ermöglichen.

PRODUKTDESIGN

Für die Bereitstellung von Systemdienstleistungen (kurzfristige Nachfrageanpassungen) existieren Produktspezifikationen die sowohl durch die Anforderungen des Systems als auch der traditionellen Bereitsteller der Systemdienstleistungen (konventionelle Kraftwerke) geprägt sind. Diese Spezifikationen ändern sich aktuell im Kontext der fortschreitenden Integration und damit auch Weiterentwicklung der europäischen Strommärkte und werden sich auch mit neuen Technologien weiterentwickeln. Für die längerfristige Flexibilität ist davon auszugehen, dass im Strommarkt abgesicherte Stromeinkäufe (Terminmarkt) vorgenommen werden und Unternehmen dann den bereits „gekauften“ Strom an das System zurück verkaufen und damit den Wert der Flexibilität vergütet bekommen. Gegebenenfalls können sich auch noch längerfristige

Produkte entwickeln. Eventuell könnten auch noch zusätzliche Anreizsysteme für die Bereitstellung von Flexibilität vorgesehen werden.

STECKBRIEFE UND BEISPIELHAFTE AUSWERTUNGEN ZU DEN DREI ANFORDERUNGSPROFILIEN

Um die Befragung der Unternehmen zu erleichtern, wird für jedes der drei Anforderungsprofile je ein Steckbrief erstellt. Dieser beinhaltet Informationen zum energiewirtschaftlichen Hintergrund sowie zur heutigen und zukünftigen Bedeutung des Profils. Ferner werden die Vorankündigungszeit und Abrufdauer genannt. Zur Veranschaulichung enthalten die Steckbriefe weitere Ausführungen zu einem möglichen Business Case durch das Angebot von Flexibilität unter den Rahmenbedingungen des entsprechenden Anforderungsprofils sowie ein anschauliches Beispiel auf Basis konkreter Daten. Zusätzlich wird je Anforderungsprofil eine beispielhafte Auswertung erstellt, welche die Relevanz des Profils untermauert. Die Steckbriefe und Auswertungen sind im Folgenden abgebildet.

Abbildung 1.13: Steckbrief zu Profil 1: „Kurzfristige Anpassung der Last“

Rahmenbedingungen	<p>Energiewirtschaftlicher Hintergrund</p> <ul style="list-style-type: none"> - Ausgleich kurzfristiger Schwankungen von Erzeugung und Nachfrage durch den Kauf von Systemdienstleistungen durch den Netzbetreiber - Auszahlung eines festen Betrages für die Leistungsbereitstellung entsprechend Auktion (Leistungspreis) und zusätzliche Zahlung bei Abruf der Leistung (Arbeitspreis) 	<p>Bedeutung heute</p> <ul style="list-style-type: none"> - Es existieren vier Produkte: Primärregelleistung, Sekundärregelleistung und Minutenreserve sowie die „Verordnung zu abschaltbaren Lasten“ (AbLaV) <p>Bedeutung in Zukunft</p> <ul style="list-style-type: none"> - Zunehmende Unsicherheit über die Stromerzeugung wird voraussichtlich die Bedeutung von Systemdienstleistungen erhöhen 	
Technische Daten	<p>Vorankündigungszeit</p> <p>Maximale Dauer zwischen Abruf durch den Netzbetreiber und Erbringung durch Flexibilitätsanbieter</p> <p>Bei einigen Produkten existieren auch kürzere Vorankündigungszeiten von weniger als 30 Sekunden</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center; font-size: 1.2em; margin-top: 10px;">15 Minuten</div>		<p>Abrufdauer</p> <p>Dauer der Anpassung der Nachfrage</p> <p>Über einen Aggregator ist die Teilnahme auch bei kürzeren Erbringungszeiten möglich</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center; font-size: 1.2em; margin-top: 10px;">15 Minuten</div>
Business Case	<p>Möglicher Business Case zum Anforderungsprofil 1</p> <ul style="list-style-type: none"> - Anbieten von zu- oder abschaltbarer Leistung am Regelleistungsmarkt - Für den Zeitraum, für den die Leistungserbringung garantiert werden kann, wird ein Leistungspreis erwirtschaftet. Im Falle eines Abrufs der Leistung wird zusätzlich der Arbeitspreis realisiert. - Der Anbieter entscheidet selbst über die Höhe von Leistungs- und Arbeitspreis. Die Höhe des Leistungspreises entscheidet, ob ein Zuschlag erteilt wird. Die Höhe des Arbeitspreises entscheidet über die Häufigkeit des Abrufs. Im Falle eines hohen Arbeitspreises ist nur selten mit einem Abruf zu rechnen. 	<p>Beispiel</p> <p>Für den Folgetag wird positive Minutenreserve für den Zeitraum von 12.00 bis 16.00 Uhr vermarktet. Um 12.30 Uhr bekommen Sie das Signal, Ihre angebotene Leistung zu aktivieren. Von 12.45 bis 13.00 Uhr müssen Sie Ihre Leistung um den angebotenen Wert reduzieren. Sie bekommen für die 4 Stunden einen Leistungspreis vergütet und darüber hinaus für die 15 Minuten Aktivierung einen Arbeitspreis.</p>	

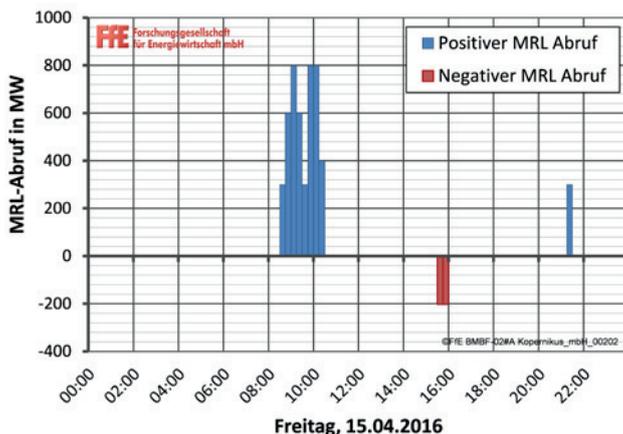


Abbildung 1.14: Auswertung zu Profil 1: Abruf von Minutenreserve am 15.04.2016

Abbildung 1.13 und Abbildung 1.14 zeigen Steckbrief und Auswertung zu Anforderungsprofil 1. Dieses Anforderungsprofil entspricht in etwa der Minutenreserve (neben anderen kurzfristigen Märkten und Reserven) und ist daher auch bereits heute relevant. Abbildung 1.14 zeigt einen exemplarischen Abruf von positiver und negativer Minutenreserve am 15.04.2016.

Steckbrief und Auswertung zu Anforderungsprofil 2 sind in Abbildung 1.15 und in Abbildung 1.16 dargestellt. Auch dieses Profil ist bereits heute relevant, wird jedoch durch die steigenden Anteile volatiler Erneuerbarer künftig weiter an Bedeutung gewinnen. Wie Abbildung 1.16 zu entnehmen, kam es am 08.05.2016 aufgrund hoher Einspeisung aus Erneuerbaren Energien und vergleichsweise geringer Last während der Mittagsstunden zu negativen Strompreisen.

Abbildung 1.15: Steckbrief zu Profil 2:
„Anpassung der Last über mehrere Stunden“

Rahmenbedingungen	Energiewirtschaftlicher Hintergrund	Bedeutung heute	
	<ul style="list-style-type: none"> - Der Strompreis schwankt abhängig von Stromerzeugung und -verbrauch. Daher variiert der Strompreis in Abhängigkeit der Tageszeit. - Mit dem weiteren Ausbau von Photovoltaik und Windkraft können erhebliche Preisunterschiede im Tagesverlauf auftreten. Es ist somit gewinnbringend, den industriellen Verbrauch an den Strompreis anzupassen. 	<ul style="list-style-type: none"> - Aufgrund des höheren Verbrauchs stehen hohe Preise im Tagesverlauf geringeren Preisen zur Nacht gegenüber. 	
Technische Daten	Vorankündigungszeit		Abrufdauer
	<p>Strompreise werden am Mittags des Vortages bekannt gegeben. Anschließend kann die Produktion für die Stunden 0 bis 24 Uhr an diese Strompreise angepasst werden. Dies entspricht somit einer Vorankündigungszeit von 12 bis 36 Stunden.</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center; width: fit-content; margin: 0 auto;">1 Tag</div>		<p>Um signifikante Preisunterschiede nutzen zu können, muss der zeitliche Unterschied zwischen Lasterhöhung und -reduktion mindestens 3 Stunden (kürzere Erzeugungsspitzen) und maximal 12 Stunden (Tag/Nacht Ausgleich) sein</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center; width: fit-content; margin: 0 auto;">3-12 Stunden</div>
Business Case	Möglicher Business Case zum Anforderungsprofil 2		Beispiel
	<ul style="list-style-type: none"> - Negative Strompreise und große untertägige Preis-Spreads bieten die Möglichkeit die Kosten für den Strombezug zu reduzieren. 		<p>Um 12 Uhr wird bekannt gegeben, dass zwischen 10 und 14 Uhr des Folgetages negative Strompreise auftreten. Für den Zeitraum 18 bis 22 Uhr ergeben sich hohe Strompreise. Sie können durch eine Lastverlagerung von den Abendstunden in die Mittagsstunden die Strombezugskosten deutlich reduzieren.</p>

Abbildung 1.16: Auswertung zu Profil 2:
Negative Strompreise während der Mittagsstunden aufgrund hoher EE-Einspeisung und vergleichsweise geringer Last

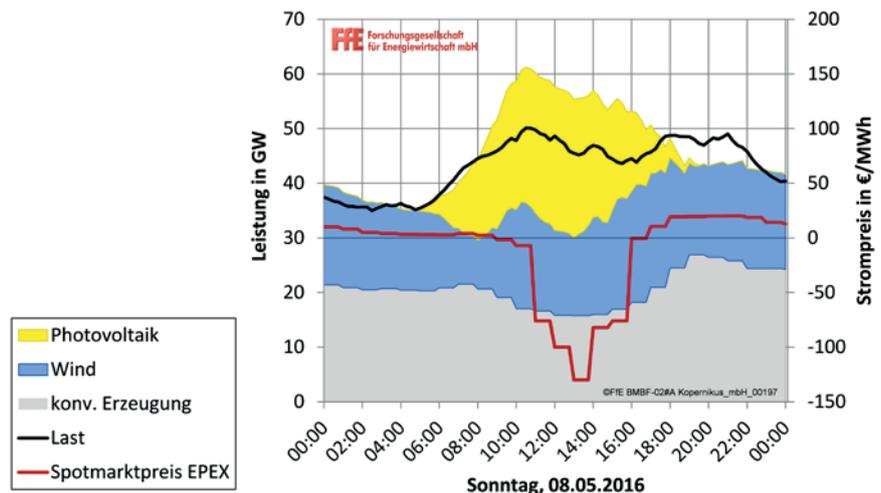


Abbildung 1.17, Abbildung 1.18 und Abbildung 1.19 fassen wichtige Informationen und Auswertungen zu Anforderungsprofil 3 zusammen. Die Dunkelflaute wird erst zukünftig an Bedeutung gewinnen, sobald deutlich höhere Anteile erneuerbarer Erzeugung erreicht werden. 2017 kam es während der vierten Januarwoche zu extrem hohen Strompreisen. Ursache hierfür war die typischerweise hohe Last während der Wintermonate bei gleichzeitig auftretender niedriger Einspeisung aus Wind und Photovoltaik. Zu berücksichtigen ist allerdings, dass es während dieser Zeit auch zu Kraftwerksausfällen in Frankreich kam, wodurch die Situation zusätzlich verschärft wurde. Abbildung 1.19 zeigt zusätzlich, dass es sich bei der Dunkelflaute um ein seltenes Phänomen handelt. Die beschriebene Situation ergab sich im Verlauf eines Jahres – von April 2016 bis März 2017 – lediglich einmal.

Abbildung 1.17: Steckbrief zu Profil 3: „Reduktion der Last über mehrere Tage“

Rahmenbedingungen	Energiewirtschaftlicher Hintergrund - Im Winter können durch die schwächere Sonneneinstrahlung und mehrere aufeinanderfolgende windstille und bewölkte Tage sehr ungünstige Situationen für Erneuerbare Energie auftreten (Dunkelflaute). - Zur Anpassung an länger andauernde, ungünstige Wetterbedingungen eignet sich eine Lastreduktion über mehrere Tage.	Bedeutung heute - Aufgrund des noch hohen Anteils von konventionellen Kraftwerken im Stromsektor ist eine längerfristige Reduktion über mehrere Tage noch nicht relevant. Bedeutung in Zukunft - Die Bedeutung von Flexibilisierungen über längere Zeiträume wird aufgrund des ansteigenden Anteils der Erneuerbaren Energien in Zukunft zunehmen.	
	Vorankündigungszeit Auf Basis von Wetterprognosen ist die Dunkelflaute bereits 2 bis 5 Tage im Voraus prognostizierbar <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block;">2-5 Tage</div>		Abrufdauer Jede Art von Lastreduktion ohne Nachholbedarf innerhalb dieser 5 Tage liefert einen positiven Beitrag zur Versorgungssicherheit <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block;">1-5 Tage</div>
Technische Daten	Möglicher Business Case zum Anforderungsprofil 3 - Im Falle einer Dunkelflaute werden Strompreise in der Größenordnung von > 10.000 €/MWh erwartet. - Eine Lastreduktion in diesem Zeitraum kann durch den Wiederverkauf des bereits kontrahierten Strombezugs zu erheblichen Erlösen führen.		Beispiel Am Donnerstag wird für den Zeitraum der nächsten Woche eine Dunkelflaute prognostiziert. Es ergeben sich hierdurch Strompreise von 10.000 €/MWh. Sie können durch Lastreduktion und Wiederverkauf des kontrahierten Strombezugs in diesem Zeitraum deutliche Erlöse generieren.
	Business Case		

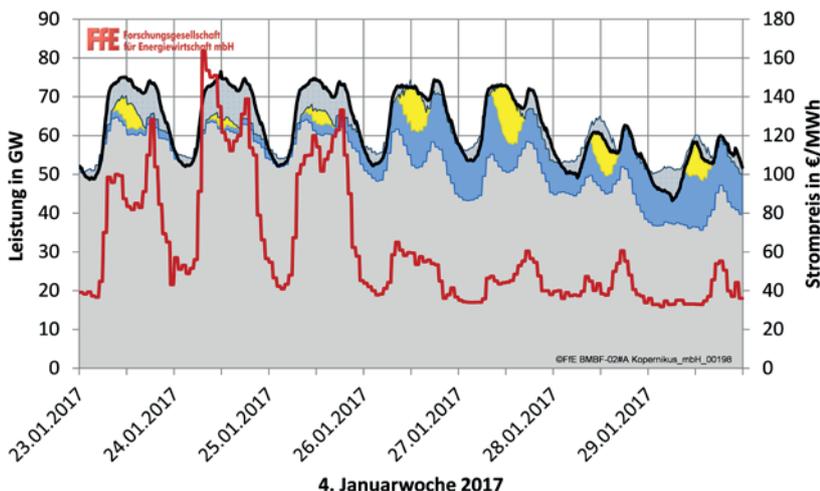


Abbildung 1.18: Auswertung zu Profil 3: Hohe Strompreise im Januar 2017 aufgrund geringer EE-Erzeugung und hohem Verbrauch

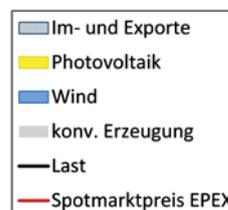
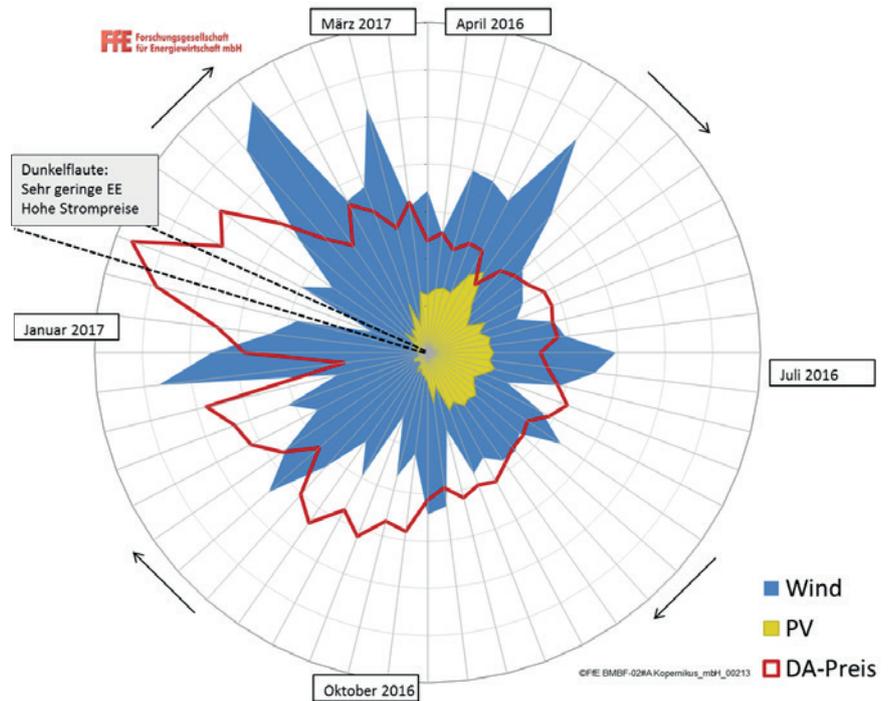


Abbildung 1.19: Auswertung zu Profil 3:
Die „Dunkelflaute“ als seltenes Phänomen



1.5 LITERATURVERZEICHNIS

- [1] C. Dufter, A. Guminski, C. Orthofer, S. von Roon, A. Gruber, Lastflexibilisierung in der Industrie-Metastudienanalyse zur Identifikation relevanter Aspekte bei der Potenzialermittlung, Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH, IEWT 2017, Wien 2017.
- [2] Deutsche Energie-Agentur (dena): dena-Netzstudie II – Integration erneuerbarer Energien in die deutsche Stromversorgung im Zeitraum 2015–2020 mit Ausblick 2025, Berlin 2010.
- [3] T. Buber, A. Gruber, S. von Roon, M. Klobasa, Lastmanagement für Systemdienstleistungen und zur Reduktion der Spitzenlast in: Vierteljahreshefte zur Wirtschaftsforschung 3.2013 – Energiewende in Deutschland – Chancen und Herausforderungen, DIW Berlin, Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung e.V., Berlin 2013.
- [4] Y. Scholz, H. C. Gils, T. Pregger, D. Heide, F. Cebulla, K. K. Cao, D. Hess, F. Borggreffe, Möglichkeiten und Grenzen des Lastausgleichs durch Energiespeicher, verschiebbare Lasten und stromgeführte KWK bei hohem Anteil fluktuierender erneuerbarer Stromerzeugung, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Stuttgart 2014.
- [5] M. Klobasa, Dynamische Simulation eines Lastmanagements und Integration von Windenergie in ein Elektrizitätsnetz auf Landesebene unter regelungstechnischen und Kostengesichtspunkten, Dissertation, Eidgenössisch Technische Hochschule Zürich (ETH), Zürich 2007.

- [6] M. Paulus, F. Borggreffe, The potential of demand-side management in energy-intensive industries for electricity markets in Germany in: Applied Energy, Institute of Energy Economics (EWI), Köln 2010.
- [7] C. Pelling, T. Schmid, et al., Merit Order der Energiespeicherung im Jahr 2030 – Teilbericht: Technoökonomische Analyse Funktionaler Energiespeicher, Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V. (FfE), München 2016.
- [8] Buber, Tim; Gruber, Anna; von Roon, Serafin; Hüneke, Marie; Klobasa, Marian; Angerer, Gerhard; Schleich, Joachim; Friedrichsen, Nele; Lüllmann, Arne: Lastmanagement als Beitrag zur Deckung des Spitzenlastbedarfs in Süddeutschland, Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH, Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI), 2013.
- [9] M. Steurer, N. Klempp, K. Hufendiek, B. Baumgart, B. Steinhausen, Identifikation und Realisierung wirtschaftlicher Potenziale für Demand Side Integration in der Industrie in Deutschland, Trianel GmbH, Aachen 2015.
- [10] Leitstudie Strommarkt – Arbeitspaket Funktionsfähigkeit EOM & Impact-Analyse Kapazitätsmechanismen, r2b energy consulting GmbH, Köln 2014.
- [11] V. Orioli, Potentials of Industrial Demand Side Management. Siemens AG, Dresden 2016.
- [12] A. von Scheven, T. Hartkopf, M. Prella, Lastmanagementpotenziale der stromintensiven Industrie zur Maximierung des Anteils regenerativer Energien im bezogenen Strommix, Technische Universität Darmstadt – Fachgebiet Elektrische Energieversorgung unter Einsatz erneuerbarer Energien (TUD), Darmstadt 2012.
- [13] T. Langrock, S. Achner, C. Jungbluth, C. Marambio, A. Michels, P. Weinhard, B. Baumgart, A. Otto, Potentiale regelbarer Lasten in einem Energieversorgungssystem mit wachsendem Anteil erneuerbarer Energien, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau 2015.
- [14] R. Apel et al., Ein notwendiger Baustein der Energiewende: Demand Side Integration, Energietechnische Gesellschaft im VDE (ETG), Frankfurt am Main 2012.
- [15] K. Arnold, T. Janßen, L. Echternacht, S. Höller, T. Voss, K. Perrey – Co-vestro, FlexInd – Flexibilisation of industries enables sustainable energy systems. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt und Energie, Wuppertal 2016.
- [16] T. Langrock, S. Brühl, A. Michels, Lastmanagement in Nordrhein-Westfalen: Potenziale, Hemmnisse, Handlungsoptionen. EnergieAgentur NRW, Düsseldorf 2016.
- [17] A. Gruber, S. Von Roon, S. Fattler, Wissenschaftliche Projektbegleitung des Projektes DSM Bayern, Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH, München 2016.

- [18] S. von Roon, T. Gobmaier, Demand Response in der Industrie – Status und Potenziale in Deutschland, Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V. (FfE), München 2010.
- [19] H. Berger, T. Eisenhut, S. Polak, R. Hinterberger, Demand Response Potential of the Austrian industrial and commerce sector – Österreichische Begleitforschung zu Smart Grids in: Berichte aus Energie- und Umweltforschung 65/2011, Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (BMVIT), Wien 2011.
- [20] Gabler Wirtschaftslexikon – Stichwort: Opportunitätskosten, Springer Gabler, Wiesbaden 2016.
- [21] T. Buber, T. Gobmaier, S. von Roon, L. Kreuder, Energiewende im Strommarkt – Chancen nutzen – Risiken vermeiden, : IHK für München und Oberbayern, München 2012.
- [22] P. Elsner, B. Erlach, M. Fishedick, Flexibilitätskonzepte für die Stromversorgung 2050 – Technologien – Szenarien – Systemzusammenhänge, acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, München 2015.
- [23] C. Nabe, Flex-Efficiency – Ein Konzept zur Integration von Effizienz und Flexibilität bei industriellen Verbrauchern, Agora Energiewende, Berlin 2016.
- [24] N. Krzikalla, S. Achner, S. Brühl, Möglichkeiten zum Ausgleich fluktuierender Einspeisungen aus Erneuerbaren Energien – Studie im Auftrag des Bundesverbandes Erneuerbare Energie, BET Büro für Energiewirtschaft und technische Planung GmbH, Aachen 2011.
- [25] Gruber, Anna; Biedermann, Franziska; von Roon, Serafin: Regionale Lastmanagement-Potenziale stromintensiver Prozesse in: Paper und Vortrag beim 13. Symposium Energieinnovation in Graz. Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH, München 2014.
- [26] Frontier Economics: Strommarkt in Deutschland – Gewährleistet das derzeitige Marktdesign Versorgungssicherheit? Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), Köln 2014.
- [27] M. Steurer, U. Fahl, T. Eberl, A. Voß, Identifikation und Bewertung des intelligenten Lastmanagementpotenzials in der Industrie in Baden-Württemberg, EnBW Vertrieb GmbH Stuttgart, Stuttgart 2013.
- [28] D. Atabay, Energiespeichersysteme im Fabrikbetrieb, Seminar Energie und Produktion, Augsburg 2015.
- [29] B. Wille-Haussmann, T. Erge, M. Klobasa, Integration von Windenergie in ein zukünftiges Energiesystem unterstützt durch Lastmanagement, Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI), Karlsruhe 2009.

- [30] U. Focken, M. Klobasa, Kurz- bis Mittelfristig realisierbare Marktpotenziale für die Anwendung von Demand Response im gewerblichen Sektor, Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI), Karlsruhe 2011.
- [31] M. A. Graßl, Bewertung der Energieflexibilität in der Produktion, München: Dissertation, Technische Universität München, München 2014.
- [32] F. Holtrup, Potenzial für Demand Side Management der energieintensiven Industrie in Deutschland - Eine Kostenbetrachtung am Beispiel der Chlor-Alkali-Elektrolysen. Weltenergieat – Deutschland e.V., Berlin 2015.
- [33] A. Kollmann, K. de Bruyn, S. Moser, LoadShift: Lastverschiebung in Haushalt, Industrie, Gewerbe und kommunaler Infrastruktur – Potenzialanalyse für Smart Grids. Berichte aus Energie- und Umweltforschung 7e/2015. Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Wien 2015 www.nachhaltigwirtschaften.at/de
- [34] Übertragungsnetzbetreiber (ÜNB): Ausschreibungsplattform Regelleistung (Daten verschiedener Jahre) in: <https://www.regelleistung.net/>. Hamburg: Vattenfall Europe Information Services, 2016.
- [35] T. Klaus, C. Vollmer, K. Werner, H. Lehmann, Energieziel 2050: 100 % Strom aus erneuerbaren Quellen, Umweltbundesamt 2010.
- [36] M. Faulstich, H. Foth, C. Calliess, O. Hhmeyer Wege zur 100 % erneuerbaren Stromversorgung, Sondergutachten des Sachverständigenrats für Umweltfragen, Berlin 2011.
- [37] H. M. Henning, A. Palzer, Energiesystem Deutschland 2050 – Sektor- und Energieträgerübergreifende, modellbasierte, ganzheitliche Untersuchung zur langfristigen Reduktion energiebedingter CO₂ Emissionen durch Energieeffizienz und den Einsatz Erneuerbarer Energien, Fraunhofer ISE, Freiburg 2013.
- [38] B. Pfluger, F. Sensfuß, G. Schubert, J. Leisentritt, Tangible ways towards climate protection in the European Union (EU Long-term scenarios 2050), Fraunhofer Institute for Systems and Innovation Research (ISI), Karlsruhe 2011.
- [39] S. Mitra, I. E. Grossmann, J.M. Pinto, N. Arora, Optimal production planning under time-sensitive electricity prices for continuous power-intensive processes, In Computers & Chemical Engineering, Volume 38, 2012, Pages 171-184, ISSN 0098-1354
- [40] X. Wang, H. Teichgraeber, A. Palazoglu, N.H. El-Farra, An economic receding horizon optimization approach for energy management in the chlor-alkali process with hybrid renewable energy generation, In Journal of Process Control, Volume 24, Issue 8, 2014, Pages 1318-1327, ISSN 0959-1524



KAPITEL 2

FLEXIBILITÄTSPOTENZIALE UND -PERSPEKTIVEN DES ELEKTROLICHTBOGENOFENS

Roland Pietruck, Holger Rosemann,
VDEh-Betriebsforschungsinstitut (BFI), Düsseldorf

Marten Sprecher,
Stahlinstitut VDEh, Düsseldorf

Karin Arnold, Georg Holtz,
Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH, Wuppertal

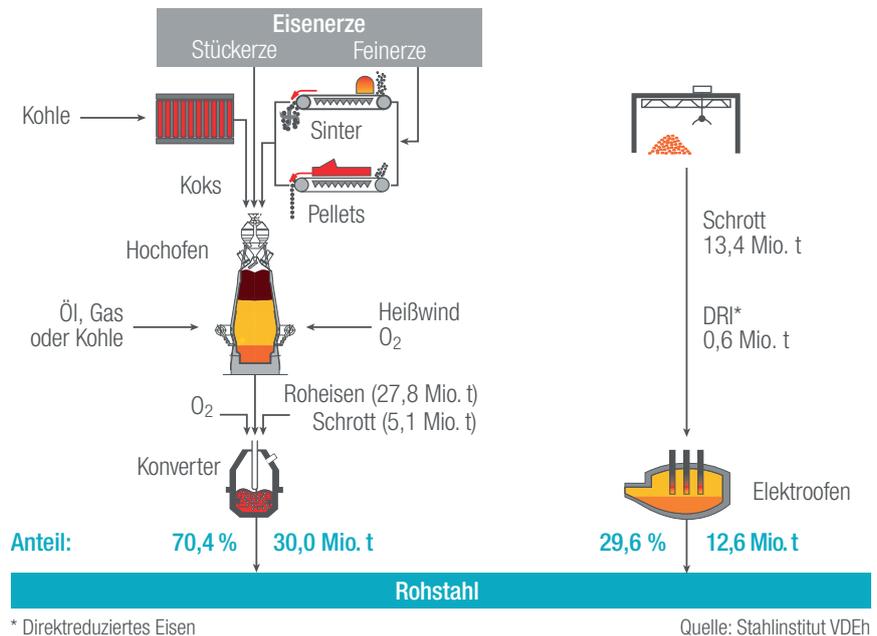
Ralph-Uwe Dietrich, Stefan Estelmann,
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Stuttgart

2.1 BEDEUTUNG DES ELEKTROLICHTBOGENOFENS IN DER STAHLINDUSTRIE

Stahl wird vorwiegend über zwei Prozessrouten erzeugt (s. Abbildung 2.1): die Hochofen-/Konverterroute, mit der in Deutschland rd. zwei Drittel des Rohstahls erzeugt wird, und die Elektroofenroute, die zu rd. einem Drittel der Rohstahlproduktion beiträgt. Die Hochofen-/Konverterroute basiert auf Verwendung von Eisenerzen als Rohstoff sowie Koks als Reduktionsmittel. Demgegenüber wird bei der Elektroofenroute überwiegend Stahlschrott zur Stahlherstellung verwendet und in Elektrolichtbogenöfen zu Rohstahl verarbeitet.

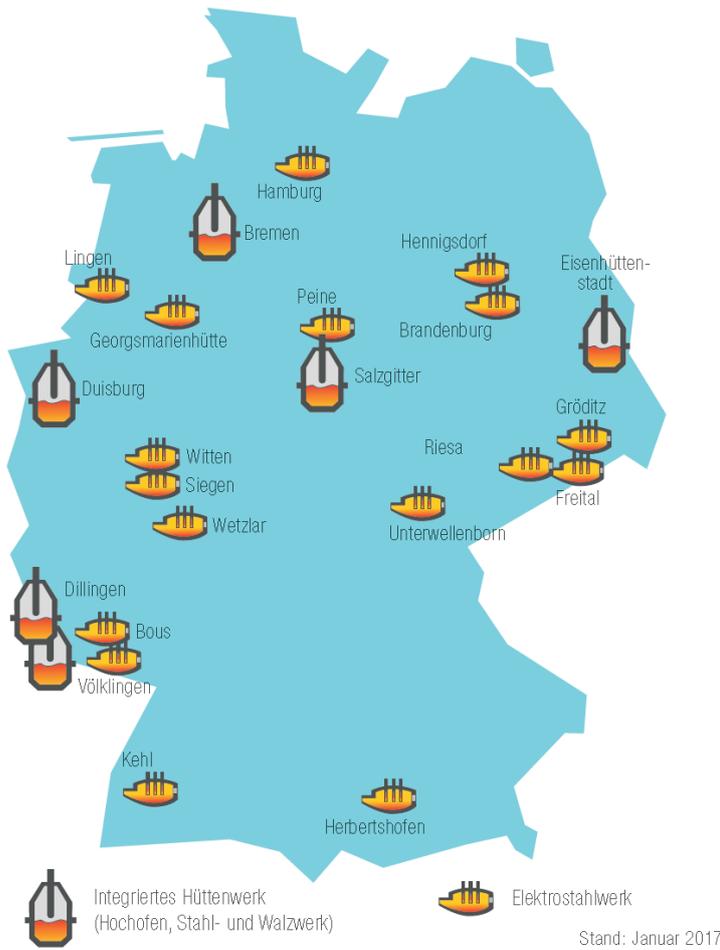
Die Standorte der Stahlindustrie in Deutschland unterscheiden sich entsprechend der Produktionsroute und der regionalen Lage der Werke (s. Abbildung 2.2). Die sechs integrierten Hüttenwerke betreiben jeweils zwei bis drei Hochofen an ihren Standorten. Sie erzeugen Oxygenstahl durch Frischen von Roheisen mit Sauerstoff. Zum integrierten Hüttenwerk zählen i.d.R. auch eine Kokerei und eine Sinteranlage. Die in der Koks-, Roheisen- und Stahlerzeugung produzierten Kuppelgase werden an diesen Standorten in angeschlossenen Kraftwerken zur Herstellung von Eigenstrom genutzt.

Abbildung 2.1: Erzeugungsrouten zur Stahlherstellung in Deutschland (2015) [1]



Innerhalb dieses Kapitels wird vor allem die Elektrostahlerzeugung genauer analysiert, da Elektrolichtbogenöfen eine besonders große elektrische Anschlussleistung besitzen und im Gegensatz zu integrierten Hüttenwerken den Strom aus dem öffentlichen Netz beziehen. Die Elektrostahlwerke in Deutschland nutzen Stahlschrott als Rohstoff für die Stahlherstellung. Nur ein Elektrostahlwerk verfügt über eine Direktreduktionsanlage, in der Eisenerzpellets als Rohstoff verwendet und durch Reduzierung mit Erdgas zu Eisenschwamm (DRI) umgewandelt werden.

Abbildung 2.2: Standorte der Stahlerzeugung in Deutschland [1]



Stand: Januar 2017

Abbildung 2.3 gibt einen Überblick über die Produktionsmengen der größeren Unternehmen der Stahlindustrie in Deutschland mit Unterscheidung des Herstellungsverfahrens in Oxygenstahl und Elektrostahl. Ca. 70 % des Stahls wird als Oxygenstahl in der Hochofen-/Konverterroute und rd. 30 % in Elektrolichtbogenöfen hergestellt.

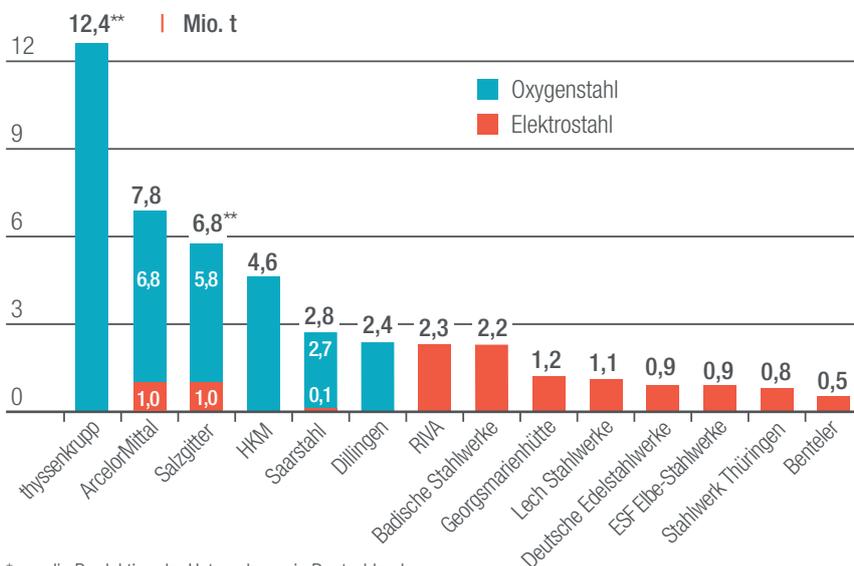


Abbildung 2.3: Stahlerzeugung der größten Stahlwerke in 2015 in Deutschland [1] (Anteil an der Gesamterzeugung von 42,7 Mio. t: 98 %)

* nur die Produktion der Unternehmen in Deutschland
 ** Produktion einschließlich HKM-Anteil

Quelle: WV Stahl

Der spezifische Primärenergiebedarf in der deutschen Stahlindustrie betrug im Jahr 2015 etwa 17,9 GJ/t Rohstahl und 19,8 GJ/t Stahlfertigerzeugnis. Bei der Elektrolichtbogenofenroute beträgt der Anteil des elektrischen Energiebedarfs ca. 89 % der Endenergie. In der Prozesskette der Elektrostahlerzeugung bietet sich der Elektrolichtbogenofen als Hauptverbraucher zur Flexibilisierung des elektrischen Energiebedarfs an. (Abbildung 2.4).

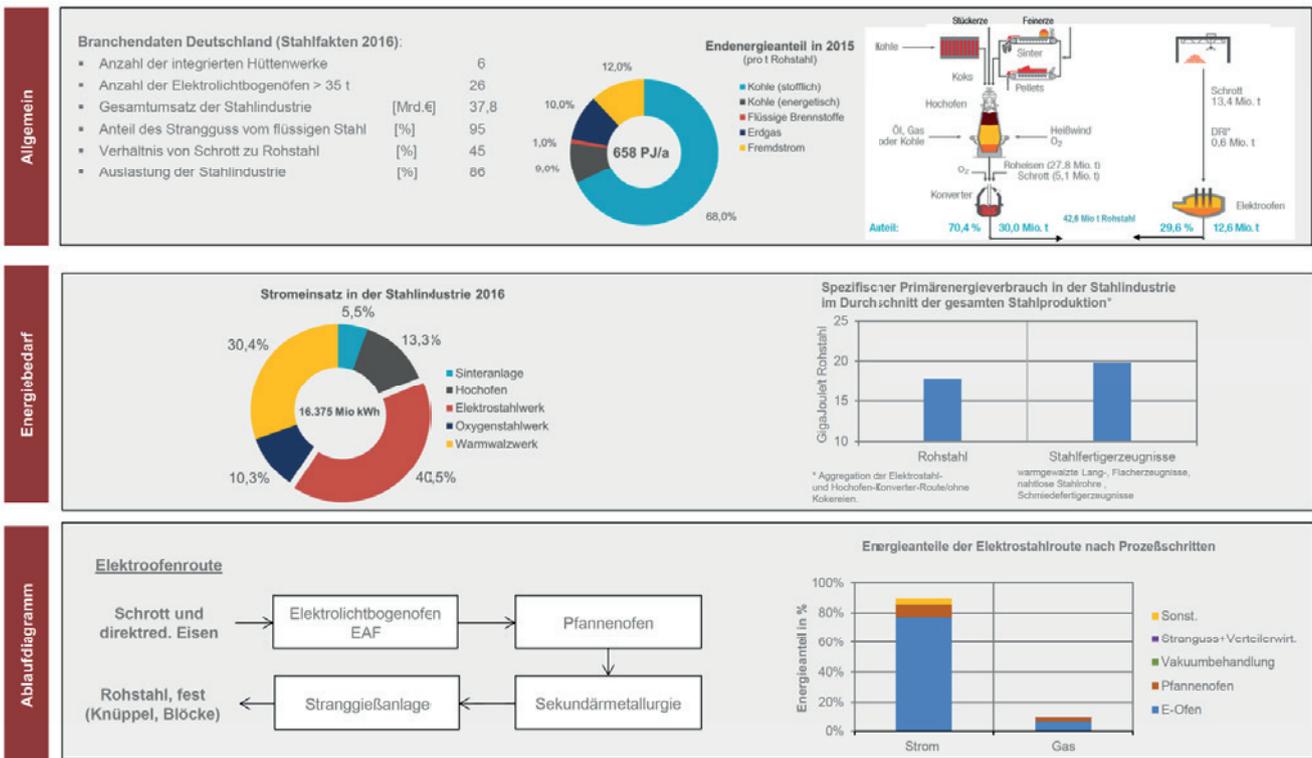


Abbildung 2.4: Branchensteckbrief Stahl

2.2 METHODIK DER DATENERHEBUNG

Die Daten der Stahlindustrie wurden durch systematische Analyse der vorhandenen Fachliteratur und mit Auswertung von Forschungs- und Entwicklungsprojekten der Branche ermittelt. Spezifische Daten über die Auslegung vorhandener Elektrolichtbogenöfen (Electric Arc Furnace; EAF) wurden in speziellen Seminaren des Stahlinstituts und mit der Datenbank PLANTFACTS des Stahlinstituts VDEh bereitgestellt. Die Ermittlung der Hemmnisse zur Flexibilisierung des Elektrolichtbogenofenverfahrens wurde nach der in Kapitel 1 beschriebenen Methodik durchgeführt.

Wesentliche Erkenntnisse über die Flexibilitäts-Kriterien und über Hemmnisse bei der Bereitstellung von Flexibilität stammen aus Interviews mit Vertretern der Unternehmen, die sich zur Mitarbeit bereit erklärt haben. Die Autoren des Berichts danken den Vertretern der folgenden Unternehmen für die geführten Diskussionen:

- Lechstuhlwerke GmbH, Meitingen
- Deutsche Edelstahlwerke GmbH, Witten

Die Interviews wurden vor Ort bei den Unternehmen durchgeführt. Die Interviews beinhalteten die Identifikation der wesentlichen Prozesse und Hemmnisse zur Flexibilisierung der Fahrweise des Elektrolichtbogenofens. Die Interviewdauer war jeweils ca. 2–3 Stunden.

Ferner standen Vertreter des VDEh-Energieeffizienznetzwerks Elektrostahl, dem 11 Elektrostahlwerke aus Deutschland angehören, für eine Diskussion der Thematik „Flexibilität der Elektrostahlerzeugung“ und der Ergebnisse des vorliegenden Berichts zur Verfügung.

Die Ergebnisse sind teilweise als exemplarisch für die betrachteten Unternehmen zu sehen und nicht in jedem Fall auf andere Unternehmen oder Standorte übertragbar.

2.3 WESENTLICHE CHARAKTERISTIKA DER STAHLBRANCHE

PRODUKTVIELFALT

Die Grobklassifikation der DIN EN 10020 unterscheidet zwischen Grundstählen, unlegierten Qualitätsstählen, unlegierten Edlstählen, legierten Qualitätsstählen und legierten Edlstählen (u.a. nicht-rostende Stähle). Stahlprodukte werden auch innerhalb dieser Grobklassifikation in einer großen Vielzahl von (häufig kundenspezifischen) Variationen hergestellt. Durch eine Vorauswahl des Schrotts sowie den Zusatz von produktspezifischen Legierungsmitteln können verschiedenste Produktqualitäten erzeugt werden. Unterschiedliche Stähle haben dabei z.T. sehr unterschiedliche Produkteigenschaften, z.B. hinsichtlich der Umformbarkeit, Oberflächenqualität und Korrosionsbeständigkeit. Die Produktpalette der Elektrolichtbogenofenroute reicht dabei von Baustahl bis hin zu Edlstahllegierungen. Nichtrostende und legierte Stähle haben in Deutschland einen höheren Anteil an der Gesamtproduktion (50 %) als im internationalen Vergleich (30 %), [2] (Stand 2010). Die Branche ist global von einer hohen Innovationsintensität zur Neuentwicklung oder Verbesserung von Stählen gekennzeichnet [2], [3].

KONJUNKTUR UND AUSLASTUNG DER BRANCHE

Die globale Stahlindustrie weist derzeit – insbesondere aufgrund eines immensen Kapazitätsaufbaus in China – eine Überkapazität auf, was zu erhöhtem Wettbewerbsdruck auf die deutsche Stahlindustrie führt [3], [4]. In diesem Kontext wird eine starke Spezialisierung der Produktion gemäß Kundenspezifikationen sowie die starke horizontale Vernetzung der Stahlherstellung mit der Weiterverarbeitung und den Hauptabnehmern z.B. aus dem Automobilbau und Maschinenbau als wesentlicher Wettbewerbsvorteil der europäischen und deutschen Stahlindustrie gesehen [3], [4]. Die Rohstahlerzeugung, und damit die Auslastung der Produktion, schwankt in Deutschland in den einzelnen Monaten der Jahre seit 2011 auf einem insgesamt relativ hohen Niveau im Bereich von ca. 80–90 % effektiver Auslastung [5]¹. Die globale Überkapazität schlägt (bisher) also nur bedingt auf die Auslastung der deutschen Rohstahlproduktion durch.

¹ Küster Simic u.a. führen ihre Berechnungen nicht genau aus, so dass nicht klar ist inwiefern unvermeidbare Stillstandzeiten in der Berechnung berücksichtigt wurden. Es ist davon auszugehen, dass eine effektive Auslastung von 90 % bereits de facto Volllast bedeutet.

ZUKAUFMÖGLICHKEITEN UND LIEFERFRISTEN

Vor dem Hintergrund der hohen Produktvielfalt und dem Wettbewerbsdruck findet eine Lagerhaltung, mit der entsprechende Kosten verbunden sind, in größerem Umfang weder beim Stahlproduzenten noch beim Kunden statt.² Stattdessen wird je nach Auftrag, den spezifischen Kundenwünschen entsprechend, produziert. Nach Auftragsingang wird ein Liefertermin (wochenscharf) vereinbart, und somit ein klares Zeitfenster definiert, in dem die Produktion stattfinden muss. Diese just-in-time Produktion wird durch den Trend zur Industrie 4.0 in Zukunft voraussichtlich noch enger getaktet [4]. Die Lieferfristen hängen von der Art des Produkts und den für dessen Herstellung nötigen Bearbeitungsschritten ab, und betragen i. d. R. mehrere Wochen. Die Möglichkeiten, Produkte am Markt zuzukaufen, werden für spezifisch nach Kundenwunsch produzierte Stähle als sehr gering oder nicht gegeben eingeschätzt.

²Für den Fall legierter Edelmehle wurde zudem eine Minimierung des Risikos von Preisschwankungen der verarbeiteten Legierungen als Hemmnis für eine Lagerhaltung genannt.

2.4 TECHNISCHE BESCHREIBUNG DES PROZESSES

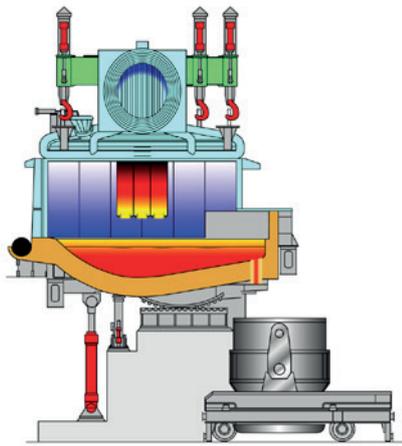
Elektrostahl wird durch Einschmelzen von Stahlschrott im Elektrolichtbogenofen hergestellt. Das zentrale Aggregat eines Elektrostahlwerks ist der Elektrolichtbogenofen, in dem der Elektrostahl chargenweise hergestellt wird. In der Prozessroute zur Herstellung von Elektrostahl folgen dem Einschmelzvorgang im Elektrolichtbogenofen weitere metallurgische Prozessschritte, bevor der Stahl in den Gießanlagen zu Strangguss oder Blockguss verarbeitet werden kann. Dies ist prinzipiell in Abbildung 2.5 dargestellt.



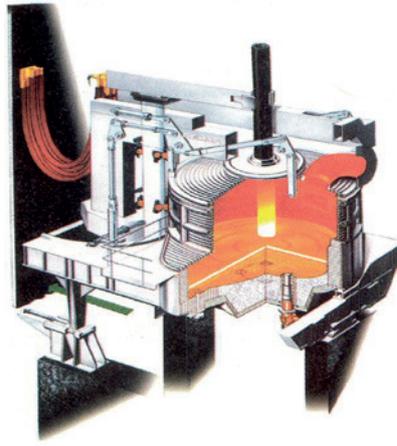
Abbildung 2.5: Prozessroute der Stahlherstellung im Elektrostahlwerk

Elektrostahl wird heute in Deutschland zu 90 % in Stranggussanlagen vergossen. Einzelne Werke besitzen ebenfalls Einrichtungen zur Herstellung von Blockguss, der dort zeitweise parallel zum Strangguss erzeugt werden kann. Auf die Herstellung von Blockguss entfiel in 2016 bei Elektrostahlwerken ein Mengenanteil von 9,1 %, hingegen bei Oxygenstahlwerken nur ein Mengenanteil von 2,8 % der Produktion [6]. Blockguss wird für bestimmte, besonders große Werkstücke, die z.B. für Schmiedevorgänge benötigt werden, verwendet.

Der prinzipielle Aufbau des Elektrolichtbogenofens ist in der folgenden Abbildung 2.6 dargestellt. Es wird zwischen dem Drehstrom-Lichtbogenofen mit 3 Grafitelektroden und dem Gleichstrom-Lichtbogenofen mit einer Elektrode als Zentral-Kathode und einer Anode im Boden des Ofengefäßes unterschieden.



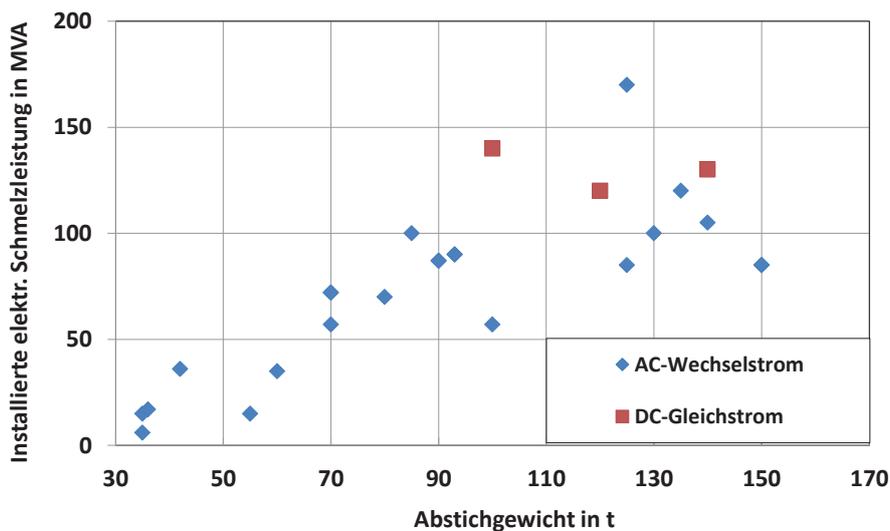
Drehstrom-Elektrolichtbogenofen



Gleichstrom-Elektrolichtbogenofen

Abbildung 2.6: Aufbau des Drehstrom- und Gleichstrom-Elektrolichtbogenofens [7]

Abbildung 2.7 zeigt die installierte elektrische Leistung der in Deutschland betriebenen 26 Elektrolichtbogenöfen mit einem Abstichgewicht ≥ 35 t in Abhängigkeit von dem jeweiligen Abstichgewicht.

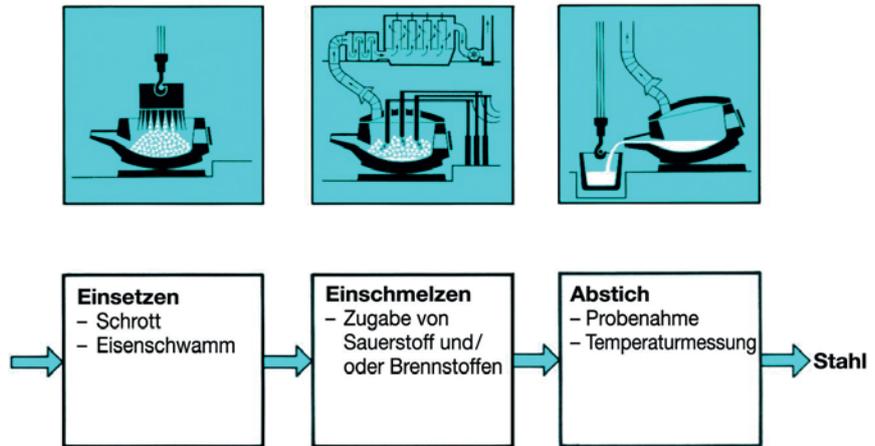
Abbildung 2.7: Elektrische Leistung von Elektrolichtbogenöfen in Deutschland mit Abstichgewicht ≥ 35 t (AC=Wechselstrom, DC=Gleichstrom) [6]

Der Abbildung ist zu entnehmen, dass die Öfengefäße für ein Abstichgewicht zwischen 35 und 150 t dimensioniert wurden und dass die elektrische Anschlussleistung dieser Elektrolichtbogenöfen zwischen 6 und 170 MVA liegt und in Summe 2.046 MVA beträgt.

Die einzelnen Arbeitsschritte am Elektrolichtbogenofen sind in der Abbildung 2.8 vereinfacht dargestellt. Demnach kann der Betriebsablauf in drei Abschnitte unterteilt werden:

- Einsetzen der Rohstoffe,
- Einschmelzen des Schrotts,
- Abstich des flüssigen Stahls und der Schlacke.

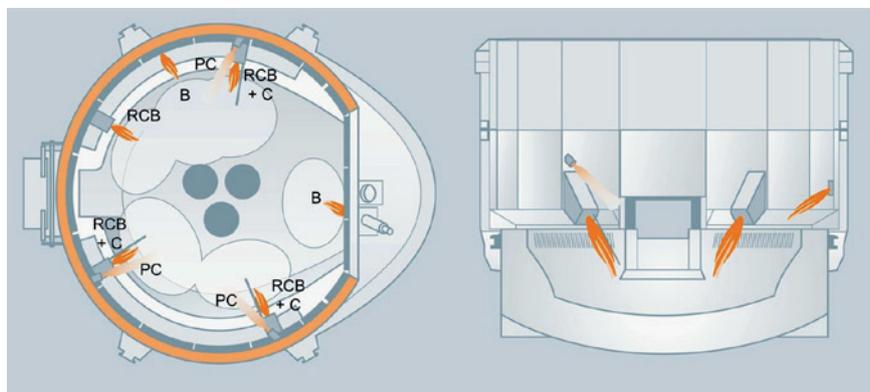
Abbildung 2.8: Prinzipieller Ablauf der Stahlherstellung im Elektrolichtbogenofen [7]



Der Elektrolichtbogenofen wird in der Regel mit 2 bis 3 Körben an Schrott gefüllt. Der Einschmelzvorgang dauert üblicherweise ca. 40–60 min, hiervon entfallen ca. $\frac{2}{3}$ auf die power-on-Zeit. Kurze Unterbrechungen des Einschmelzvorgangs sind z.B. für das Nachsetzen des 2. bzw. 3. Korbs oder für Probenahmen kurz vor dem Abstich erforderlich.

Der Elektrolichtbogenofen kann in Ergänzung zur elektrischen Beheizung über die zentral installierten Elektroden auch in geringem Umfang mit Zusatzbrennern und Injektoren für fossile Brennstoffe wie Erdgas beheizt werden. Abbildung 2.9 zeigt die prinzipielle Anordnung dieser Zusatzbrenner und Injektoren am Rand des Ofengefäßes.

Abbildung 2.9: Zusatzbrenner und Injektoren am Elektrolichtbogenofen (RCB-Refining Combined Burner, C-Kohlestaubinjektion, PC-Nachverbrennungsinjektor, B-Brenner) [8]



Diese Art der Zusatzbeheizung ist nur in einem kurzen Zeitfenster jeweils nach Chargieren des kalten Schrotts sinnvoll möglich.

Der Elektrolichtbogenofen durchläuft bei der Herstellung einer Charge an flüssigem Stahl unterschiedliche Betriebsphasen. Entsprechend dem Verflüssigungsgrad bzw. dem Volumen des Schmelzgutes stellen sich charakteristische Situationen des Lichtbogens und des Schmelzgutes ein, die in der Abbildung 2.10 dargestellt sind. Der Einschmelzvorgang kann differenziert werden in

- den Anfahrvorgang mit reduzierter Außenleiterspannung,
- das Schrottschmelzen mit hoher Schmelzleistung und langem Lichtbogen,
- der Schaumslaggenperiode mit kürzerem Lichtbogen, und
- dem Warmfahren des flüssigen Bades ohne Schaumslagge.

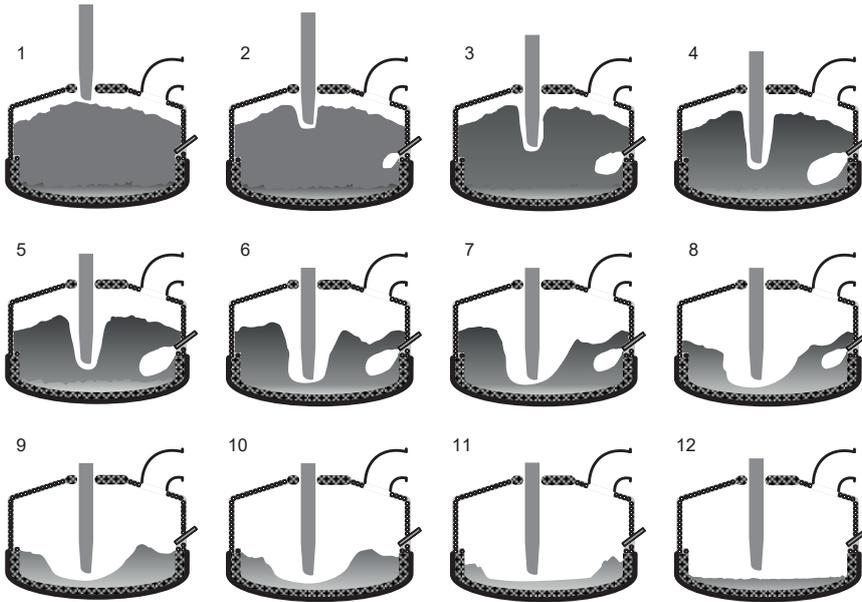
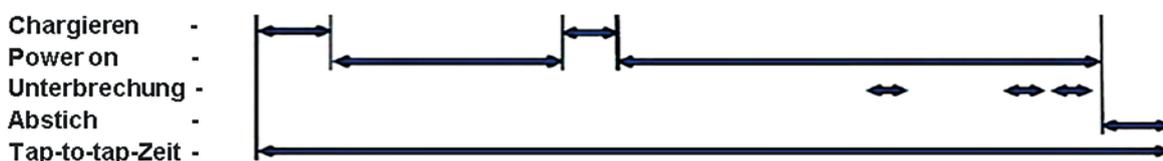
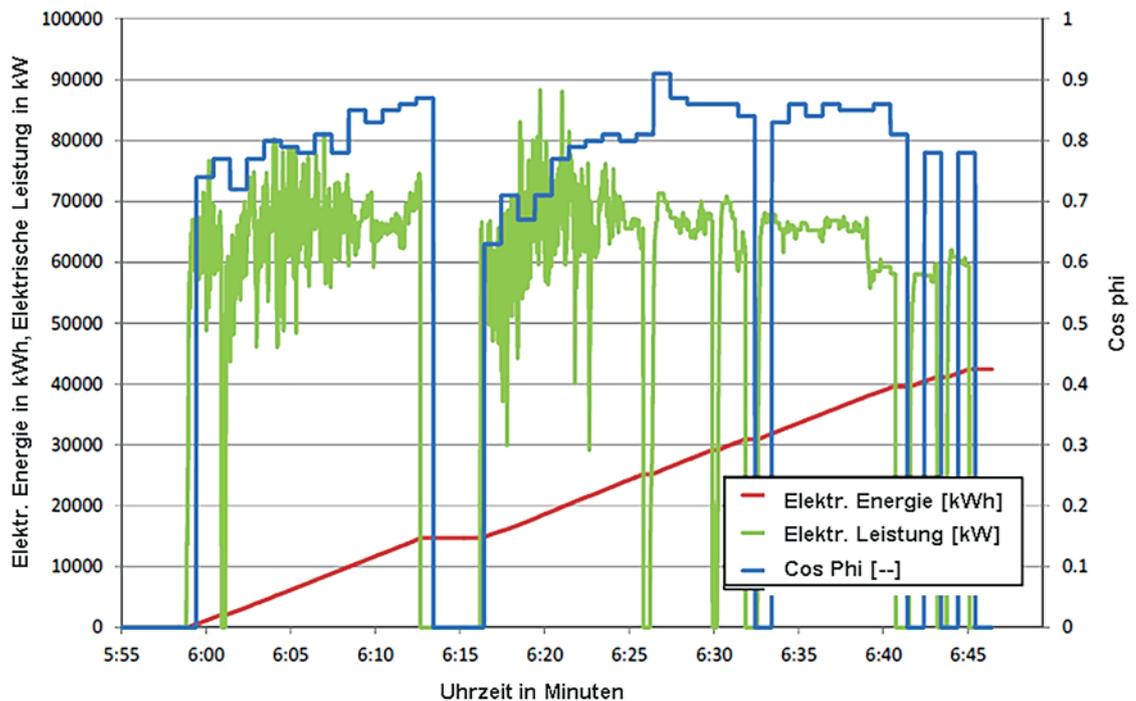


Abbildung 2.10: Verlauf des Schmelzvorgangs und der jeweils in den Betriebsphasen vorliegenden Beheizung mittels Lichtbogen und Zusatzbrennern [8]

In diesen unterschiedlichen Betriebsphasen verändert sich auch die elektrische Leistungsaufnahme des Lichtbogens.

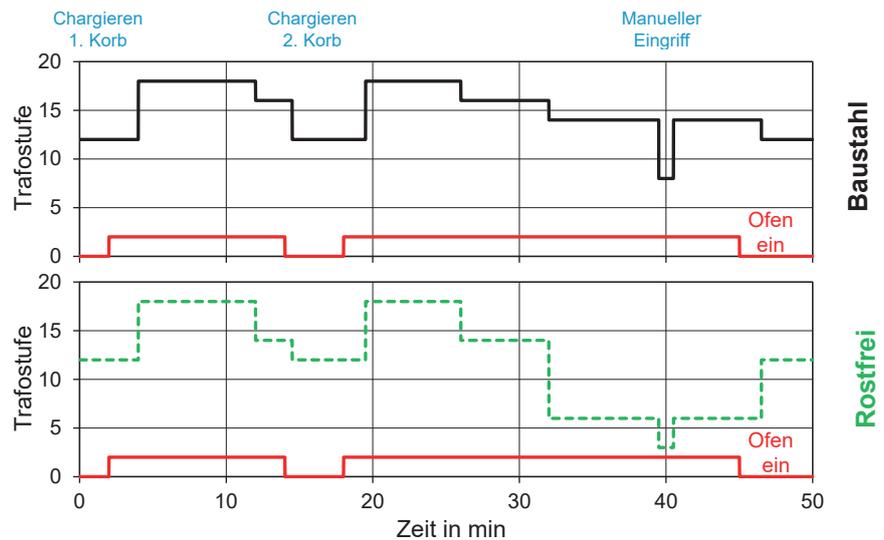
Abbildung 2.11 zeigt ein Beispiel des Lastganges eines Elektrolichtbogenofens für das Einschmelzen einer Charge. Die power-off-Zeiten betragen rd. $\frac{1}{3}$ der Gesamtzeit eines Schmelzyklus. In den power-off Zeiten erfolgt das Chargieren von Schrotten, Probenahmen und Temperaturmessungen und am Ende schließlich der Abstich des flüssigen Stahls und der Schlacke.

Abbildung 2.11: Lastgang der elektrischen Leistung eines Elektrolichtbogenofens [9]



Die elektrische Leistung des Lichtbogens kann während des Einschmelzzyklus stufenweise durch Verstellung der Trafo-Spannungsstufe angepasst werden. Dabei werden die jeweiligen Sollwerte der Trafostufen entsprechend dem Verlauf des Schmelzvorganges vorgegeben und in der Software zur Steuerung der Lichtbogenlänge hinterlegt. Abbildung 2.12 zeigt ein Beispiel eines Werks für den Schmelzzyklus von Baustahl und rostfreiem Stahl.

Abbildung 2.12: Leistungsstufen im Chargenverlauf des Elektrolichtbogenofens [8]



Die in Abbildung 2.12 gezeigten Leistungsänderungen im Verlauf der Einschmelzzeit des Elektrolichtbogenofens bewirken, dass die real übertragene Schmelzleistung des EAF im Mittel deutlich unter der installierten elektrischen Anschlussleistung liegt. An dieser Anlage ergab sich aus der Analyse der Betriebsdaten des EAF, dass in der power-on-Zeit im Mittel rd. 72 % der installierten Wirkleistung bezogen werden konnte.

Die Massen- und Energiebilanz des Elektrolichtbogenofens ist geprägt von der Metallurgie der Reaktionen zur Stahlherstellung. Abbildung 2.13 zeigt eine typische Massenbilanz des Elektrolichtbogenofens mit den pro 1.000 kg Stahl benötigten Einsatzstoffen und den erzeugten Reaktionsprodukten.

Im Elektrolichtbogenofen werden die im Schrott enthaltenen unerwünschten Begleitstoffe durch Zusatz von Kalk und Desoxidationsmitteln chemisch gebunden und in Form von Schlacke aus dem Schmelzbad abgetrennt. Zur Entfernung des im Schmelzbad gelösten Kohlenstoffs wird der Stahl auch mit Sauerstoff behandelt.

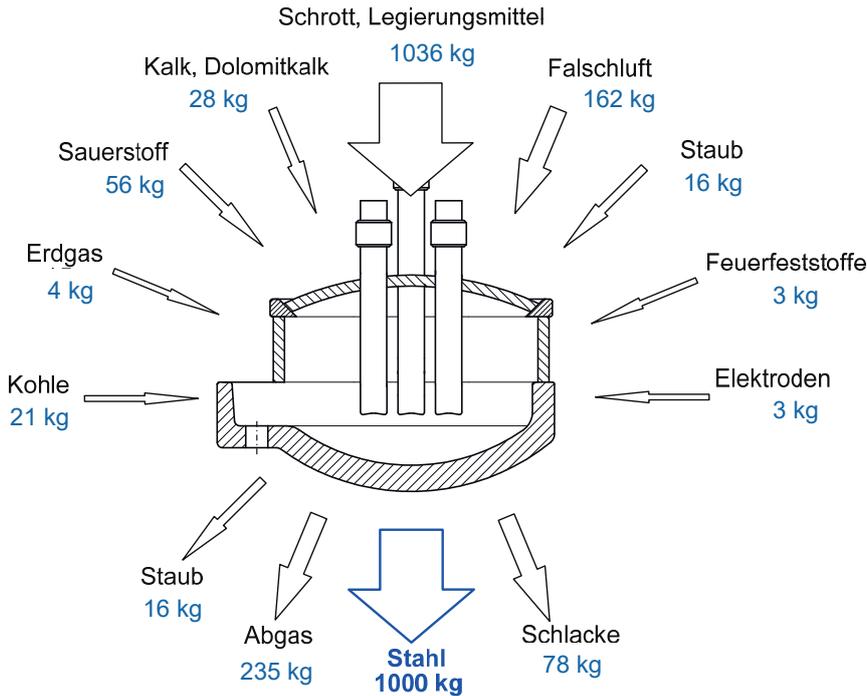


Abbildung 2.13: Typische Massenbilanz des Elektrolichtbogenofens [7]

Ferner zeigt Abbildung 2.14 eine typische Energiebilanz eines Elektrolichtbogens mit den zugeführten Energieeinträgen durch elektrische Energie, Erdgas und durch chemische Reaktionen der Einsatzstoffe sowie den Energieverlusten durch Gefäßkühlung, Wandwärmeverluste und durch Enthalpieströme der Abgase bzw. des flüssigen Stahls und der Schlacke. Der elektrische Energiebedarf kann zwischen 350 und 500 kWh/t Rohstahl betragen.

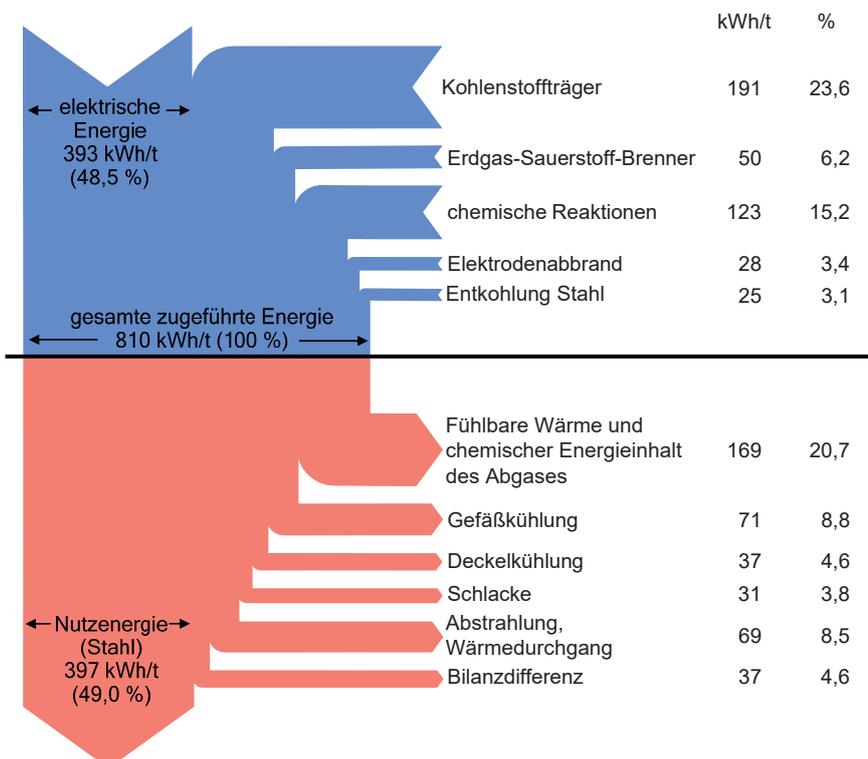


Abbildung 2.14: Typische Energiebilanz eines Elektrolichtbogenofens [7]

2.5 INNERBETRIEBLICHE ORGANISATION

Der Betriebsablauf eines Stahlwerks wird vor allem von der Qualitätssteuerung und Sortenvielfalt der unterschiedlichen Stahlsorten bestimmt. Insgesamt wird angestrebt, eine möglichst hohe Material- und Energieeffizienz des Gesamtprozesses zu erreichen. Hierfür sind in der Regel die folgenden Kriterien von hoher Bedeutung:

- hohes Ausbringen und Vermeiden von Minderqualitäten bzw. Materialrückläufen
- optimale Auslastung der Anlagen, kurze tap-to-tap-Zeit des EAF
- möglichst wenig Betriebsunterbrechungen für ungeplante Instandsetzungen und dadurch hohe Produktivität und geringer spezifischer Energiebedarf

ZEITVERFÜGBARKEIT EINES ELEKTROLICHTBOGENOFENS

Für eine Analyse der Stromverbrauchssituation ist die real vorliegende Zeitverfügbarkeit eines Elektrolichtbogenofens zu betrachten. Die Verlustzeiten für Wartung, Instandsetzung und Nichtbetrieb des EAF eines im 3-Schicht-Rhythmus vollkontinuierlich betriebenen Werks sind exemplarisch in Tabelle 2.1 dargestellt. Aus der Tabelle geht hervor, dass die power-on-Zeit des hier betrachteten Elektrolichtbogenofens rd. 52 % der gesamten Kalenderzeit von 365 Tagen betrug. Dieser Wert kann sich je nach Auslastung der einzelnen Standorte verändern. Diese Größe ist vor allem für eine mögliche Extrapolation der zeitgleich verfügbaren Flexibilität von Elektrolichtbogenöfen von großer Bedeutung.

Tabelle 2.1: Beispiel der jährlichen Betriebszeit eines Elektrolichtbogenofens³

³ Beispiel nach Angaben eines Elektrostahlwerks

Kalenderzeit			
Betriebszeit			Geplante Nicht-Produktion
Laufzeit		Störung Instandsetzung	
Power-On	Chargieren Abstechen Nebenzeiten		
52 %		22 %	14 %
		Leistungs-verluste	Verfügbar- = Jahres-revision verluste

AUFTRAGS- UND SCHICHTPLANUNG

Die Auslastung des Stahlwerks ist anhand der Auftragseingänge absehbar, bzw. kann daraus für die nähere Zukunft abgeschätzt werden. Als Reaktion auf steigende/sinkende Auslastung werden die Betriebs- und Stillstandzeiten entsprechend erhöht bzw. verringert. Nicht benötigte Kapazitäten werden also zu Stillstandzeiten gebündelt. In der verbleibenden Betriebszeit wird eine volle Auslastung des Betriebs eingeplant. Die Produktion für einen Auftrag wird in den Betriebszeiten entsprechend eng über verschiedene Produktionsschritte hinweg getaktet. Einzelne

Aggregate, welche die Prozesse limitieren oder besonders störanfällig sind, werden in ihrer Leistung angepasst oder im organisatorischen Ablauf mit angemessenen Pufferzeiten versehen. So auch der kontinuierliche Batchprozess des Elektrolichtbogenofens, der ebenfalls betrieblichen Störungen unterliegt und deshalb gegenüber der Stranggußanlage eine erhöhte Produktionskapazität besitzen sollte. Für die Planung der Betriebszeit des EAF werden Aufträge verschiedener Größe und Stahlqualität zu einer betriebswirtschaftlich optimalen Schmelzenfolge kombiniert. Hierbei werden Einzelaufträge entsprechender Sorten kumuliert und entsprechend der Größe des EAF als Charge von ca. 60 bis 150 t in die Produktionsplanung übernommen. Die Betriebs- und Stillstandzeiten werden anschließend unter Berücksichtigung der Arbeitszeitregelungen in einen Schichtplan überführt. Dies beinhaltet unter Umständen auch den Auf- und Abbau von Personal. Die Auftrags- und Schichtplanung erfolgt im dazu befragten Unternehmen mit ein bis zwei Wochen Vorlauf für den Folgemonat.

Viele Werke sind im Vollkontibetrieb zu 100 % ausgelastet und können ihren Schichtplan nicht verändern. Nur einzelne Werke verfügen noch über freie Produktionsschichten. In diesen Fällen lässt sich ggf. eine Flexibilität durch Verschiebung der Produktionszeit realisieren.

VERNETZTE PRODUKTIONSPROZESSE

Die Produktionskette zur Stahlherstellung im EAF ist nicht direkt über Stoff- oder Energieflüsse mit anderen Produktionsprozessen gekoppelt. Zur Vermeidung von Lastspitzen sind die Stromfahrpläne im Werk jedoch so ausgelegt, dass nicht alle Verbraucher gleichzeitig aktiv sind (EAF, Walzwerke, andere Anlagen im Werk). Viele Werke praktizieren aufgrund des hohen (von der Jahresmaximalleistung abhängigen) Netzentgelts eine Maximum-Begrenzung der in 15 min-Intervallen im Mittel aufgenommenen Leistung. Entsprechend müsste bei flexibler Fahrweise des EAF auch der Betrieb der anderen Verbraucher flexibel angepasst werden, was einen zusätzlichen organisatorischen Aufwand mit sich bringt. Dies wurde in den geführten Gesprächen jedoch nicht ausführlicher thematisiert.

GEPLANTE REPARATUREN

Pro Jahr werden ca. zwei umfangreiche Revisionen durchgeführt, die langfristig geplant sind. Daneben findet einmal pro Woche eine Reparaturschicht statt. Dabei werden Verschleißteile entsprechend ihrer Lebensdauer ausgetauscht. Das Personal der Reparaturschicht unterscheidet sich von dem der Produktionsschicht, und der Rhythmus der Reparaturschicht ist mit den arbeitszeitrechtlichen Bestimmungen bzgl. freier Tage der Produktionsschicht abgestimmt. Fremdfirmen werden in die Reparatur einbezogen, und Material muss beschafft werden.

2.6 TECHNISCHES FLEXIBILITÄTSPOTENZIAL DES ELEKTROLICHTBOGENOFENS

In den folgenden Abschnitten werden verschiedene Fälle dargestellt und Beispiele des technischen Flexibilitätspotentials von Elektrostahlwerken beschrieben. Die vielfältigen Diskussionen mit Vertretern der Unternehmen haben gezeigt, dass es trotz ähnlicher Technik des Elektrolichtbogenofens grundsätzliche Unterschiede im technischen Flexibilitätspotential bzw. der Kapazität der jeweiligen Standorte gibt. Dies ergibt sich vor allem aus folgenden Aspekten und Details der jeweiligen Werksstruktur:

- **Produktionsleistung des Elektrolichtbogenofens:** Sie ist meist nicht steigerungsfähig, um z.B. eine Flexibilisierung durch Mehr-/Minderleistung auszugleichen.
- **Gießkapazität:** Sie ist häufig ein Flaschenhals in der Prozessfolge.

Der im EAF geschmolzene heiße Stahl wird nach Fertigstellung einer Charge im Pfannenofen sekundär-metallurgisch aufbereitet und dann vergossen. Der Guss erfolgt in Deutschland im Wesentlichen im Stranggussverfahren. Blockguss, der überwiegend für Schmiedeprodukte Anwendung findet, spielt eine geringere Rolle. Der Betrieb der Stranggussanlage stellt eine wesentliche Rahmenbedingung für den EAF dar, da diese kontinuierlich mit Stahlschmelzen beschickt werden muss. Unterbleibt die kontinuierliche Beschickung, muss die Stranggießanlage abgestellt werden, was einen erheblichen Störfall darstellt. In diesem Fall ist der Verteiler verloren und muss zeitintensiv neu ausgemauert werden. Die Gießleistung der Einzelanlage kann meist nicht verändert werden. Eine geringfügige Erhöhung der Gießleistung kann aber in einzelnen wenigen Werken z.B. durch parallelen Blockguss erzielt werden.

Diese o.g. Unterschiede der einzelnen Standorte sowie (z.B. auslastungsbedingte) Unterschiede bei der innerbetrieblichen Organisation führen zu typischen Fällen der Werks- und Betriebsstruktur, die nachfolgend beschrieben werden. Aus dieser Fallunterscheidung lässt sich allerdings noch keine kumulierte, branchenweite Hochrechnung ableiten, da hierfür weitere Daten der Einzelunternehmen erforderlich sind. Diese Daten liegen gegenwärtig aber (noch) nicht vor. Eine Hochrechnung für die Gesamtbranche ist deshalb erst nach einer weiteren Datenerhebung möglich.

2.6.1 TECHNISCHE FLEXIBILITÄT DES ELEKTROLICHTBOGENOFENS

Zur Ermittlung des technischen Flexibilitätspotentials von Elektrostahlwerken wurden neben dem Prozess- und Lastverlauf des Elektrolichtbogenofens auch sicherheits- und anlagenrelevante Restriktionen des Betriebs und der vor- und nachgelagerten Prozesse herangezogen. Eine wesentliche Randbedingung der gesamten Betrachtung war die Einhaltung sämtlicher Lieferverpflichtungen der Stahlwerke.

Das Flexibilisierungspotential eines Lichtbogenofens wird anhand eines Lastgangs während eines Schmelzzyklus (Tap to tap-Zeit) deutlich (s. Abbildung 2.11). Die Schaffung eines Flexibilisierungspotentials durch eine Variation der Lichtbogenleistung während eines Schmelzzyklus ist grundsätzlich nur in Form einer Leistungsreduzierung möglich, da der Ofen aus Effizienzgründen jeweils mit maximaler, dem Prozess angepasster Leistung gefahren wird.

Außerdem kann der Arbeitspunkt des Elektrolichtbogenofens nicht beliebig gewählt werden, da das Aggregat bei einem ungünstigen Arbeitspunkt eventuell beschädigt werden könnte und ein ungünstiger Arbeitspunkt zu Kurzschlüssen und einem Energiemehrverbrauch sowie zu einem Elektrodenbruch, d.h. zu Produktionsausfall führen kann.

Der Elektrolichtbogenofen bietet ausschließlich ein Flexibilisierungspotential zur Lastabsenkung durch Unterbrechen des Prozesses, d.h. Ausschalten des Lichtbogens. Eine Unterbrechung/Ausschalten des Lichtbogens ist nur in der Aufschmelzphase möglich und darf nicht zum Ende der Chargenzeit erfolgen. Eine Unterbrechung erfolgt ebenfalls beim Chargieren von neuem Schrott in den Elektrolichtbogenofen. Dieser Betriebspunkt ermöglicht eine Bereitstellung eines Flexibilitätspotentials durch Verlängerung der Ausschaltzeiten und kurzzeitiger Verschiebung der Zykluszeit.

Die möglichen Flexibilisierungspotentiale werden oft durch spezielle produktabhängige Verfahrensweisen begrenzt, da es z.B. beim Warmfahren von flüssigem Stahl durch Zusammenfallen der Schaumschlacke zu prozessbedingten Störungen kommen kann. Weiterhin führen zunehmende Stillstandzeiten zu stofflichen Verunreinigungen der Stahlprodukte, bedingt durch Korrosionsprozesse der Feuerfestauskleidung. Auch ein Nachholen der Produktion mit erhöhter Leistung ist bei Elektrostahlwerken meist nicht möglich, da der Ofen nicht mit Überlast betrieben werden kann.

Aufgrund der Verkettung der Aggregate sind Schmelz- und Gießprozess gemeinsam zu betrachten.

2.6.2 TECHNISCHE FLEXIBILITÄT DER PROZESSROUTE -STRANGGUSS

Für die Elektro-Stahlwerke, die die Schmelzen im Strangguss vergießen, ist der Strangguss der wesentliche limitierende Faktor in der Elektrostahlroute, da aus wirtschaftlichen Gründen ein kontinuierlicher Stranggussprozess zu gewährleisten ist und der Elektrolichtbogenofen die erforderliche Produktionsmenge jederzeit zur Verfügung stellen muss. Da der Elektrolichtbogenofen aufgrund der Anlagenauslegung eine geringfügig höhere Kapazität als der Strangguss besitzt, kann dies i. d. R. gewährleistet werden. Bei einer derartigen Auslegung kann über einen längeren Produktionszeitraum (z.B. eine Schicht) im Ergebnis auch eine Pufferzeit aufgebaut werden, die dann z.B. zur Behebung kurzfristiger Störungen im Betriebsablauf zur Verfügung steht.

Bei idealen, d.h. störungsfreiem, Betrieb der Elektrostahlroute kann trotz hoher Auslastung bei dieser Anlagenkonfiguration ein Flexibilitätsfenster erarbeitet werden das heißt, es ließe sich ggf. Flexibilität auf dem Regelenergiemarkt vermarkten. Am Beispiel eines Stahlwerkes konnte bei einer störungsfreien Schicht von 8 Stunden ein Flexibilitätsfenster von 20 Minuten aufgebaut werden.

2.6.3 TECHNISCHE FLEXIBILITÄT DER PROZESSROUTE – STRANGGUSS UND BLOCKGUSS

Einzelne wenige Stahlwerke verfügen neben der Stranggussproduktion auch über eine Blockgussproduktion. In diesen Werken kann der im Elektrolichtbogenofen erzeugte Flüssigstahl bei Engpässen der Stranggussproduktion zum Teil auch als Blockguss vergossen werden. Dadurch lässt sich die vorhandene Kapazität des Elektrolichtbogenofens vollständig ausnutzen. Es besteht in diesem Fall im Produktionsprozess nicht mehr die Möglichkeit zum Aufbau eines Flexibilitätsfensters und aktiven Teilnahme am Regelenergiemarkt.

2.6.4 PROZESSROUTE – TIMESHIFT-MODELL

MIT LEISTUNGSÄNDERUNG DES ELEKTROLICHTBOGENOFENS

Ein norddeutsches Unternehmen erprobt gegenwärtig im Rahmen des Großprojekts Norddeutsche Energiewende NEW 4.0 ein neues Konzept zur Flexibilisierung elektrischer Lasten [10]. Das Unternehmen testet im Projekt „Timeshift“ eine Leistungserhöhung des Elektrolichtbogenofens um rd. 12 MW, um entsprechend dem regionalen Bedarf die Produktionsleistung von dem Hochlastzeitfenster am Tage in das Niedriglastzeitfenster (nachts) zu verschieben. Die Produktionsleistung des Elektrolichtbogenofens kann in der Nacht erhöht und am Tage gedrosselt werden.

Abbildung 2.15 zeigt die prinzipiellen Änderungen der Schmelzleistung eines Elektrolichtbogenofens bei Verschiebung der Produktion entsprechend dem Timeshift-Konzept.

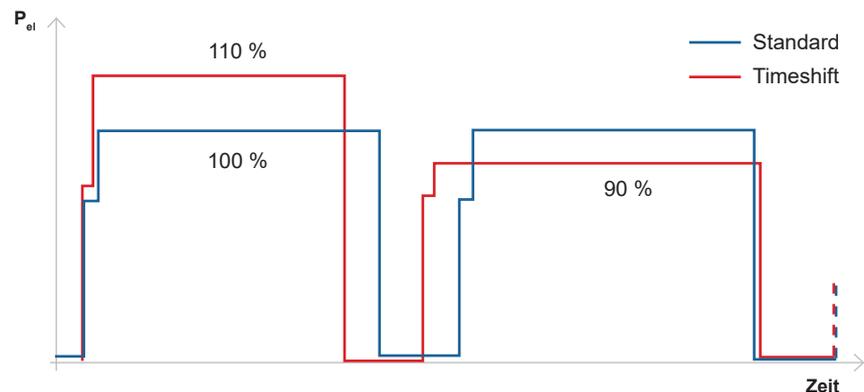


Abbildung 2.15: Schmelzleistung des EAF beim Timeshift-Konzept [11]

Dieses Konzept setzt voraus, dass an dem jeweiligen Standort auch die technischen und genehmigungsrechtlichen Voraussetzungen für eine derartige Leistungsverschiebung gegeben sind oder geschaffen werden.

OHNE LEISTUNGSÄNDERUNG DES ELEKTROLICHTBOGENOFENS

An einigen, unvollständig ausgelasteten Standorten stehen ggf. zusätzlich belegbare Produktionsschichten zur Verfügung. Dort ließe sich möglicherweise eine Flexibilität allein durch Verschiebung der Produktionszeit mit Nachholung des nicht produzierten Anteils in anderen Zeiträumen realisieren. Dieses Konzept ist aber nur dann umsetzbar, wenn in diesem Fall auch die Mitarbeiter in ihrer Arbeitszeitplanung derart flexibel reagieren können und die Prozesskette mit der integrierten Lagerung von Zwischenprodukten dies zulässt. Die Mitarbeiter hätten in diesem Fall nach angemessener Vorankündigung ihre Arbeitszeiten zu verschieben und müssten dies vor allem mit ihrem persönlichen Schichtrythmus verbinden können.

2.6.5 QUANTITATIVE BESTIMMUNG DES THEORETISCHEN UND TECHNISCHEN FLEXIBILITÄTSPOTENTIALS

Bei einer Berechnung des technischen Flexibilitätspotentials ist zwischen zwei Flexibilitätsgrößen zu unterscheiden zwischen:

- der Flex-Leistung P_{Flex} = bereitgestellte, abschaltbare Wirkleistung [kW]
- und der Flex-Arbeit E_{Flex} = tatsächlich pro Jahr abgerufene Arbeit [kWh]

Die Berechnung dieser Größen erfolgt für Elektrolichtbogenöfen auf folgender Grundlage:

- Die installierte elektrische Leistung $P_{\text{Inst.}}$, d.h. das theoretische Flexibilitätspotential, charakterisiert die technische Auslegung und Dimension eines Elektrolichtbogenofens. Sie beträgt für Anlagen in Deutschland zwischen 30 und 150 MVA. Die kumulierte installierte elektrische Leistung der 26 Elektrolichtbogenöfen in Deutschland mit einem Abstichgewicht ≥ 35 t beträgt ca. $P_{\text{Inst.}} = 2.046$ MVA.
- Es wird ein **Leistungsfaktor** ϵ definiert als Verhältnis der mittleren Schmelzleistung eines Lichtbogenofens im power-on-Betrieb P_{Schm} zu der installierten Leistung $P_{\text{Inst.}}$.

$$\text{Leistungsfaktor: } \epsilon = \frac{P_{\text{Schm.}}}{P_{\text{Inst.}}} = \frac{\text{mittlere Leistung im power-on-Betrieb}}{\text{Installierte Leistung}}$$

Die Auswertung von Betriebsdaten eines Elektrolichtbogenofens ergab in einem Unternehmen einen Jahresmittelwert von $\epsilon = 72$ %. Es ist anzunehmen, dass andere Elektrolichtbogenöfen ähnlich arbeiten und dass bei optimierter Regelungstechnik evtl. ein Wert bis $\epsilon = 80$ % erreicht werden kann. Der Faktor kennzeichnet die Höhe der im Mittel abschaltbaren Leistung.

- Es wird der Anteil τ der power-on-Betriebszeit an der Kalenderzeit definiert:

$$\tau = \frac{\text{power-on-Betriebszeit des EAF pro Jahr [Std.]}}{\text{Gesamte Kalenderzeit [Std.]}}$$

Dieser Wert wurde für einen EAF eines voll ausgelasteten Unternehmens mit $\tau = 52\%$ bestimmt.

- Betrachtet man die 26 in Deutschland betriebenen Lichtbogenöfen mit einem Abstichgewicht ≥ 35 t, so ist nicht ihre gesamte installierte Leistung in Höhe von $P_{\text{Inst.}} = 2.046$ MVA zeitgleich am Netz in Betrieb. Vielmehr ergibt sich die tatsächlich im (Jahres)-Mittel schaltbare Leistung $\sum P_{\text{Flex}}$ aller zeitgleich im power-on-modus betriebenen Elektrolichtbogenöfen zu:

$$\sum P_{\text{Flex}} = \sum_{i=1}^{i=26} P_{\text{Flex}, i} = \sum_{i=1}^{i=26} P_{\text{Inst.}, i} * \epsilon_i * \tau_i$$

- Es wird ein Flexibilitätsfaktor ζ zur Lastverschiebung definiert als Zeitanteil der betrieblich maximal bereitstellbaren Flexibilitätsdauer für eine kurzzeitige Abschaltung der Leistung auf Anforderung:

$$\zeta = \frac{\text{maximal nutzbare Flexibilitätsdauer pro Schicht [min]}}{\text{Betriebszeit einer Produktionsschicht [min]}}$$

Flexibilität wird als Lastverschiebung ohne Produktionsausfall verstanden. D.h. die fehlende Leistung ist in anderen unkritischen Zeiten nachzuholen. In diesem Wert sind auch vorgegebene Kapazitäts-Einschränkungen aufgrund der Technik und Produktionsstruktur unterschiedlicher Standorte zu berücksichtigen.

Deshalb sind aus heutiger Sicht zumindest folgende Fälle für ζ zu unterscheiden:

Fall A: In einem voll ausgelasteten Werk mit einer Stranggussanlage wurde der Flexibilitätsfaktor des EAF bestimmt zu:

$$\zeta_A = 20 \text{ min} : 8 \text{ h} = 4\%$$

Fall B: In einem voll ausgelastetem Werk mit Strangguss- und Blockgussanlage war keine Flexibilität des EAF vorhanden, d.h.

$$\zeta_B = 0\%$$

Fall C: Ein Werk, das in der Lage ist, seine Produktionsleistung kurzzeitig um z.B. +/- 10% zu erhöhen:

$$\zeta_C = +/- 10\%$$

Fall D: Ein nicht ausgelastetes Werk, das in der Lage ist, statt 2 Schichten zeitweise 3 bzw. nur 1 Schicht zu produzieren:

$$\zeta_D = +/- 50\%$$

Nur in den Fällen C und D könnte neben einer Abschaltung ggf. auch eine Zuschaltung von zusätzlicher Leistung des EAF auf mittel- bzw. langfristige Anforderung ermöglicht werden. In diesen Fällen kann somit Flexibilität in beide Richtungen erzeugt werden.

- Es wird eine **Wahrscheinlichkeit β** der Beteiligung des einzelnen Unternehmens an der Flexibilitätsbereitstellung geschätzt. Dieser Faktor berücksichtigt Hemmnisse, die aus der Situation des Einzelfalls oder dem Prozessstatus zum Zeitpunkt des Flexibilitätsabrufes entstehen. Er kennzeichnet den Umfang der tatsächlich kurz vor Abruf bereitgestellten Flexibilität. Im ersten Ansatz wird geschätzt, dass $\beta = 50\%$ beträgt.
- Es wird ein **Abrufanteil μ** als das Verhältnis der tatsächlich in Anspruch genommenen Abrufdauer zu der maximal bereitgestellten Abrufdauer definiert:

$$\mu = \frac{\text{in Anspruch genommene (abgerufene) Flexibilitätsdauer pro Jahr [Std.]}}{\text{bereitgestellte Flexibilitätsdauer pro Jahr [Std.]}}$$

Dieser Wert berücksichtigt den Unterschied zwischen der kumuliert in einer längeren Periode bereitgestellten Flexibilitätsdauer und der tatsächlich in dieser Periode in Anspruch genommenen (abgerufenen) Flexibilität. Der Faktor bildet eine wesentliche Grundlage, um die zu erwartende Auswirkung einer Flexibilitätsbereitstellung beurteilen zu können. Er muss aus betrieblichen Gründen begrenzt werden und ist deshalb in den Anforderungsprofilen (s. Kapitel 1) zu ergänzen.

Mit den o.g. Größen kann das technische Flexibilitätspotential als Flex-Leistung der 26 Elektrolichtbogenöfen mit einem Abstichgewicht ≥ 35 t in Deutschland abgeschätzt werden:

$$\text{a) } \sum_{i=1}^{i=26} P_{\text{Flex}, i} = \sum_{i=1}^{i=26} P_{\text{Inst}, i} \cdot \epsilon_i \cdot \tau_i = 2.046 \text{ MW} \cdot 72\% \cdot 52\% = 766 \text{ MW}$$

Dieser Wert ergibt sich ebenfalls als mittlere Last, berechnet aus dem statistisch erfassten Jahresstromverbrauch der Elektrostahlwerke in Höhe von 6.633 Mio kWh in 2016 bezogen auf 8.760 Stunden [15].

$$\text{b) } \sum_{i=1}^{i=26} E_{\text{Flex}, i} = \sum_{i=1}^{i=26} P_{\text{Inst}, i} \cdot \epsilon_i \cdot \tau_i \cdot 8760 \text{ h} \cdot \zeta_i \cdot \beta_i \cdot \mu_i$$

= ...(Einzelwerte sind noch zu ermitteln)

Sie kann jedoch erst ermittelt werden, wenn alle Hemmnisse je Werk bekannt sind und bestimmt wurden. Die tatsächlich abgerufene Flex-Arbeit ist schließlich das Ergebnis der möglichen Energieflüsse und Flexibilitätsbeiträge aller Marktteilnehmer.

2.7 ERFÜLLBARKEIT DER ANFORDERUNGSPROFILE

2.7.1 ANFORDERUNGSPROFIL 1 – POTENZIALE UND HEMMNISSE

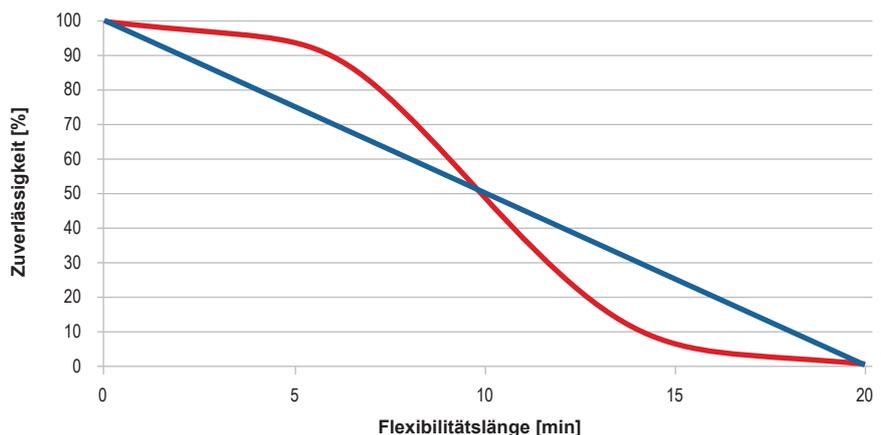
Eine temporär erhöhte Leistungsaufnahme (negative Regelleistung) ist nicht möglich, da der Prozess zu power-on Zeiten auf maximaler Last läuft, und der EAF während power-off Zeiten nicht kurzfristig aktiviert werden kann. Eine positive Regelleistung durch Unterbrechung des Prozesses bzw. durch kurzes Abschalten des EAF ist in der ersten Hälfte der Chargenzeit während des Aufschmelzens oder durch Verschieben des Beginns der nächsten Charge aus technischer Sicht möglich. Jedoch kann die in Anforderungsprofil 1 vorgesehene Vorankündigungszeit von 15 min nicht immer gewährleistet werden, da die aktuelle Charge in der zweiten Hälfte der Chargenzeit fertig gestellt werden muss und nicht mehr unterbrochen werden darf, d.h die Ankündigungszeiten zu kurz sind. Eine Entscheidung über eine Unterbrechung der Leistungsaufnahme muss demnach von Fall zu Fall kurzfristig vom Betriebsleiter vor Ort getroffen werden.

Ein Nachholen der durch temporär verringerte Leistungsaufnahme verzögerten Produktion durch im Nachgang erhöhte Leistungsaufnahme ist nicht möglich (s.o.). Die (akkumulierten) Verzögerungen der Produktion durch (regelmäßige) Flexibilitätsmaßnahmen müssten demnach im Rahmen des zeitlichen Puffers (= Flexibilitätslänge) der Stranggussanlage bleiben und in die Arbeitsplanung einbezogen werden.

Bei Betrieb des Elektrolichtbogenofens mit einer Stranggussanlage ohne Blockguss kann der bei störungsfreiem Ablauf entstehende zeitliche Puffer auch ohne weitere organisatorische Anpassungen für Flexibilitätsmaßnahmen genutzt werden. Der zeitliche Puffer ergibt sich aber individuell aus den technischen Rahmenbedingungen und Auslastung des einzelnen Werks und seiner Produktionsaggregate (Überkapazität des EAF gegenüber dem Strangguss) und wird primär für die Behebung produktionsseitiger Störfälle vorgehalten. Die Flexibilität wird durch Störungen vermindert.

Die Zulässigkeit der abgerufenen Flexibilitätslänge nimmt mit abnehmender Abrufdauer zu. Der Verlauf dieses Zusammenhangs ist in Abbildung 2.16 mit zwei Beispielen möglicher Verlaufskurven dargestellt.

Abbildung 2.16: Zulässigkeit der Flexibilisierungsmaßnahme über die flexibilisierbare Vorlaufzeit



2.7.2 ANFORDERUNGSPROFIL 2 – POTENZIALE UND HEMMNISSE

Ein Elektrolichtbogenofen kann aus technischer Sicht prinzipiell für mehrere Stunden abgeschaltet werden, ohne dass er Schaden nimmt. In diesem Fall würde jedoch auch der Betrieb einer Stranggussanlage zum Stillstand kommen und unterbrochen. Der Abbruch des Stranggusses stellt eine erhebliche Störung dar und ist mit erheblichen Kosten für das Wiederanfahren verbunden.

Ein mehrstündiges Abschalten des Elektrolichtbogenofens bewirkt einen Produktionsverlust, da im Nachgang die Produktion nicht durch erhöhte Leistungsaufnahme nachgeholt und ausgeglichen werden kann. Auch mit Blick auf die innerbetriebliche Organisation und die Priorität der Einhaltung von Lieferfristen ist das Anforderungsprofil wie im Folgenden dargelegt, daher (derzeit) nicht umsetzbar.

Für den Fall hoher Auslastung ohne geplante Stillstandzeiten wäre durch Produktionsverzögerungen um mehrere Stunden die Einhaltung von Lieferterminen gefährdet – insbesondere falls diese Stillstände wiederholt auftreten. Liefertermine stehen bereits mehrere Wochen im Vorfeld fest, und die Produktion ist in diesem Zeitraum auf die volle Kapazität ausgelegt und eng durchgeplant. Für eine Flexibilisierung der Produktion gemäß Anforderungsprofil 2 müssten aufgrund der mit einer zeitweise reduzierten Leistungsaufnahme einhergehenden Produktionsverzögerung Lieferfristen länger oder flexibler kalkuliert und die Akzeptanz bei Kunden für solchermaßen veränderte Lieferfristen vorab evaluiert werden.

Für Zeiten einer vergleichsweise geringen Auslastung, in denen beim derzeitigen Organisationsmodus Stillstandzeiten zeitlich über mehrere Tage oder in einem Schichtsystem mit ungenutzten Produktionsschichten gebündelt sind, müsste dieses Organisationsmodell zur Erfüllung von Anforderungsprofil 2 durch flexibel durchgeführte Stillstände mit einer veränderlichen Dauer abgelöst werden. Dabei gibt es verschiedene wirtschaftliche und organisatorische Hemmnisse, die im Einzelfall zu analysieren sind. Die organisatorische Umsetzung eines solchen Stillstandes erfordert einen erheblichem Vorlauf.

In jedem Fall werfen die Auftrags- und Personaleinsatzplanung bei stundenweise flexibel durchgeführten Stillständen erhebliche Probleme auf. Die fehlenden Chargen aus dem Elektrolichtbogenofen würden sich in sämtlichen nachgelagerten Verarbeitungsschritten niederschlagen. Dies aufzufangen würde eine adaptive Planung erfordern, um Stillstand- und Betriebszeiten in nachgelagerten Produktionsschritten (Walzwerk, usw.) an die flexible Produktion des Elektrolichtbogenofen anzupassen, und Betriebszeiten mit geringer Auslastung zu minimieren. Nicht zuletzt wäre, um die Produktionszeiten mit einem Tag Vorlauf flexibel auf Strompreise des Folgetages anzupassen, eine deutliche Flexibilisierung der betrieblich vereinbarten Arbeitszeitregelungen nötig. Inwiefern dies mit dem geltenden Arbeitsrecht vereinbar wäre, wäre zu untersuchen. Es wäre zudem abzuwägen, wie sich die zu erwartenden reduzierten Kosten aufgrund der flexiblen Produktionsweise im Vergleich zu den damit verbundenen Belastungen der Belegschaft darstellen würden. Um Flexibilität im Sinne von Anforderungsprofil 2 bereitzustellen, wäre ent-

sprechend eine strategische längerfristige Ausrichtung eines Betriebs auf einen geeigneten Organisationsmodus für Zeiten vergleichsweise geringer Auslastung erforderlich. Die Sinnhaftigkeit bzw. die Wirtschaftlichkeit für das Unternehmen ist fraglich und im Einzelfall vor Ort genau zu prüfen. Die einhergehende Unterbrechung des Stranggussprozesses ist in jedem Fall mit erheblichen Mehrkosten verbunden.

Für die Durchführung geplanter Reparaturen ist zu beachten, dass sie eine präzise Personalplanung erfordern und Reparaturmaterial und Montage-Hilfsmittel unter Einbezug von Fremdfirmen genau terminiert werden müssen. Deshalb sind Verschiebungen von größeren Reparaturen nicht flexibel mit nur einem Tag Vorlauf im Sinne von Anforderungsprofil 2 möglich.

2.7.3 ANFORDERUNGSPROFIL 3 – POTENZIALE UND HEMMNISSE

Aus rein technischer Sicht ist ein mehrtägiger Stillstand des Elektrolichtbogenofens, wie in Anforderungsprofil 3 vorgesehen, möglich, bedarf aber einer langen Planungsfrist.

In Zeiten hoher Auslastung wäre ein mehrtägiger Stillstand jedoch mit einem hohen, nicht nachholbaren Produktionsverlust und damit einhergehenden Verletzungen von Lieferverpflichtungen verbunden. Solch ein Szenario ist aus Sicht der Branche nicht akzeptabel, und war entsprechend auch nicht Teil der vertieften Analyse. In Zeiten vergleichsweise geringer Auslastung werden mehrtägige Stillstandzeiten derzeit bereits geplant und durchgeführt. Die (derzeit) benötigten Vorlaufzeiten bzgl. Auftrags- und Personaleinsatzplanung für diese mehrtägigen Stillstandzeiten sind jedoch deutlich länger (mehrere Wochen), als im Anforderungsprofil vorgesehen (2–5 Tage). Das Anforderungsprofil kann daher nicht erfüllt werden.

2.8 WECHSELWIRKUNGEN ZWISCHEN EFFIZIENZ UND FLEXIBILITÄT

Bei einem flexibel betriebenen Elektrolichtbogenofen sind mögliche Wechselwirkungen zwischen Effizienz und Flexibilität zu erwarten, z. B. durch Erhöhung des spezifischen Energiebedarfs, durch Beeinträchtigung der Produktqualität, durch Änderung der Netz-Inanspruchnahme und des Netzentgelts sowie durch Auswirkungen auf die Standzeit von verschleißenden Anlagenkomponenten.

Aus Gründen der Energieeffizienz wird angestrebt, den Elektrolichtbogen auf hohem Leistungsniveau mit möglichst wenigen Unterbrechungen zu betreiben, da eine Reduzierung der Produktionsleistung zu spezifisch höheren Energieverlusten der Anlage führt. Bei einer zu niedrigen Einschmelzleistung besteht auch die Gefahr, dass sich ggf. Kavernen bilden können, die das Nachrutschen von noch nicht aufgeschmolzenem Schrott blockieren könnten. Das könnte ggf. einen Elektrodenbruch mit Produktionsausfall zur Folge haben.

Jede zusätzlich durch Flexibilitätsabruf erzeugte Betriebsunterbrechung bedeutet außerdem, dass die Anlage in der Unterbrechungszeit zusätzlich abkühlt und folglich wieder aufgeheizt werden muss. Dieser Vorgang führt somit zu einem erhöhten Energieverlust und zu geringerer Energieeffizienz. Geht man beispielsweise für einen 100 t-Elektrolichtbogenofen von einer Energiebilanz entsprechend Abbildung 2.13 aus, so werden die Energieverluste des mit Schmelze gefüllten Ofens in Höhe von ca. 22 % der Energiebilanz auch bei einem zusätzlichen Produktionsstopp weiterhin auftreten. Dies führt bei einer angenommenen Dauer des Stopps von 20 min entsprechend der nachfolgenden Beispiels zu einer Erhöhung des spez. Energiebedarfs um ca. 15 %:

BEISPIELRECHNUNG ZUR ABSCHÄTZUNG DER EFFIZIENZ-WECHSELWIRKUNG

- Elektrolichtbogenofen mit 100 t-Gefäß,
Energiebedarf: 800 kWh/t Rohstahl
- Tap-to-Tap-Zeit: 60 min (Schätzwert)
- Energieverlust des EAF (ohne Abgas): ca. 22 % (s. Bilanz in Abb. 2.14)¹
= 22 % * 800 kWh/t * 100 t / 1 h = 17,6 MW
- Energieverlust im 20 min-Stillstand:
Abwärmeverlust: 17,6 MW * 1/3 h = 5.867 kWh
Erforderliche Energiezufuhr: 5.867 kWh/50 %² = 11.733 kWh pro 100 t
= 117 kWh/t Rohstahl (15 %)

¹ Gefäß- und Deckelkühlung sowie Abstrahlung

² bei einem Wirkungsgrad der Wärmeübertragung auf das Nutzgut von ca. 50 %

Auch aus Qualitätsgründen sind die Energieeffizienz und die Planbarkeit der Temperaturführung für den Gesamtprozess sehr wichtig. Es können keine „Speicher“ mit flüssigem, heißen Stahl angelegt werden, da zusätzliche Haltezeiten neben den Energieverlusten des flüssigen Stahls meist auch einen zusätzlichen Feuerfestverschleiß mit Folge von Verunreinigungen im flüssigen Stahl nach sich ziehen.

Zu beachten ist ferner, dass aufgrund einer erhöhten Anzahl von Lastwechseln auch die Beanspruchung vieler Anlagenkomponenten ansteigen wird und deshalb mit zusätzlichem Verschleiß zu rechnen ist. Nicht nur Feuerfest-Materialien sondern auch andere Bauteile der Anlage benötigen bei erhöhtem Lastwechsel eine zusätzliche Wartung und Instandsetzung. Dies kann ggf. zu einer deutlichen Veränderung des Instandhaltungsbedarfs und der Verfügbarkeit der Anlage führen.

Das Flexibilisierungspotential der Stahlwerke wird zusätzlich durch die gegebene stromvertragliche Begrenzung der Leistungsabnahme (Lastbegrenzung) und die vorgelagerte Bilanzkreisbewirtschaftung eingeschränkt. Ein Überschreiten bzw. eine Erhöhung der Spitzenlast führt zu einem erhöhten Netz-Leistungspreis und damit zu erheblichen wirtschaftlichen Nachteilen. Zusätzlich können weitere Kosten aus der Bilanzkreisbewirtschaftung entstehen, wenn die tatsächliche Leistungsabnahme von der bestellten Leistung abweicht. Deshalb müssen Elektrostahlwerke im Allgemeinen ihre Lastspitzen reduzieren. Zur Optimierung und Begrenzung der jeweils im 15 min-Intervall überwachten Spitzenleistung werden entsprechende Lastbegrenzungssteuerungen eingesetzt.

Die rechtlichen Grundlagen zur Netzoptimierung sollen zukünftig weiter verbessert werden und mit den neuen Anforderungen zur Flexibilisierung in Einklang gebracht werden. Dazu wurde von der dena die neu eingerichtete Taskforce Netzentgelte [12] gegründet, in der mehrere Unternehmen der Stahlindustrie mitarbeiten.

2.9 FLEXIBILITÄTSPERSPEKTIVEN DES ELEKTROLICHTBOGENOFENS

Der Lichtbogenofen ist heute das Standardverfahren zum Recycling von Schrott. Es gibt weltweit 120 Gleichstrom-Elektrolichtbogenöfen und 1.200 Wechselstrom-Elektrolichtbogenöfen. Alternative Energieträger wie Erdgasbrenner können in der Frühphase des Schmelzprozesses eingesetzt werden, wenn der Schrott noch kalt ist. Wenn der Schrott bereits beginnt aufzuschmelzen, werden die Gasbrenner abgeschaltet und nur noch elektrisch über den Lichtbogen beheizt. Die Optimierung des flexiblen Einsatzes hybrider Beheizungsmethoden bietet somit Flexibilitätsperspektiven.

Eine zusätzliche Flexibilisierungsperspektive bieten Nebenaggregate der Elektrostahlroute, wie z.B. die Anlagen zur Sauerstofferzeugung durch Luftzerlegung. Diese Anlagen werden in der Regel von externen Firmen betrieben und fallen daher oft nicht in den Bilanzbereich des Stahlwerksbetreibers bzw. des energieintensiven Betriebs. Sie bieten oft auch die Möglichkeit zum Speichern der technischen Gase und eröffnen damit ein Potential zur Speicherung von fluktuierend erzeugter Energie.

Weitere Flexibilisierungsperspektiven bestehen in der Verwendung von alternativ erzeugten technischen Gasen wie z.B. Wasserstoff. Dieser könnte partiell den momentan verwendeten Standardbrenngasen zugemischt werden. Ferner besteht eine weitere Perspektive zur Installation von hybriden Wärmeübertragern, mit denen z.B. die Verbrennungsluft von Walzwerksöfen hybrid (d.h. mit Strom und/oder Erdgas) vorgewärmt werden könnte.

2.10 LITERATURVERZEICHNIS

- [1] „Fakten zur Stahlindustrie in Deutschland – 2016,“ Wirtschaftsvereinigung Stahl.
- [2] J. Rotering, P. von Hochberg, N. Naujuk und T. Schmidt-Brockhoff, „Die Stahlindustrie in Deutschland – Rückgrat des Industriestandorts Deutschland“, Booz & Company, 2012. Online verfügbar unter: www.stahl-online.de/wp-content/uploads/2013/09/2012-01-19_Die-Stahlindustrie-in-Deutschland-Kurzfassung_Viewpoint-fin.pdf
- [3] PWC, „Stahlmarkt 2016 – Stahlmarkt 2025: Quo vadis?,“ 2016. Online verfügbar unter: www.pwc.de/de/industrielle-produktion/assets/pwc-stahlmarkt-2016-stahlmarktprognose-2025.pdf
- [4] Roland Berger, „Think Act – Beyond mainstream: Weathering the steel crisis,“ 2016. Online verfügbar unter: www.rolandberger.com
- [5] A. Küster-Simic, O. Gül und P. Lauenstein, „Branchenanalyse Stahlindustrie: Entwicklungstrends und Zukunftschancen“ Hans-Böckler-Stiftung, 2017.
- [6] Stahl-Zentrum
- [7] B. Kleimt, „Stahlerzeugung im Elektrolichtbogenofen,“ Stahlakademie, Düsseldorf, 2016.
- [8] K. Krüger, „Stahlerzeugung im Lichtbogenofen,“ MaxAicher GmbH & Co. KG, Meitingen, 2017.
- [9] F. e. a. Marchiori, „Integrated dynamic energy management for steel production,“ European Commission, RFCS, 2017.
- [10] H. Naoumis, „Flexibilisierung von Lasten in der Stahlproduktion,“ August 2017. Online verfügbar unter: <http://new4-0.erneuerbare-energien-hamburg.de/de/new-40-blog/details/flexibilisierung-von-lasten-in-der-stahl-produktion.html>
- [11] M. Weng, „Die Energieeffizienten – Flexibilität im Elektrostahlwerk,“ VIK Mitteilungen, Sonderdruck, pp. 12–13, Juni 2016.
- [12] dena, „Taskforce Netzentgelte“. Online verfügbar unter: www.dena.de/themen-projekte/projekte/energiesysteme/taskforce-netzentgelte/
- [13] R. Apel, B. Buchholz und H. Domels, „Demand Side Integration, Lastverschiebungspotentiale in Deutschland,“ VDE, 2012.
- [14] Jellinghaus, Stahlerzeugung im Lichtbogenofen, Düsseldorf: Stahleisen Verlag, 1994.
- [15] Statistisches Jahrbuch der Stahlindustrie 2017/2018. Stahl-Zentrum, Düsseldorf 2017.



KAPITEL 3

BEHÄLTERGLASHERSTELLUNG

Bernhard Fleischmann,
Hüttentechnische Vereinigung der Deutschen Glasindustrie e.V. (HVG),
Offenbach am Main

Karin Arnold, Georg Holtz,
Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH, Wuppertal

Ralph-Uwe Dietrich, Stefan Estelmann,
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Stuttgart

3.1 EINLEITUNG

Die zu den Grundstoffindustrien zählende Glasindustrie in Deutschland wird im Branchensteckbrief (Abbildung 3.1) mit ihren schmelzenden Betrieben beschrieben bzw. mit entsprechenden Kennzahlen charakterisiert. Die Veredelung von Flachglas ist aus den statistischen Daten herausgenommen worden, da es sich dabei um völlig andere Technologien und Prozesse handelt, die mit dem Schmelzen von Glas nicht vergleichbar sind.

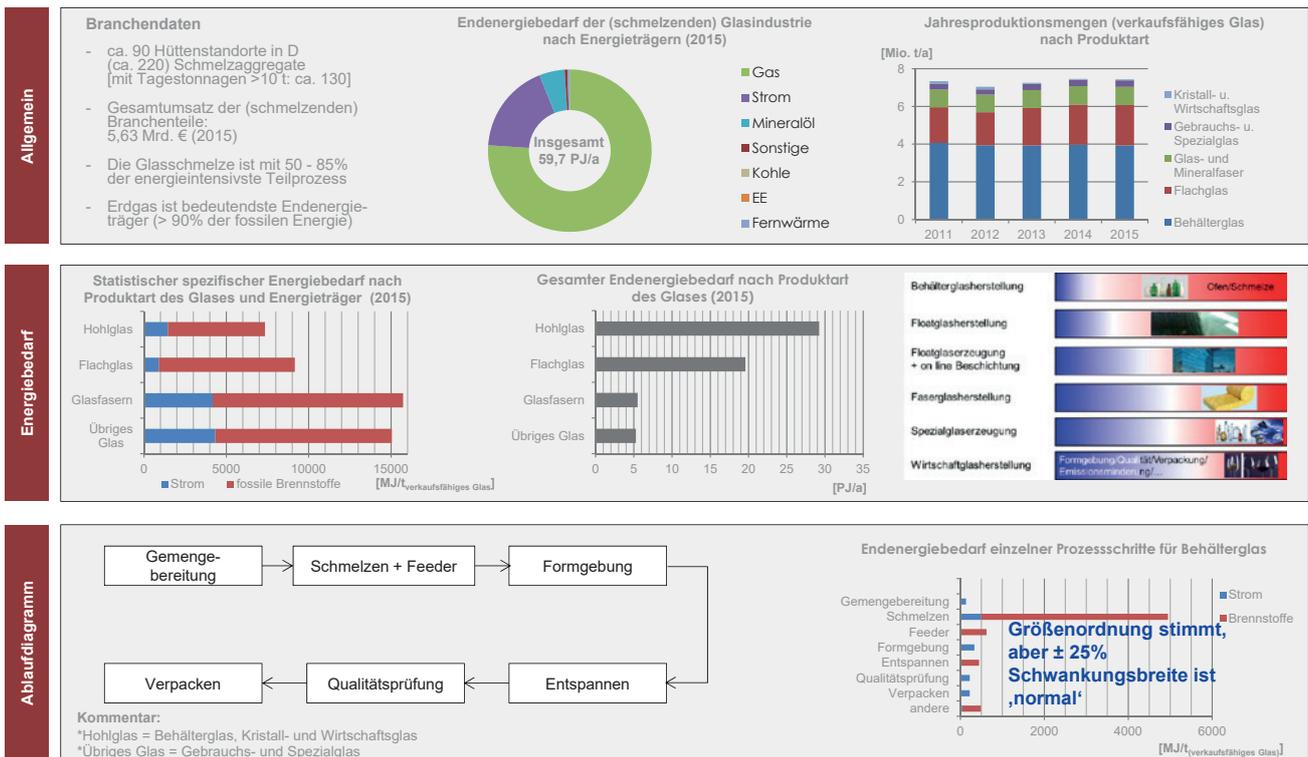
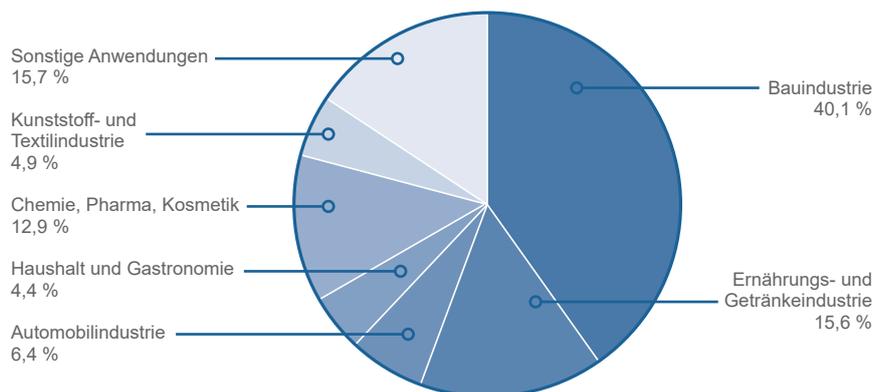


Abbildung 3.1: Branchensteckbrief Glasindustrie (Schmelzbetriebe) [2015]

Die Kunden des Grundstoffindustriezweiges der Glasherstellung, unter Berücksichtigung der Flachglasveredelung, sind in Abbildung 3.2 dargestellt. Es zeigt sich, dass die Glasindustrie für viele Industriezweige wichtige Ausgangsprodukte bereitstellt.

Abbildung 3.2: Kunden des Grundstoffindustriezweiges der Glasindustrie [1]



Abweichungen sind aufgrund von Rundungsdifferenzen möglich

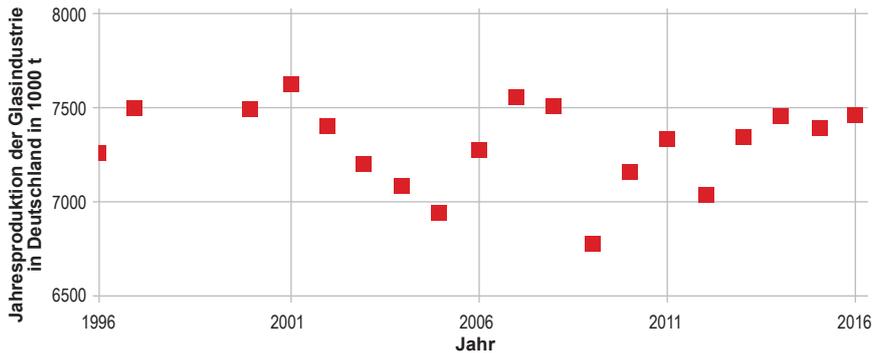


Abbildung 3.3: Jahresproduktionsmenge der Glasindustrie in Deutschland an verkaufsfähigem Glas in den letzten 20 Jahren in kt [1]

Abbildung 3.3 gibt die Jahresproduktion der Glasindustrie an verkaufsfähigem Glas in Deutschland in den letzten 20 Jahren wieder und dokumentiert die relativ stabilen Verhältnisse bezüglich der Jahrestonnage, während Abbildung 3.4 die Jahrestonnage für die einzelnen Glasbranchen beispielhaft für das Jahr 2016 darstellt. Die zu den Grundstoffindustrien zählende Glasindustrie in Deutschland hatte in 2016 etwas über 53.000 Beschäftigte und einen Gesamtumsatz von ca. 9,4 Mrd. EUR. Dabei betrug der Anteil der Behälterglasindustrie in 2016 am Gesamtumsatz ca. 20,5 %, während ihr Anteil an der Jahrestonnage bei 53 % lag (Abbildung 3.4).

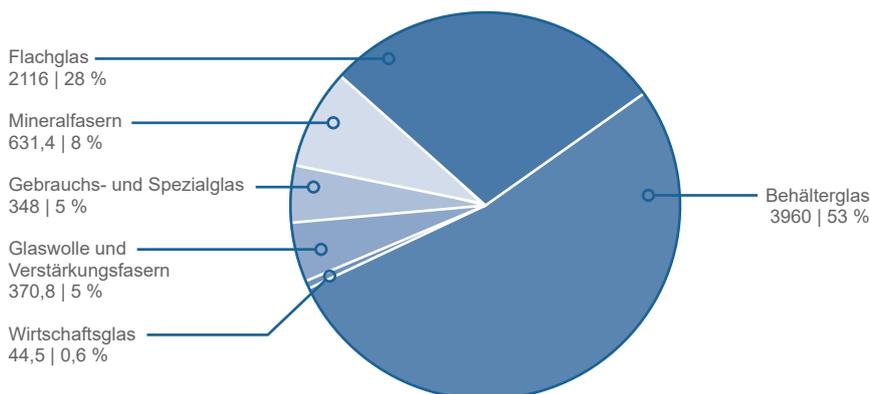


Abbildung 3.4: Jahresproduktion der Glasbranchen an verkaufsfähigem Glas in Deutschland im Jahr 2016, Menge in 1000 t [2]

3.2 GRUNDSÄTZLICHE PROZESSSCHRITTE

Der Produktionsablauf zur Herstellung von Glasprodukten kann in fünf grundsätzliche Schritte unterteilt werden. Diese Prozessschritte und ihre Reihenfolge gelten für alle Glasprodukte (Behälterglas, Flachglas, Faserglas, Spezial- und Gebrauchsglas). Die Glasproduktion gliedert sich dabei in

- Gemenge-/Scherbenbereitung
- Schmelze mit den Teilschritten Schmelzen, Läutern und Homogenisieren
- Formgebungsprozess (je nach Produkt und Glasart)
- Spannungsfrei/-arm Kühlen/Tempern
- Qualitätsprüfung und Verpackung, eventuell Veredelung

Als zusätzlichen Prozessschritt, der nicht direkt an die Entstehung des Produktes gekoppelt ist, beinhaltet der Herstellungsprozess von Glasprodukten wie bei allen industriellen Thermoprozessanlagen die Emissionsminderungsmaßnahmen, hauptsächlich von Verbrennungsprodukten, die bei der Schmelze entstehen.

3.3 GLASARTEN UND PRODUKTGRUPPEN, GLASANWENDUNGEN

Die Chemie des Glases bzw. der Glasschmelze ergibt sich vor allem aus den Anforderungen an das Glasprodukt (chemische Beständigkeit, physikalische Eigenschaften wie mechanische Festigkeit, optische Eigenschaften wie Farbe, elektrische Eigenschaften u.a.m) und den Erfordernissen des Formgebungsprozesses. Hierbei stehen die Fragen, wie die Anforderungen an die Abkühlgeschwindigkeit beim Formgebungsprozess und das Viskositäts-Temperatur-Verhalten der Schmelze aufeinander abgestimmt werden können, als entscheidende Einflussgrößen für die Glaschemie im Mittelpunkt. Aus diesen beiden Hauptanforderungen ergeben sich für unterschiedliche Anwendungen folgende typische Glasarten.

Tabelle 3.1: Typische Glasarten bzw. Glaschemie für unterschiedliche Glasprodukte

Glasanwendung/-produkt	Glasart/-chemie
Verpackungsglas/Behälterglas	Kalk-Natron-Silicatglas
Wirtschaftsglas	Kalk-Natron-Silicatglas; Kristallglas
Flach- bzw. Floatglas (Bauglas, Fahrzeugverglasung)	Kalk-Natron-Silicatglas
Verstärkungsfasern für Beton	AR-Glas (Alkali resistentes Glas)
Gläser für Elektronik und Elektrik	Kalk-Natron-Silicatglas, Erdalkali-Alumo-Silicatglas, Alkali-Bleiglas, E-Glasfaser, ...
Spezial- und Gebrauchsglas	Glaskeramik, Borosilicatglas, ...

Die Preise bzw. Kosten für Rohstoffe und die regionale Verfügbarkeit spielen ebenfalls eine wichtige Rolle bei der Auswahl und Suche nach den passenden Rohstoffen. Weitere wichtige Einflussfaktoren sind, wie bereits genannt, die sich aus den Rohstoffen ergebende Glaschemie eines Produktes und dessen physikalische Eigenschaften sowie die Eigenschaften der Schmelze, um die jeweiligen Formgebungs- und Prozessschritte optimal ausgestalten zu können.

3.4 BEDEUTUNG DER BEHÄLTERGLASHERSTELLUNG IN DER GLASINDUSTRIE

Die Behälterglasindustrie stellt Glasverpackungen her, die hauptsächlich in der Getränke- und Lebensmittelindustrie zum Einsatz kommen oder von Arzneimittelherstellern und in der Kosmetikbranche verwendet werden.

„Die deutsche Behälterglasindustrie – das sind 12 unabhängige Unternehmen mit ca. 9.000 Beschäftigten in Deutschland. Viele der Behälter-

glashersteller sind globale Player, die nicht nur in Deutschland, sondern auch in anderen europäischen Ländern oder in den USA Glasverpackungen aller Art produzieren. Ein Blick auf die Produktionszahlen dieses Wirtschaftszweiges zeigt, dass die deutsche Behälterglasindustrie die größte in Europa ist.“ [3]. Abbildung 3.5 zeigt die Standorte der Behälterglashersteller in Deutschland, wobei neben den Produktionsstandorten auch Verwaltungsstandorte aufgeführt sind.

Aktuelle Erhebungen der HVG (Stand: Aug. 2017) ergeben in Deutschland etwas mehr als 220 Glasschmelzaggregate, die zur industriellen Glasherstellung genutzt werden. Dabei werden Tages tonnagen von 100 kg bis 1.000 t in den Schmelzaggregaten erschmolzen. Bei ausschließlicher Betrachtung der Schmelzaggregate mit Tages tonnagen größer 10 t/d reduziert sich deren Anzahl auf ca. 130 Glasschmelzwannen.

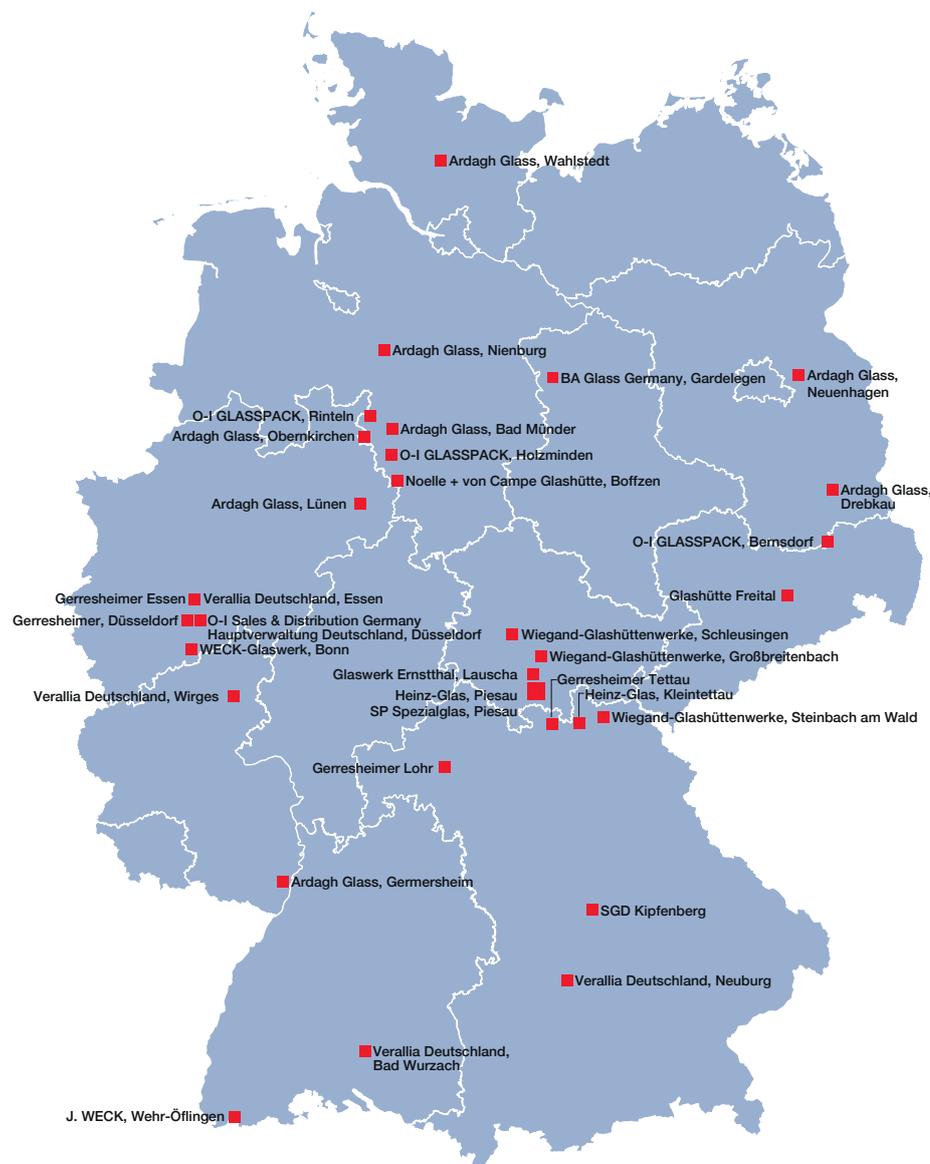
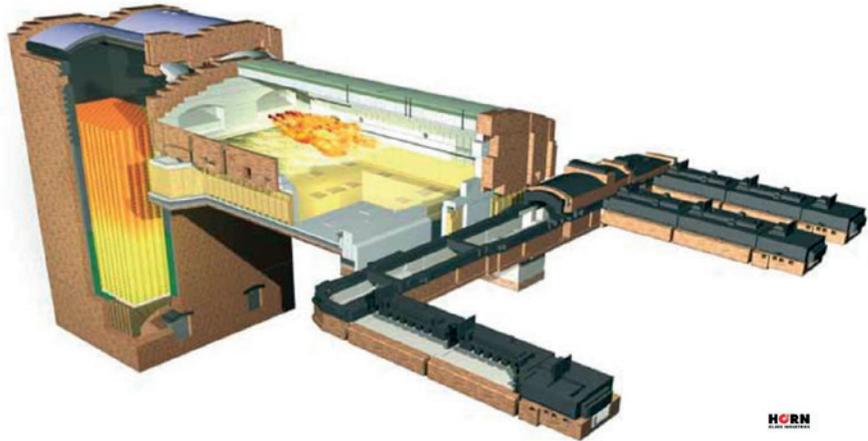


Abbildung 3.5: Behälterglashersteller in Deutschland [4]

Zur Erzeugung von Behälterglas werden in Deutschland ca. 60 Wannen genutzt. Die Mehrheit von ihnen (fast 40) sind regenerativ beheizte U-Flammenwannen (Abbildung 3.6). Dies bedeutet, dass die Verbrennungsluft in der Regel mit Hilfe von Regeneratoren auf über 1300 °C vorgewärmt wird und so die Wärme des Abgases aus der Verbrennung

Abbildung 3.6: Regenerativ beheizte U-Flammenwanne zur Schmelze von Glas [5]



wiedergewonnen und dem Prozess direkt zugeführt wird, um fossile Energieträger einzusparen und die benötigten Prozesstemperaturen zu erreichen. Zur Schmelze von Behälterglas kommen in Deutschland auch einige querbeheizte Regenerativwannen, zwei Brennstoff-Sauerstoff-beheizte Wannen (Oxy-Fuel) und einige wenige Wannen mit rekupe-rativer (Luft-)Vorwärmung zum Einsatz.

Die Beheizung der Glasschmelzwanne erfolgt z. Zt. bei ca. 90 % der Wan-nen mit Erdgas als fossilem Energieträger und zu weniger als 10 % mit Heizöl. Bei vielen Behälterglaswannen (ca. 45) ist eine sog. elektrische Zusatzheizung (EZH) installiert, die genutzt wird, im Mittel ca. 10 % (vari-abel, je nach Glassorte, installierter Leistung und aktueller Tonnage: 5 bis 15 %) der zum Schmelzen benötigten Energie elektrisch als Widerstands-heizung zuzuführen. Vor allem bei farbigen Behältergläsern und bei hohen (spezifischen) Tonnagen wird die EZH genutzt bzw. zur Erzeugung eines qualitativ hochwertigen Produktes technologisch benötigt.

3.5 PROZESSCHARAKTERISIERUNG

Bei der Gemengebereitung werden die mineralischen und chemischen Rohstoffe (im Wesentlichen: Sand, Soda, Kalk und Dolomit sowie Natri-umsulfat) sowie Recycling- und Eigenscherven verwogen, gemischt und bei Bedarf gemahlen, so dass nach dem Schmelzprozess die benötigte chemische Zusammensetzung an Oxidverbindungen in der Schmelze vorliegt.

Bei der Schmelze wird in einem Schmelzaggregat das Gemenge mit Hilfe geeigneter Energieträger (Brennstoffe und/oder elektrische Energie) erschmolzen und eine von Schmelzrelikten sowie Blasen befreite, chemisch homogene Schmelze erzeugt. Diese wird bei der Zuführung in entsprechenden „Kanälen“ thermisch homogenisiert und auf das für die Formgebung benötigte Temperaturniveau bzw. optimalen Viskositäts-bereich eingestellt.

Als Schmelzaggregate kommen in Deutschland vor allem mit Erdgas beheizte Wannenöfen mit regenerativer Luftvorwärmung zum Einsatz, die bei technologischem Bedarf auch mit elektrischer Zusatzheizung (EZH) ausgestattet sind und damit betrieben werden. Bei alleinigem Ein-satz von elektrischer Energie zum Schmelzen von Glas werden sog. voll-

elektrische Schmelzwannen (VES-Wannen) eingesetzt. Außerdem wird „reiner“ Sauerstoff als Oxidatormedium für Brennstoffe (Oxy-Fuel-Wannen) an Stelle von Luft und in wenigen Fällen alternative Konzepte wie Drehrohr- und Kupolöfen zum Schmelzen von Glas genutzt.

Die Formgebungsmethode ist über das Glasprodukt vorgegeben. Behälterglas wird zum größten Teil mit Hilfe von Individual-Section-Maschinen (IS-Maschinen: parallel geschaltete Formgebungseinheiten) nach einer Portionierung mit Hilfe eines Tropfenschnittes ausgeformt. Flachglas wird überwiegend als sog. Floatglas in einer Floatkammer gezogen bzw. gegossen. Bei Faserwerkstoffen (Glaswolle und -schnüre sowie -gewebe oder Isolierglasfaser) werden nach einem Zerfaserungsprozess die Fasern weiterverarbeitet. Für die Herstellung von Rohren und anderen Produkten werden spezielle Formgebungsverfahren genutzt.

Auf die Formgebung folgt eine Temperaturbehandlung in entsprechenden Kühl- bzw. Temperöfen, um die bei der Formgebung erzeugten mechanischen Spannungen und Verletzungen in der Oberfläche abzubauen bzw. auszuheilen oder eine Nachbehandlung vorzunehmen.

Nach einer Qualitätsprüfung der Glasprodukte auf Fehler aus der Schmelze oder Formgebung werden diese meist verpackt und an den Kunden ausgeliefert, veredelt oder in manchen Fällen als Halbzeug weiteren Verarbeitungsschritten zugeführt.

3.5.1 SCHMELZAGGREGAT

Grundsätzlich können folgende Arten von Glasschmelzaggregaten unterschieden werden:

- Hafenöfen für kleine Produktionsmengen (< 1 t/d) mit zyklischer diskontinuierlicher Betriebsweise. Hafenöfen werden mit fossilen Brennstoffen oder (voll-)elektrisch beheizt.
- Wannenöfen für geringe Tagestonnagen (< 10 t/d) mit fossilen Brennstoffen beheizt, meist kontinuierlich betrieben.
- Wannenöfen für Produktionsmengen zw. 10 und 1.000 t/d, mit Brennstoffen (in Deutschland vor allem Erdgas) beheizt, mit Luft als Oxidator und einer regenerativen oder rekuperativen Luftvorwärmung im kontinuierlichen Dauerbetrieb. Bei Wannen mit fast reinem Sauerstoff als Oxidator ist dessen Vorwärmung meist nicht üblich.
- Voll elektrische Schmelzwannen, bei denen die elektrische Energie direkt in der Glasschmelze durch Ohm'sche Widerstandserwärmung freigesetzt wird, und die im kontinuierlichen Betrieb gefahren werden. In Deutschland sind die bestehenden vollelektrischen Schmelzaggregate für eine maximale Tonnage von unter 10 t/d bis ca. 50 t/d ausgelegt. Die weltweit größten vollelektrisch betriebenen Wannen haben eine Tagestonnage von knapp über 200 t/d.

Das Schmelzaggreat hat anteilig einen großen, meist den größten Anteil am Energieverbrauch des Glasherstellungsprozesses. Der statistische Energiebedarf (Energieverbrauch an Endenergie pro t verkaufsfähiges Glas) zur Herstellung von Glas in Deutschland liegt seit Jahren bei ca. 2,5 kWh/kg ($\approx 9,0$ MJ/kg) verkaufsfähiges Glas.

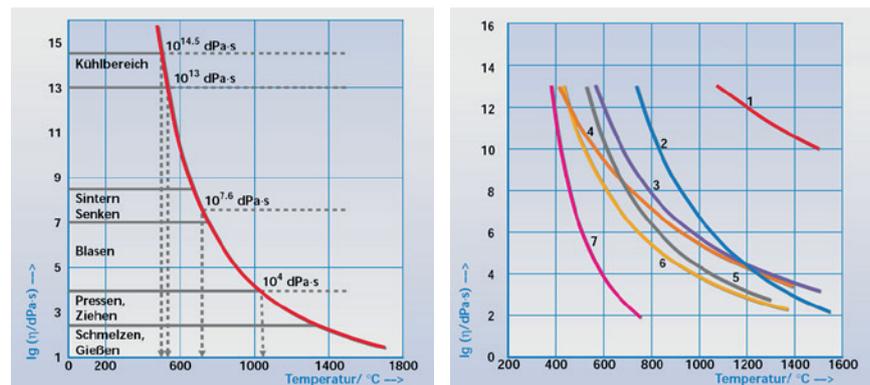
3.5.2 TEMPERATUR UND VISKOSITÄT

Die Temperaturen, die bei den einzelnen Prozessschritten erreicht werden müssen, um ein verkaufsfähiges Glasprodukt zu erzeugen, sind in erster Linie durch die Chemie des Glases, den Formgebungsprozess und die Qualitätsanforderungen an das Produkt vorgegeben. Je höher die zu erreichenden Temperaturen sind, desto höher ist der Bedarf an Energie. Bei thermodynamischen Betrachtungen (wie z. B. Energiebilanzen) stimmen die dabei erfassten Temperaturen an den Bilanzgrenzen (= „Übergabestellen“ zwischen den einzelnen betrachteten Prozessschritten) selten mit den prozessbedingten (Maximal-)Temperaturen überein.

Die physikalische Größe, die hier abhängig von der Glaschemie Auskunft gibt über die zu erreichenden (Prozess-)Temperaturen, ist die Viskosität der Glasschmelze. Der Zusammenhang zwischen Viskosität einer Schmelze und der Temperatur ist in Abbildung 3.7 prinzipiell aufgezeigt. Der Einfluss der Glaszusammensetzung auf die Viskositäts-Temperatur-Kurve ist in Abbildung 3.8 exemplarisch für einige typische Glasarten dargestellt.

Abbildung 3.7 (links): Viskositäts-Temperatur-Verlauf einer Glasschmelze mit Benennung typischer Viskositätsbereiche oder -punkte zur Herstellung von Glas, wobei die Temperaturabhängigkeit der Viskosität grob das Verhalten sogenannter Massengläser (Kalk-Natron-Silicatglas) wiedergibt. [6]

Abbildung 3.8 (rechts): Viskositäts-Temperatur-Verhalten bei unterschiedlicher Glaschemie. (1: Kieselglas; 2: Erdalkali-Alumino-Silicatglas; 3: Borosilicatglas A; 4: Borosilicatglas B; 5: Kalk-Natron-Silicatglas; 6: Bleiglas; 7: Lotglas) [7]



Folgende wichtige Viskositätseckpunkte und die damit verbundene Temperatur bei gegebener Glaszusammensetzung müssen erreicht werden, um die Herstellung verkaufsfähiger Produkte in möglichst kurzer Zeit und mit so geringem Energieaufwand wie möglich sicher zu stellen:

- Schmelze** Temperatur von $\log(\text{Viskosität in dPa}\cdot\text{s}) \approx 1,5$, um in möglichst kurzer Zeit eine blasenfreie und homogene Glasschmelze zu erhalten
- Formgebung** je nach Formgebungsprozess:
 - Tropfenschnitt bei Behälterglas bei der Temperatur von $\log(\text{Viskosität in dPa}\cdot\text{s}) \approx 3$;
 - Übergabe der Schmelze ans Floatbad bei Temperatur von $\log(\text{Viskosität in dPa}\cdot\text{s}) \approx 2$ bis 2,5;
 - Glasguss beim Walzprozess: Temperatur von $\log(\text{Viskosität in dPa}\cdot\text{s}) \approx 3,2$;
- Tempern** je nach Vorgehensweise beim Tempern bzw. Kühlen (Geschwindigkeit bzw. Dauer des Kühlprozesses) und je nach effektiver Produktdicke sowie abhängig von den zulässigen Restspannungen im Produkt: Temperatur von $\log(\text{Viskosität in dPa}\cdot\text{s}) \approx 13$ bis 14,5.

3.5.3 SCHMELZPROZESS

Die Aufgabe des Schmelzprozesses ist es, dem Formgebungsprozess eine thermisch und chemisch homogene Schmelze, ohne kristalline oder gasförmige Einschlüsse bzw. Fremdkörper und mit einer für den Formgebungsprozess geeigneten Temperatur (besser Viskosität) zur Verfügung zu stellen.

Auf dem Weg von den Rohstoffen bis zur für den Formgebungsprozess optimalen Schmelze müssen in möglichst kurzer aber ausreichender Zeit mit möglichst geringem Energieaufwand folgende Prozessschritte durchlaufen werden:

- Erwärmen und Aufschmelzen des Gemenges
- Abgabe der Gemengegase aus carbonatischen und sulfatischen sowie sulfatischen Rohstoffen
- Auflösung schwer löslicher Gemengebestandteile (Restquarzauflösung)
- Blasenfreiheit der Schmelze bei der Formgebung sicherstellen (Läuterung)
- Sicherstellung der thermischen und chemischen Homogenität der Schmelze bei der Übergabe an den Formgebungsprozess

3.5.4 WANNENLAUFZEIT – KONTINUIERLICHER PRODUKTIONSPROZESS

Der Glasherstellungsprozess läuft, nach dem Anfahren (Aufheizen, Erwärmen) der Glasschmelzwanne und der Zugabe von Scherben zur ersten Füllung des Glasbades, kontinuierlich durch und sollte ohne Unterbrechung in Betrieb gehalten werden. Dies bedeutet, dass 24 Stunden am Tag, 7 Tage die Woche, 52 Wochen im Jahr und das je nach Art des Schmelzaggregates, der Glaschemie, den Anforderungen an die Produktqualität, der Fahrweise des Schmelzaggregats und des eingesetzten Feuerfestmaterials die Anlage über bis zu 15 Jahre ohne Unterbrechung der Energiezufuhr betrieben wird (sog. Wannenlaufzeit). Erst dann wird das Glasschmelzaggregat außer Betrieb genommen, es findet ein Wechsel bzw. eine Erneuerung der feuerfesten Auskleidung statt und der Produktionsprozess kommt zum Erliegen. Dies ist dann eine sogenannte Wannen(haupt)reparatur.

Ein unerwünschter bzw. ungeplanter Stillstand und Abkühlen des Schmelzaggregates oder anderer Schmelze führender Teile (mit Erstarren der Schmelze) würde zu dessen Zerstörung und zum völligen Zusammenbruch der Produktionskette führen.

3.5.5 ENERGIEFLUSSBILD EINER TYPISCHEN GLASSCHMELZWANNE ZUR BEHÄLTERGLASERZEUGUNG

Seit der Einführung der heutigen Glasschmelzaggregate in Deutschland vor 150 Jahren [8] durch Friedrich Siemens ist die regenerative Wärmerückgewinnung der Abwärme der Abgase zur Vorwärmung der Verbrennungsluft ein wesentlicher Bestandteil des Aggregates. Wie in Abbildung 3.9 dokumentiert, wird rund $\frac{1}{3}$ der benötigten Energie zur Schmelze von Glas bei heutigen Behälterglaswannen durch die Wärmerückgewinnung zur Verfügung gestellt und damit der Bedarf an (meist fossilen) Energieträgern entsprechend vermindert.

Abbildung 3.9: Sankey-Diagramm des Energieflusses einer typischen Behälterglaswanne

Gesamtwirkungsgrad der Gesamtanlage nach ISO 13579-1:2013(E)

Energieströme in kWh pro t geschmolzenes Glas

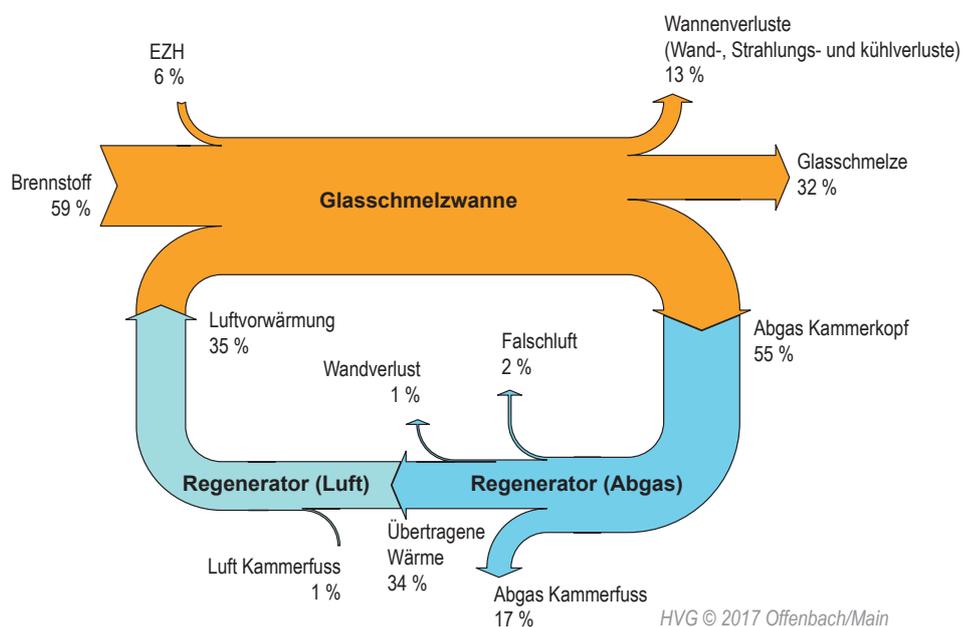
Bezugstemperatur für Energie ist 0 °C

Bezugstemperatur für Volumen ist 0 °C

Bezugsdruck für Energie und Volumen ist 1013,25 hPa

Heizwert des Brenngases berechnet nach DIN EN

ISO 6967:2005



Bemerkenswert ist auch, dass bei einem großen Teil (rund drei Viertel) der Behälterglaswannen neben dem fossilen Energieträger gleichzeitig elektrische Energie dem Schmelzaggregat zugeführt wird (im Mittel ca. 10 % der fossilen Energie). Dies ist meist dann der Fall, wenn damit die Leistung (Tonnage) der Anlage den Bedürfnissen (des Formgebungsschrittes) angepasst werden kann, wenn Farbgläser erschmolzen werden, die eine schlechteren Wärmeeintrag aus dem Verbrennungsraum in die „unteren“ Bereiche des Glasbades zeigen, und/oder wenn die Produktqualität bzw. das Alter der Anlage es verlangt.

3.6 METHODIK DER DATENERHEBUNG

Zur Ermittlung der grundlegenden Daten wurden von Seiten der HVG alle verfügbaren Quellen (Forschungsberichte der HVG, Jahresberichte des BV Glas, Daten des statistischen Bundesamtes, Messungen im Rahmen von Forschungsvorhaben und Messberichte der Emissionsmessstelle der HVG sowie Fortbildungsveranstaltungen der HVG und DGG) herangezogen und entsprechend aufbereitet bzw. anonymisiert.

Bei Veranstaltungen der DGG, HVG und des BV Glas wurden in persönlichen Gesprächen mit Kollegen aus der Glasindustrie Detailfragen zur Hemmnisanalyse und grundlegende Fragen zum Flexibilitätspotential besprochen sowie allgemein das Thema betreffende Fragestellungen diskutiert. Den Kollegen aus der Glasindustrie, die sich hier beteiligt bzw. engagiert haben, sei hiermit herzlichst gedankt.

Ein besonderer Dank gilt auch den Mitarbeitern der Schott AG in Mainz, die für ein Interview zur Hemmnisanalyse und Erhebung des Flexibilitätspotentials aus der Sicht eines Spezialglasherstellers und dessen Besonderheiten zur Verfügung standen.

3.7 FLEXIBILISIERUNG DES ANTEILS AN ELEKTRISCHER ENERGIE BEI DER BEHÄLTERGLASHERSTELLUNG

3.7.1 IDENTIFIKATION WESENTLICHER HEMMNISSE – METHODIK UND DATENGRUNDLAGE

Die Ermittlung der technischen Restriktionen und der Hemmnisse wurde nach der oben beschriebenen Methodik durchgeführt. Als Grundlage dienen drei Experteninterviews:

- die von DLR und FfE mit Vertretern der SCHOTT AG durchgeführte Befragung bei Beteiligung der HVG zur einführenden Erläuterung glastechnischer Grundlagen;
- das von DLR, WI, FfE und TUM mit der Hüttentechnischen Vereinigung der Deutschen Glasindustrie e.V. (HVG) angesetzte Gespräch zu den Grundlagen und Besonderheiten der Behälterglasherstellung;
- sowie das vom WI mit Experten des Gas- und Wärme-Instituts (GWI) in Essen geführte Interview.

Das Interview im Hause der SCHOTT AG beinhaltete die Identifikation der wesentlichen Prozesse und technischen Hemmnisse der Glaschmelze, welche im Interview mit der HVG im Detail aufgegriffen und in Bezug auf die Behälterglasindustrie detaillierter diskutiert wurden. Bei der Betrachtung der Behälterglasproduktion konnte der Schmelzprozess als Flexibilitätsoption identifiziert werden. Im HVG-Interview wurden ebenfalls nicht-technische Restriktionen für Flexibilität angeschnitten bzw. diskutiert wie beispielsweise organisatorische Rahmenbedingungen, Schicht- und Reparaturplanung. In dem GWI-Interview lag der Fokus auf einer energetischen Bilanzierung und der Funktionsweise verschiedener Brenner bzw. Verbrennungstechnologien, Abgaswärmerückgewinnungsanlagen sowie Glaswannen. Daneben wurden alternative Routen andiskutiert, wie beispielsweise der (teilweise) Ersatz von Erdgas durch Biogas als Energieträger bei der Schmelze von Glas.

3.7.2 MARKTUMFELD UND KUNDENBEZIEHUNGEN

PRODUKTVIELFALT

Behältergläser zählen – zusammen mit den Wirtschaftsgläsern (z.B. Trinkgläser, Schalen, Karaffen) – zu der Gruppe der Hohlgläser, also jenen Gläsern, die aufgrund ihrer Form befüllt werden können. Als Verpackungsglas werden Behältergläser in Form von Flaschen und Konserven (insbesondere für Lebensmittel) und Flakonagen (z.B. für Parfum) oder für andere kosmetische und medizinische Artikel hergestellt, wobei die Gläser bezüglich der Zusammensetzung meist der Gruppe der Kalk-Natron-Silicatgläser zugeordnet werden können.

Wesentliche Merkmale von Glasverpackungen sind für den Anwender die Farbe (insbesondere Schattierungen von Weiß, Grün und Braun), ihre mechanische Festigkeit sowie ihre chemische Beständigkeit gegenüber dem Füllmittel (Lebensmittelechtheit). Für den Glashersteller spielen die Eigenschaften bei der Produktion (Viskositäts-Temperatur-Verhalten, Schmelz- und Läuterverhalten, Verarbeitbarkeit bzw. Verhalten bei der Formgebung) eine ausschlaggebende Rolle. Die jeweilige Glaschemie der Behältergläser ergibt sich aus der Schnittmenge dieser beiden Anforderungsprofile.

KONJUNKTUR UND AUSLASTUNG DER BRANCHE

Die Hohlglasproduktion (Behälter- und Wirtschaftsglas) liegt seit knapp zehn Jahren mehr oder weniger konstant bei vier Millionen Tonnen pro Jahr. Kennzeichnend ist eine hohe Recyclingquote. Der Anteil an Recyclingscherben an den Eingangsstoffen liegt bei der Behälterglasherstellung bei ca. 60 bis 90 %, je nach Verfügbarkeit von qualitativ guten und farbreinen Scherben sowie der zu erzielenden Glasfarbe. Die Branche war in den letzten Jahren relativ konjunkturstabil, lediglich rund um die Weltwirtschaftskrise 2008/2009 lag die Produktion deutlich niedriger (s.a. Abbildung 3.3).

Bei den geringen Erlösen pro Stück, die mit Verpackungsglas erzielbar sind, und dem relativ hohem Raumgewicht und den damit verbundenen höheren Transportkosten ist ein weiter Weg zwischen Glashersteller und Anwender bei Verpackungsglas nicht rentabel. Auch dies begünstigt die eher lokale, über Deutschland verteilte Standortstruktur (s.a. Abbildung 3.5), bei der die Glasproduktion so nahe wie möglich am Abnehmer stattfindet.

Die „durchschnittliche“ Tonnage von Behälterglaswannen (unter Berücksichtigung der Jahresproduktion an Behälterglas und der Anzahl der Schmelzaggregate) liegt bei etwa 180 t verkaufsfähiges Behälterglas pro Anlage und Tag. Rechnet man dies auf die geschmolzene Tagestonnage um, so ergibt sich eine statistische „mittlere“ Schmelzleistung von ca. 200 t/d. Die Schmelzleistung einer Glasschmelzwanne und die Auslegung der Formgebungsmaschinen sind die kapazitätsbestimmenden Einheiten im Gesamtprozess der Behälterglasherstellung. Die Anzahl der Produktionseinheiten pro Zeiteinheit ergibt sich dann im Wesentlichen aus der Artikelgröße und dem Artikelgewicht sowie der Auslegung der Formgebungsmaschinen (Einfach-, Doppel-, Dreifach- oder Vierfachtropfen; Anzahl der parallel geschalteten Stationen einer IS-Maschine; Abkühlgeschwindigkeit der Glasmasse bei der Formgebung bis zur Formstabilität; ...).

ZUKAUFMÖGLICHKEITEN UND LIEFERFRISTEN

Die Möglichkeit des Zukaufs von Zwischenprodukten des Herstellungsprozesses von Behälterglas zum Ausgleich von eventueller Minderproduktion auf Grund der Ausführung von Flexibilitätsmaßnahmen entfällt, da der Gesamtprozess in der Behälterglasindustrie nicht teilbar bzw. unterbrechbar ist und am Ende des Prozesses meist das Fertigprodukt (Flasche, Konservenglas, Flakon o. ä.) steht und kein Zwischenprodukt.

3.7.3 ORGANISATORISCHE HEMMNISSE

AUFTRAGS- UND SCHICHTPLANUNG

Wie oben beschrieben, müssen die Schmelze führenden Teile (die Glasschmelzanlage selbst sowie der nachfolgende Speiser (Feeder) ständig auf Temperatur gehalten werden. Der Herstellungsprozess von Behälterglas wird daher ununterbrochen im Dreischicht-Betrieb, 7 Tage die Woche, 365 Tage im Jahr und über 10 bis zu 18 Jahre ohne Unterbrechung gefahren. Konjunktur bzw. Jahreszeitlich bedingt und abhängig vom Produkt und der Auslegung der Formgebungsmaschine liegt die Auslastung der Prozesskette üblicherweise zwischen 80 bis 100 %.

Der Formenwechsel in den Maschinen, bedingt durch Verschleiß der Formen und/oder Produktwechsel, geschieht im Normalfall täglich, meist am Beginn der Frühschicht (6 bis 8 Uhr) und benötigt je nach Größe der Formen, Maschinen und anderer Parameter üblicherweise 30 bis 60 (90) Minuten. In dieser Zeit wird die Schmelze nicht (vollständig) gestoppt sondern meistens ein verringerter Schmelzstrom an den Maschinen vorbei in den Keller geleitet und Eigenscherben erzeugt, um die Entstehung von Glasfehlern zu verhindern bzw. vermindern.

Die Produktion wird vom Verkauf normalerweise im Voraus geplant, wobei es auch zu kurzfristigen Änderungen bzw. Anpassungen auf Grund von Lieferterminen oder Kundenwünschen kommen kann. Die Produktionsplanung für Samstag und Sonntag erfolgt mit dem Ziel einer möglichst ruhigen und störungsfreien Produktion. Die Möglichkeit zu kurzfristigen Änderungen und Anpassungen der Tonnage auf Grund von Flexibilitätsanfragen bzw. -optionen entfällt damit fast grundsätzlich im (Behälter-) Glasherstellungsprozess.

Wie oben beschrieben, werden die Glasschmelzwannen nach Inbetriebnahme im 3 x 8 Stunden-Schichtbetrieb rund um die Uhr betrieben. Während man in der Spät- und vor allem in der Nachschicht versucht, den Prozess möglichst ruhig zu fahren, um den Personalaufwand so gering wie möglich zu halten, werden die anfallenden Wartungs- und Reparaturarbeiten sowie auch der Formenwechsel so weit wie möglich in der Frühschicht durchgeführt.

GEPLANTE REVISIONEN

Reparatur- und Wartungsarbeiten an den die Glasschmelze führenden Bauteilen (Glasschmelzwanne, Arbeitswanne, Feeder bzw. Speiser) werden üblicherweise im laufenden Betrieb durchgeführt (sog. Heißreparaturen).

Je nach Glasart, Qualitätsanforderungen an das Glasprodukt, verwendeten Materialien beim Wannenbau, Belastung und Fahrweise der Wanne u.v.m. wird bei der Behälterglasfertigung nach 10 bis 18 Jahren eine sog. Hauptreparatur des Schmelzaggregates vorgenommen. Erst dann wird die Energiezufuhr gestoppt, das Schmelzaggregat kalt gefahren und die feuerfeste Auskleidung der Glasschmelze führenden Teile und den dazugehörigen Verbrennungsräumen erneuert.

Eine ungeplante oder geplante Abschaltung der Energiezufuhr würde nach kurzer Zeit (je nach Anlage bzw. Anlagenteil: \geq ca. 30–60 Min.) zur Abkühlung und Erstarrung der Schmelze führen und damit zum Totalausfall und Zerstörung der Schmelzanlage sowie der Feeder.

3.7.4 TECHNISCHES FLEXIBILITÄTSPOTENZIAL UND HEMMNISSE DER BEHÄLTERGLASHERSTELLUNG

PROZESSBESCHREIBUNG

Basisdaten der Behälterglasindustrie und eine detaillierte Prozessbeschreibung sind den Kapiteln 3.4 und 3.5 zu entnehmen. Die Produktentnahme (geschmolzene Tonnage) wird normalerweise konjunktur- und produktbedingt im Auslastungsbereich von 80 bis 100 % der maximalen Tonnage schwanken, wobei die Auslegung der Schmelzaggregate bezüglich der energetischen Optimierung meist für eine Auslastung von 80 bis 90 % optimal ausgelegt sind.

Zum Schmelzen wird als Energieträger überwiegend Erdgas eingesetzt und zu kleinen Anteilen zusätzlich auch Strom als Energieträger genutzt. Dieser wird mittels sog. EZH, im Englischen auch „electric boosting“ genannt, ortsspezifisch in die Wanne eingebracht. Der Einsatz der elektrischen Energie hängt u.a. von der Glasart und der Glasfarbe (Weiß-, Grün- und Braunglas) ab. Strombasierte Flexibilisierungen, und damit positive wie negative elektrische Laständerungen im Schmelzprozess, sind individuell für jede Anlage zu prüfen, da Veränderungen in der Wärmezufuhr Auswirkungen auf die Tonnage und vor allem auf die Produktqualität haben können.

EINBETTUNG IN DIE PROZESSKETTE

Nach dem Schmelzen in der Wanne wird das Glas kontinuierlich über den Speiser (Feeder) an die formgebenden Maschinen übergeben. Im Speiser wird die Schmelze mittels Brenner thermisch homogenisiert, um eine konstante Temperatur- und damit Viskositätsverteilung zu erhalten. In der anschließenden Formgebung werden die Behältergläser mit unterschiedlichen Verfahren für Enghals- und Weithalsgläser hergestellt. Einer Glaswanne sind i.d.R. mehrere Formgebungsmaschinen für Behälter zugeordnet, die wiederum aus einer Vielzahl von einzelnen Produktionssträngen (Stationen) bestehen. Nach der Formgebung folgt oft die Heißendvergütung. Danach muss das Produkt im Kühllofen (Temperofen) – einem exakten Temperaturprofil folgend – kontrolliert auf ca. 300 °C abgekühlt werden. Trotz des Namens „Kühl“ wird im Kühllofen nicht etwa aktiv gekühlt, sondern durch Gas- oder Elektroheizung so viel Wärme eingebracht, dass das Glas langsam und definiert abkühlt, so dass thermische Spannungen im Glas abgebaut werden. Der Prozess des

Spannungsabbau ist bei etwa 300 °C abgeschlossen. Der letzte Produktionsschritt vor der Verpackung der Behältergläser ist die Kaltendvergütung mit der anschließenden Qualitätsprüfung, welche die Prüfung auf Einschlüsse sowie Einhaltung der geometrischen Abmessungen beinhalten. Dieser Verfahrensschritt ist energetisch gesehen unbedeutend, aber wichtig für die Produktqualität.

VERNETZTE PRODUKTE

Beim Herstellungsprozess von Behälterglas werden kaum Halbzeuge produziert – anders als in anderen Branchen wie z.B. der Stahlherstellung – sondern es steht am Ende des Produktionsprozesses das für den Kunden nutzbare Endprodukt zur Verfügung¹. Behälterglas verlässt die Produktion bereits in seiner endgültigen Form und unterliegt in den meisten Fällen auch keiner Weiterverarbeitung mehr (die Etikettierung und ähnliche Prozesse übernimmt meist der Kunde [Abfüller]). Auch eine Segmentierung der aktuellen Prozesskette und -abläufe ist nicht möglich ohne Störung des gesamten Prozesses und Verminderung der Produktqualität.

¹ Seltene Ausnahme sind z.B. Glasrohre für die Pharmaziebehälterherstellung (Ampullen) oder Glasfrühen, die z.B. zur Herstellung von Filtermaterial eingesetzt werden können.

TECHNISCHE LIMITATIONEN IM HINBLICK AUF LASTFLEXIBILISIERUNG

A. TEMPERATUR-ZEIT-REGIME

Beim Schmelzprozess in der Glasschmelzwanne durchläuft das zugeführte Gemenge die fünf Phasen der Glasschmelze:

1. Gemengeerwärmung
2. Gemengereaktion
3. Restquarzauflösung
4. Läuterung
5. Abstehen und thermisches Homogenisieren

Die Phasen sind über den Wannenvorlauf in Abbildung 3.10 exemplarisch, von der Zugabe des Gemenges bis zur „fertigen“ Schmelze, dargestellt. In der Realität vermischen und verwischen die im Bild genannten Bereiche sich im Schmelzaggregat und eine so klare räumliche Zuordnung ist nur bedingt möglich.

Die erfolgreiche Glasproduktion erfordert ein exaktes Einstellen der Viskosität in der Schmelze und damit eine genaue Kenntnis der herrschenden Temperaturen, die kontinuierlich überwacht werden [9]. Der Spielraum für Temperaturschwankungen im Prozess ist mit maximal ± 5 K gering und führt bei Überschreitung zur Abnahme der Produktqualität und zu Störungen im Formgebungsprozess.

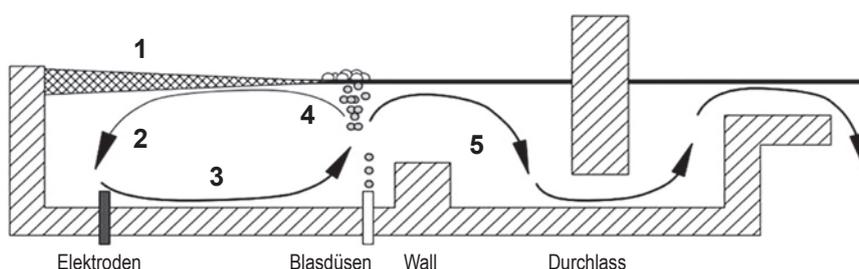


Abbildung 3.10: Strömungsprofil in der Schmelzwanne mit Schmelzphasen

Wie in Abbildung 3.10 angedeutet, bildet sich aufgrund von Temperaturunterschieden in der Schmelzwanne idealer Weise ein Strömungsprofil aus. Dieses sorgt für das Aufschmelzen des Gemenges von unten, wobei die Temperatur etwas abnimmt, so dass anschließend die Schmelze absinkt. Am sog. „Hot Spot“ wird der Rauschmelze mittels Wärmestrahlung und/oder die elektrische Zusatzheizung wieder Energie zugeführt und diese erwärmt, so dass die Schmelze, manchmal auch durch sog. Bubbles mechanisch unterstützt, wieder aufsteigt. Durch die chemischen Reaktionen während der Schmelze entstehen Gase (überwiegend CO_2 , aber meist auch SO_3 und O_2), die im weiteren Prozess unerwünscht sind und aus der Glasschmelze entfernt werden müssen. Es findet die sogenannte Läuterung (Phase 4) statt. Für diesen Prozess ist die (entsprechend niedrige) Viskosität besonders entscheidend, da die Gasblasen sonst nicht „agglomerieren“ und zu langsam vertikal aufsteigen würden. Die blasenfreie und chemisch homogenisierte Glasschmelze wird nun auf dem Weg zur Formgebung thermisch homogenisiert, wobei dieser Prozessschritt in der Wanne (Phase 5) eingeleitet und im Feeder abgeschlossen wird.

Das eingebrachte Gemenge benötigt für den Durchlauf aller 5 Phasen bei Behälterglas zwischen ca. 5 (schnellste Strömungskennlinie) bis durchschnittlich 12 Stunden, bei einer maximalen Verweilzeit von ca. 24 Stunden (langsamste Strömungskennlinie). Als Grundaussage kann man annehmen, dass der Inhalt einer Schmelzwanne bei der Behälterglasfertigung etwa einmal am Tag erneuert wird.

B. EINFLUSS DER ELEKTRISCHEN ZUSATZHEIZUNG (EZH)

Die chemische Zusammensetzung des Glases und seine Absorptionseigenschaften bezüglich elektromagnetischer Strahlung (Wärmestrahlung) bestimmen im Wesentlichen den Bedarf einer elektrischen Zusatzheizung. Wird die Wärmestrahlung der „Flamme“ stark absorbiert und die tiefer liegenden Bereiche der Schmelze erhalten nur einen geringen Anteil der Strahlungsenergie, kann die benötigte Energie mit Hilfe der EZH an dieser Stelle eingebracht werden. Wobei zu beachten ist, dass die Absorptionseigenschaften des semitransparenten Mediums Glasschmelze (im Wellenlängenbereich des Sichtbaren „erkennbar“ auf Grund der Farbe des Glases; im IR durchaus anderes Verhalten als im sichtbaren Wellenlängenbereich möglich) sich mit den bei der Schmelze einstellenden Temperaturen verändert und die Glasfarbe des Glasproduktes daher nur bedingt das Absorptionsverhalten der Schmelze bei unterschiedlichen Temperaturen wieder gibt.

So muss beispielsweise beim sog. Weißglas meist nicht elektrisch zugeheizt werden, da auf Grund der geringeren Absorption das gesamte Glasbad von der Wärmestrahlung aus dem Verbrennungsraum durchdrungen wird. Allerdings kann z.B. auch bei der Schmelze von Weißglas die EZH zur Steigerung des Durchsatzes verwendet werden.

Erfahrungsgemäß kann die zugeführte elektrische Energie zumindest bis zu einem gewissen Grad (bis zu ca. 33 % der installierten elektrischen Leistung) teilflexibilisiert werden, wenn die Glasfarbe dies erlaubt oder keine Verringerung der Tonnage damit verbunden ist. Um die für die Erzeugung eines qualitativen Produktes nötigen Temperatur zu halten, muss die flexibilisierte elektrische Leistung durch eine Anpassung des Erdgasverbrauchs substituiert bzw. ausgeglichen werden. So bleibt der über alle Energieträger summierte Energieverbrauch mehr oder weniger

konstant. Limitiert durch die Glasfarbe kann nicht jede Wanne den elektrischen Bezug gleich stark variieren, zumal die elektrische Leistungsänderung von der Auslastung der EZH und den zulässigen Temperaturschwankungen der Schmelze auf max. ± 5 K begrenzt wird.

Das sich einstellende Strömungsprofil, bei dem ein Teil der Schmelze die Walze ein zweites Mal durchläuft (Umlauf der Walze in ca. 6 Stunden, je nach Anlagengröße und Durchsatz) und eine ungünstige periodische erhöhte Zuführung der EZH im gleichen Rhythmus, kann dafür sorgen, dass die variierende EZH für inhomogene Temperaturprofile verantwortlich ist und Temperaturwellen erzeugt, die sich durch einen zyklischen Einsatz einer Flexibilitätsmaßnahme in einem entsprechenden Aufschwingen der lokalen Glasbadtemperaturen widerspiegeln und damit eine Verletzung der tolerierbaren Temperaturvariationen am Durchlass (Austritt aus der Glasschmelzwanne) eintritt.

C. VOLL ELEKTRISCHE SCHMELZE (VES)

Neben den oben beschriebenen, als Hybridsysteme nutzbaren – brennerbeheizten Wannen mit EZH – gibt es auch rein elektrisch (monovalent) betriebene Wannen mit i.d.R. geringerer Kapazität. Da diese Wannen und deren Heizung in Grundlast betrieben werden (müssen), ergibt sich hier praktisch kein Flexibilisierungspotenzial unter der Voraussetzung der Beibehaltung der Tonnage und der Glasqualität.

D. FORMGEBUNG

Die Prozessgeschwindigkeit in der Formgebung kann nicht variiert werden (bestimmender Prozessparameter auf der einen Seite: Kühlgeschwindigkeit/Erstarrungsgeschwindigkeit der Schmelze beim Kontakt mit dem Formgebungsmaterial; auf der anderen Seite: getakteter und verzahnter Ablauf der nachfolgenden Prozessschritte [Transportband von den Stationen zum Kühllofen, Durchlaufzeit im Kühllofen, ...]).

Somit ergibt sich keine Flexibilität auf der Verarbeitungsseite, da die Formgebungsmaschine immer dem Produkt gemäß optimal ausgelastet ist. Auch ein Zu- oder Abschalten von einzelnen Produktionssträngen ist nicht ohne weiteres (ohne Qualitätseinbußen) möglich. Entweder ist die gesamte Formgebungsmaschine „an“ oder „aus“.

Es ist prinzipiell technisch möglich, mit entsprechenden Vorlaufzeiten (mind. ein(ige) Tag(e)) das Produkt und damit die Tonnage über das Produkt so anzupassen, dass nach Austausch der Formensätze ein geänderter Durchsatz und damit verbunden auch Energieverbrauch entsteht. Allerdings lässt sich dies unter Beachtung von Kundenwünschen, Lieferterminen und Qualitätsanforderungen in vielen Fällen aus heutiger Sicht nicht wirklich umsetzen.

E. KÜHLOFEN

Die Beheizung der Kühlöfen kann prinzipiell mit fossilen Brennstoffen oder vollelektrisch erfolgen. Der Energieaufwand für die kontrollierte Abkühlung beträgt bei Behältergläsern im Mittel ca. 10 bis 15 kWh/t, entsprechend ca. 1 % der Energie für die Schmelzwanne.

Eine Umrüstung der Kühlöfen auf rein elektrische Systeme ist technisch möglich, ergäbe aber kein Flexibilisierungspotenzial, da für die Einhaltung der strikten Zeit-Temperatur-Kurve kein Spielraum bezüglich der

Energiezufuhr gegeben ist. Abweichungen von einer gegebenen Abkühlkurve führen zu erhöhten (Rest-)Spannungen im Produkt und zu dessen Zerstörung mit einer möglichen Gefährdung von Verbrauchern (Bsp.: Scherben beim Bruch in der Abfüllanlage könnten in das Gut (Lebensmittel) gelangen; unkontrollierter Bruch beim Verbraucher).

Für eine Hybridisierung der Kühlung und damit verbunden für eine Flexibilisierung der Kühlung ist bei den heutigen Randbedingungen der Kostenaufwand viel zu hoch.

Außerdem werden von der (Behälter-) Glasindustrie entsprechende Bemühungen unternommen, im Sinne der Energieeinsparung Kühlöfen mit der Eigenwärme der Glasprodukte nach der Formgebung bei geeigneten Produkten (Restwärme bei gegebener Wanddicke und Gewicht) zu betreiben und somit mehr oder weniger gänzlich auf eine zusätzliche Beheizung zu verzichten.

3.7.5 ANFORDERUNGSPROFIL 1 – POTENZIALE UND HEMMNISSE

Für eine Flexibilisierung des Einsatzes elektrischer Energie stehen in der Behälterglasindustrie nur begrenzte Möglichkeiten zur Verfügung, da es anders als in vergleichbaren Branchen, wie z.B. bei der Stahlherstellung, so gut wie nie Zwischenprodukte gibt.

Die Anlagen und Prozesse bei der Glasherstellung werden in der Regel kontinuierlich betrieben und sind – auf Grund der Temperatur„empfindlichkeit“ (genauer: der exponentiellen Abhängigkeit der Viskosität von der Temperatur (s. Abbildung 3.7) des Produktionsprozesses – kaum flexibel.

Ferner kann die Glasschmelze nicht beliebig erwärmt und abgekühlt werden, da dann nicht mehr das Produkt mit seinen gewünschten Eigenschaften und in der verlangten Qualität erzielbar ist. Eine übermäßige Erwärmung führt zu lokal erhöhter Verdampfung die mit chemischer Inhomogenität einhergeht und damit zu Glasfehlern (Schlieren) führt. Eine Unterkühlung der Schmelze führt dazu, dass bei Unterschreitung der Keimbildungstemperatur bzw. bei Erreichen des Bereiches des Kristallwachstums die Gefahr von Kristallisationsprozessen besteht, die zu Fehlern (kristallinen Einschlüssen) im Produkt führen können. Der gesamte Herstellungsprozess wird daher kontinuierlich, bei entsprechend konstant hohen Temperaturen betrieben und ist auf ein optimiertes Temperatur-Zeit-Regime ausgelegt, um in so kurzer Zeit wie möglich und mit so geringem Energieaufwand wie nötig ein Qualitätsprodukt zu erzeugen.

Wird die EZH als Instrument der Flexibilisierung herangezogen, so muss durch (zeitnahen) Ausgleich mit Hilfe andere Energieträger dafür gesorgt werden, dass die Temperaturen im Prozess „konstant“ (innerhalb der tolerierbaren Schwankungsbreite von wenigen Kelvin) bleiben. Bei Erhöhung der elektrischen Last kann bzw. muss also z. B. der Erdgasverbrauch entsprechend erniedrigt und bei Verminderung der elektrischen Last muss entsprechend erhöht werden. Dabei ist zu beachten, dass der effektive Energieeintrag in die Glasschmelze bei unterschiedlichen

Energieträgern unterschiedlich gut ist und an verschiedenen Orten stattfindet (EZH: Freisetzung der Energie in der Schmelze; Verbrennung: Eintrag der Wärmestrahlung (von oben) aus dem Verbrennungsraum in die Schmelze, wobei die Eindringtiefe von den optischen Eigenschaften der Schmelze (Transmission) bei der gegebenen Temperatur und Wellenlänge abhängt).

Geht man von der installierten elektrischen Leistung der elektrischen Zusatzheizung in der Behälterglasindustrie aus, dann beträgt diese beim Behälterglas in Deutschland ca. 75 MW.

Es ist jedoch zu bedenken, dass zum Einen nicht alle Zusatzheizungen gleichzeitig im Einsatz sind und zum Andern nur ein Teil der gerade genutzten Last nutzbar ist (Teilerhöhung bzw. -erniedrigung). Gründe hierfür sind u.a.:

- EZH in Volllast:
 - keine Erhöhung möglich;
 - keine Minderung möglich, da technologisch benötigt um erforderliche Tonnage zu schmelzen und/oder Farbglas einen ausreichenden Energieeintrag von oben (Verbrennungsraum) in tiefere Badbereiche nicht erlaubt und daher die Energie „von unten“ benötigt wird.
- Wannen werden repariert (bei ca. 60 Wannen sind bei einer Laufzeit zw. 10 und 20 Jahren rein rechnerisch (bei Gleichverteilung) 3 bis 6 Wannen pro Jahr in Revision (Hauptreparatur). Die Stillstandszeit für eine Hauptreparatur schwankt erfahrungsgemäß je nach Umfang der Arbeiten und abhängig von ökonomischen Randbedingungen zwischen ca. 6 Wochen und 3 Monaten.
- Die EZH ist nicht eingeschaltet, da bei der erschmolzenen Glasfarbe (weiß) der Einsatz der EZH technologisch und/oder ökonomisch nicht sinnvoll ist.

Wenn die EZH im Einsatz und eine Flexibilisierung möglich ist, kann in den allermeisten Fällen nicht einfach ab- bzw. zugeschaltet werden, ohne dass sich eine Störung der Produktion einstellt, auf Grund der oben beschriebenen Randbedingungen. Daher werden meist nur geringfügige Änderungen im Eintrag der elektrischen Energie (nach Aussagen der Glashersteller: ca. $\frac{1}{3}$ bis $\frac{1}{4}$ des aktuellen Energieeintrages der EZH) vorgenommen. Im Rahmen von DSM wird die EZH auch heute schon genutzt. Es liegen also entsprechende Erfahrungen bei einigen Glasherstellern schon vor. Als realisierbares Potenzial ergeben sich somit ca. 25 MW_{el}, die durch die Behälterglasherstellung zur Verfügung gestellt werden können.

Prinzipiell muss eine elektrische Laständerung mit der Substitution durch fossiler Energieträgern einhergehen, mit Ausnahme von sehr kurzen Flexibilisierungsmaßnahmen, die weniger als 5 Minuten andauern. Bei positiver wie negativer elektrischer Leistungsänderung gilt es, die maximale Schwankungsbreite der Temperatur von etwa ± 5 K über alle prozessrelevanten Kontroll- und Messstellen einzuhalten.

3.7.6 ANFORDERUNGSPROFIL 2 UND 3 – POTENZIALE UND HEMMNISSE

Vom Produktionsprozess der Glasherstellung mit Schmelze und Formgebungsschritt als nicht trennbare Abfolge ist eine Lastreduktion bzw. -erhöhung über mehrere Stunden sowie Tage nicht zu erfüllen.

Durch eine entsprechende Produktplanung mit entsprechenden Vorlaufzeiten von mindestens einem Tag ist es vorstellbar, den Durchsatz und damit der Energiebezug an von außen kommende Anforderungen anzupassen, indem durch einen (Produkt-)Wechsel an der Formungsmaschine von einem dickwandigeren, größeren bzw. schwerere Artikel auf ein dünnwandiges, kleineres bzw. leichteres Behälterglas (oder umgekehrt) umgestellt wird. Allerdings sprechen oft Liefertermine, Kundenverpflichtungen und bestelltes Sortiment gegen eine solche Maßnahme. Dazu müssen einerseits die passenden Formen zur Verfügung stehen und andererseits die Lieferverpflichtungen eine Produktionsumstellung zulassen. Nur wenn also dünnwandigere bzw. dickwandigere Produkte bereits in den Auftragsbüchern stehen, die Werkslogistik und die Lieferverpflichtungen eine Produktionsverschiebung zulassen, wäre diese Flexibilitätsmaßnahme umsetzbar. Wie in den Grundstoffindustrien üblich, ist eine übermäßige Lagerhaltung mit zusätzlichen Kosten verbunden und daher zu vermeiden. Technisch lässt sich die Produktionskapazität pro Tag um maximal etwa 10 % der Tonnage (z.B. Reduktion von 200 t/d auf 180 t/d) ohne Qualitätseinbußen anpassen. Entsprechende Tonnagesprünge sind allerdings auch schon im 24 h Takt eine technologische Herausforderung, da sowohl die Glasschmelzwanne als auch der Feeder und die Formgebungsmaschinen an die neuen Randbedingungen mit einigem Aufwand angepasst werden müssen. Außerdem reagiert das Schmelzaggregat bei der Anpassung an die neuen (thermischen) Randbedingungen sehr träge (24 bis 48 Stunden bei größeren Änderungen), so dass schnell aufeinander folgende, größere Änderungen sich ungünstig auf die Produktqualität auswirken.

Bei einer langfristig geplanten Produktumstellung kann die Temperatur in den Glasschmelze führenden Teilen langsam an die optimalen Bedingungen für das neue Produkt herangeführt werden. So eine (Temperatur-)Anpassung der Schmelze benötigt u. U. einige Stunden. Der Formwechsel selber dauert nur ca. eine bis zwei Stunden, je nach Anzahl der parallel geschalteten Stationen und der notwendigen Änderungen der unterschiedlichsten Formgebungsparameter beim Formenwechsel. Eine Ausweisung von Potenzialen ist für diese Maßnahme ist z. Zt. schwierig, auch auf Grund der Komplexität der damit verbundenen Arbeiten.

3.7.7 WECHSELWIRKUNGEN ZWISCHEN EFFIZIENZ UND FLEXIBILITÄT

Generell werden industrielle Herstellungsprozesse seit Jahrzehnten bezüglich ihrer Energieeffizienz optimiert, auch um die Energiekosten niedrig zu halten. Eine zweite Anforderung von Seiten des Gesetzgebers prägt die Fahrweise bzw. Betriebsweise vor allem von industriellen Prozesswärmeanlagen bezüglich der Forderung der Minderung von schädlichen Emissionen (TA-Luft, BImSchG o.ä. behördliche Vorgaben). Schon

die Optimierung der einzelnen Prozessschritte hinsichtlich Energieeffizienz und Emissionsminderung führen manchmal zu sich widersprechenden Maßnahmenkatalogen bzw. Vorgaben. Eine Erhöhung der Flexibilisierung bzw. Bereitstellung und Durchführung von Flexibilisierung führt in manchen Bereichen bzw. Prozessschritten auch zu einer deutlichen Verschlechterung der Energieeffizienz.

Der technologische Bedarf der EZH ist auch auf die optimale Energieeffizienz der Summe aller Energieträger hin ausgerichtet. Wird der Beitrag der EZH massiv verändert, ergeben sich u. U. auf Grund der unterschiedlichen Energieeintragungsraten der unterschiedlichen Energieträger eine schlechtere Gesamteffizienz der entsprechenden (Teil-)Prozesse. Da bei der Glasherstellung bei hybriden Ansätzen die Flexibilität des einen Energieträgers durch die flexible Nutzung eines zweiten Energieträgers kompensiert werden muss, um den kontinuierlichen Prozess aufrecht zu erhalten, ergeben unterschiedliche Energie- bzw. Wärmeeintragsraten auch Unterschiede in der Gesamtbilanz des Energieeinsatzes.

3.7.8 FLEXIBILITÄTSPERSPEKTIVEN DER BEHÄLTERGLASHERSTELLUNG

OXYFUEL-BEHEIZTE WANNEN UND SAUERSTOFF-ERZEUGUNGSANLAGE

Eine Alternative zu Wannen mit einer (regenerativen) Abgaswärmerückgewinnung sind sog. oxy-fuel beheizte Wannen², deren Verbrennung statt mit Luft als Oxidator mit mehr oder weniger reinem Sauerstoff (abhängig von der O₂-Herstellung: üblicherweise >92 Vol.-% O₂) versorgt werden. Diese Betriebsweise ist feuerungstechnisch effizienter, da der in der Luft enthaltene und nicht an der Verbrennungsreaktion beteiligte bzw. für diese nicht benötigte Stickstoff dann nicht durch den Verbrennungsprozess geschleust werden muss. Entsprechend ist das Abgasvolumen nach der Verbrennung deutlich verringert. Allerdings wird der Abgasstrom üblicherweise mit Luft gequenscht (abgekühlt), um die für die Abgasreinigung im Filter benötigten niedrigeren Temperaturen zu erreichen. Das Abgasvolumen nimmt dann fast die gleiche Größenordnung ein, wie hinter einer Brennstoff-Luft-Verbrennung. Die höheren Flammentemperaturen, die veränderte Wärmestrahlung (Intensität und Strahlungsverhalten als Funktion der Wellenlänge) führen bei Oxy-Fuel zu einem verbesserten Wärmeeintrag in die Schmelze. Das erst einmal verringerte Abgasvolumen erniedrigt die Abgasverluste hinter der Verbrennungsstrecke.

Allerdings muss die energieaufwändige Sauerstoff-Herstellung mitbilanziert werden, so dass sich der energetische Vorteil im Gesamtprozess relativiert bzw. bezüglich der Kosten oft kompensiert.

Aufgrund des fehlenden Stickstoffs im Oxidator kann die Entstehung von Stickoxiden bei der Verbrennung deutlich vermindert werden. Nur der im Brennstoff enthaltene Stickstoff, Falschluff und prozesstechnisch eingebrachte Nitrate in den Rohstoffen führen noch zur Stickoxidbildung. Bei Beachtung dieser Randbedingungen verringert sich die Emissionsbelastung mit Stickoxiden pro t Glasprodukt bei Oxy-Fuel-Verbrennung erkennbar.

² Bei Oxyfuel-Wannen sind bisher keine Wärmerückgewinnungssysteme im Einsatz, allerdings gibt es ein EU-Forschungsvorhaben, das eine solche Integration der Wärmerückgewinnung für die thermochemische Regeneration von Erdgas im industriellen Feldversuch untersucht. [Life 15 CCM/NL/000121 – LIFE OPTIMELT; www.lifeoptimelt.com]

Der für die Verbrennung notwendige Sauerstoff kann rein technologisch alternativ über verschiedene Wege hergestellt werden. Für die Bereitstellung von Sauerstoff für eine Oxy-Fuel-Feuerung werden üblicherweise die Luftzerlegung und VPSA (Vapour Pressure Swing Absorption)-Anlagen genutzt, wobei technologisch auch eine Elektrolyse-Anlage Sauerstoff liefern kann. Alle Anlagentypen sind Stromanwendungen mit (zwischen-)speicherbaren Gasen und daher prinzipiell (aus technischer Sicht) gut für einen flexibilisierten Betrieb geeignet, sofern entsprechende große Zwischenspeicher oder flexible Abnehmer für die Gase (O_2 und im Fall der Elektrolyse zusätzlich H_2) vorhanden sind. Für eine Flexibilisierung müssten die O_2 -(Zwischen-)Lager aber gegenüber den heute üblichen Größen mit geringeren Speichervolumen deutlich erhöht werden.

ANSATZ DES SATELLITENPROJEKTES „DISCONMELT“ UND ANFORDERUNGSPROFIL 2

Ziel des Satellitenprojektes „DisConMelt“ (Kopernikusfördernummer S3A bis D) ist, vereinfacht dargestellt, eine Segmentierung des Glasschmelzprozesses, so dass die Flexibilität deutlich erhöht wird. Die eigentliche Schmelze und die Formgebung sollen durch einen entsprechenden „(Zwischen-) Speicher“ voneinander getrennt werden, so dass der Formgebungsprozess unabhängiger vom Schmelzaggregat ist. Die angedachte industrielle Umsetzung am Ende des Projektes wird erst einmal für eine relativ kleine Einheit (30 bis 50 t/d) ausgelegt werden.

Wenn die Umsetzung der Idee „DisConMelt“ gelingt, wird das Anforderungsprofil 2 für die Glasindustrie in Zukunft (≥ 2030) eine weitere nutzbare bzw. zur Verfügung stehende Flexibilisierungsmaßnahme darstellen.

HYBRIDÖFEN ZUR SCHMELZE VON GLAS

Aktuell werden viele Glasschmelzwannen bei gleichzeitiger Nutzung unterschiedlicher Energieträger betrieben. Der Hauptenergieträger ist meist Erdgas als fossiler Brennstoff und elektrische Energie wird als Elektrozusatzheizung verwendet. Der Anteil der EZH am Gesamtverbrauch des Schmelzaggregates beträgt üblicherweise 5 bis 15 % (im Mittel liegt dieser bei ca. 10 %). Allerdings ist dies kein Hybridansatz im engeren Sinn sondern ein zeitgleicher Einsatz unterschiedlicher Energieträger aus der technologischen Notwendigkeit heraus, um im Schmelzaggregat unterschiedliche Farben schmelzen zu können oder um die Tonnage auf das von den Maschinen verarbeitbare Niveau zu bringen.

Das Potential und die technische Auslegung sowie die technologischen Grenzen „echter“ Hybridöfen, bei denen die Energieträger gegeneinander ausgetauscht werden können bzw. der eine Energieträger durch den anderen substituiert werden kann, soll im weiteren Verlauf der Untersuchungen geklärt werden. Eine Zwischenlösung zw. reiner EZH wie bisher und einem Hybridofen wäre eine formelle Erhöhung der installierten Leistung bei der EZH, um einen größeren Spielraum für Laständerungen im Anforderungsprofil 1 umsetzen zu können.

3.8 LITERATURVERZEICHNIS

- [1] Jahresbericht des BV Glas 2015
- [2] Jahresbericht 2016 des BV Glas: www.bvglas.de/media/user_upload/Jahresbericht_2016.pdf (aufgerufen am 18.09.2017)
- [3] Webseite des BV Glas: www.bvglas.de/ueber-glas/die-branchen/behaelterglas (aufgerufen am 18.09.2017)
- [4] Webseite des BV Glas, Karte des BV Glas: www.bvglas.de/media/Weitere_Veroeffentlichungen/Karte_Behaelterglashersteller_in_Deutschland.pdf (aufgerufen am 18.09.2017)
- [5] Webseite der Hornglass-Gruppe: www.hornglass.com (aufgerufen im November 2013)
- [6] Firmenschrift: Schott Technische Gläser – Physikalische und chemische Eigenschaften. Mai 1999. Seite 11
- [7] Firmenschrift: Schott Technische Gläser – Physikalische und chemische Eigenschaften. Mai 1999. Seite 12
- [8] B. Fleischmann: 150 Jahre Siemens Glasschmelz-Wannenöfen in Deutschland. dgg journal 16 (2017) 3, 9–13
- [9] H. G. Pfaender: Schott Guide to Glass. Chapman & Hall, London, 1996



KAPITEL 4

FLEXIBILITÄTSPOTENZIALE UND -PERSPEKTIVEN DER ROH- UND ZEMENTMAHLUNG

Verantwortliche Autoren:

ABSCHNITT 4.1–4.5, 4.7–4.9

Johannes Ruppert, Kevin Treiber,

VDZ gGmbH, Forschungsinstitut der Zementindustrie, Düsseldorf

ABSCHNITT 4.6

Johannes Ruppert, Kevin Treiber,

VDZ gGmbH, Forschungsinstitut der Zementindustrie, Düsseldorf

Karin Arnold, Georg Holtz,

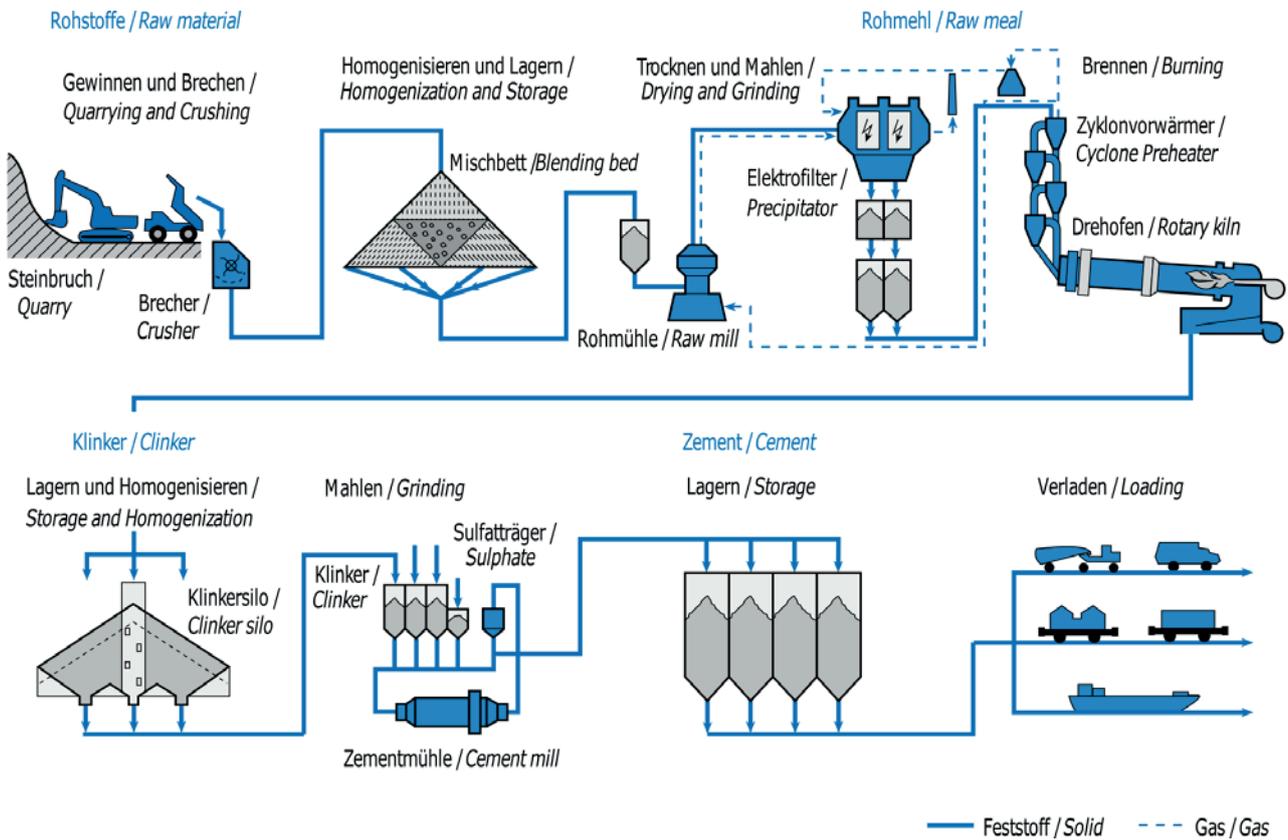
Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH, Wuppertal

Ralph-Uwe Dietrich, Stefan Estelmann,

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Stuttgart

Die Zementindustrie stellt mit fein gemahlenen Zementen einen wichtigen Grundstoff für die Bauwirtschaft her. Weltweit handelt es sich bei Zement um den meist eingesetzten Baustoff. Gleichzeitig gehört die Zementindustrie zu den energieintensiven Industriesektoren. Weit überwiegend wird thermische Energie für die Kalzinierung des Rohmehls und den Klinkerbrennprozess benötigt. Diese Prozesse zur Klinkerproduktion sind als kontinuierliche Prozesse und für eine sehr effiziente Nutzung der thermischen Energie ausgelegt. Das Rohmehl wird dabei im Gegenstrom zu den heißen Abgasen in einem Wärmetauscher vorgewärmt. Die Zementwerke sind in der verfügbaren Anlagentechnologie sehr unterschiedlich. Charakteristisch ist jedoch die Unterteilung in Produktionsstufen entsprechend der Teilprozesse Rohmahlung, Klinkerherstellung und Zementproduktion (Abbildung 4.1). Diese Prozesse können durch vor- und nachgeschaltete Lager und Silos unter gewissen Voraussetzungen und zeitlich begrenzt voneinander entkoppelt werden. Dadurch ergeben sich für Teilprozesse der Zementherstellung Potentiale für einen flexiblen Anlagenbetrieb.

Abbildung 4.1: VDZ Schema zum Verfahrensablauf im Zementwerk [1]



Zement wurde im Jahr 2014 in Deutschland an insgesamt 55 Standorten produziert (Abbildung 4.2). Die Standorte werden unterschieden in integrierte Zementwerke mit Klinkerbrennprozess (34 Standorte) und Zementmahlwerke ohne Klinkerproduktion (21 Standorte).



Abbildung 4.2: Zementwerke in Deutschland 2014 [2]

- Zementwerke mit eigener Klinkerherzeugung
- Zementwerke ohne eigene Klinkerherzeugung

Die wichtigsten Zementrohstoffe Kalkstein, Ton und ihr natürliches Gemisch, der Kalksteinmergel, werden in Steinbrüchen hauptsächlich durch Sprengen gewonnen. Die Standorte der integrierten Zementwerke richten sich nach den Rohstoffvorkommen, um den Rohstofftransport zwischen Steinbruch und Zementwerk möglichst kurz zu halten.

Als wesentliche Voraussetzung für die Güte und Gleichmäßigkeit des Zements muss die zur Klinkerherstellung erforderliche Zusammensetzung des ofenfertigen Rohguts genau und gleichbleibend eingehalten werden. Wenn die Lagerstätten größere Schwankungen in ihrer chemischen Zusammensetzung aufweisen, wird vielfach schon der Rohschotter vorhomogenisiert. Die Halden fassen in der Regel den Schottervorrat für eine Woche; das sind je nach Werksgröße zwischen 20.000 t und 80.000 t.

Die Rohmaterialien werden in Deutschland durch Kugel- oder Vertikal-mühlen gemahlen (eine detaillierte Beschreibung des Prozesses findet sich in Kapitel 4.1.1).

Zementklinker wird heute zum überwiegenden Teil (91 % der genehmigten Klinkerkapazität) nach dem Trockenverfahren in Drehrohröfen mit Zyklonvorwärmern hergestellt. Zementklinker entsteht aus einem Rohstoffgemisch, das in einer Drehofenanlage bei einer Temperatur von über 1.400 °C und einer Gastemperatur bis zu 2.000 °C bis zum Sintern erhitzt wird. An den Ofenauslauf schließt sich ein Klinkerkühler an. Zur Klinkerkühlung werden vorwiegend Rostkühler eingesetzt. Moderne Drehofenanlagen zeichnen sich durch eine effiziente Nutzung der eingesetzten Energie aus. Der größte Teil der in den Abgasen enthaltenen Energie wird zur Trocknung der Rohstoffe und der Brennstoffe sowie gegebenenfalls von anderen Einsatzstoffen wie z.B. Hüttensand verwertet. Auf diese Art wird die Abwärme am wirtschaftlichsten und effizientesten [3] genutzt. Energieverluste sind z. B. durch energetische Nutzung von Kühlerabluft und ggf. heißem Bypassgas weitgehend minimiert. Damit erreichen Ofenanlagen der Zementindustrie Anlagenwirkungsgrade von ca. 70 %.

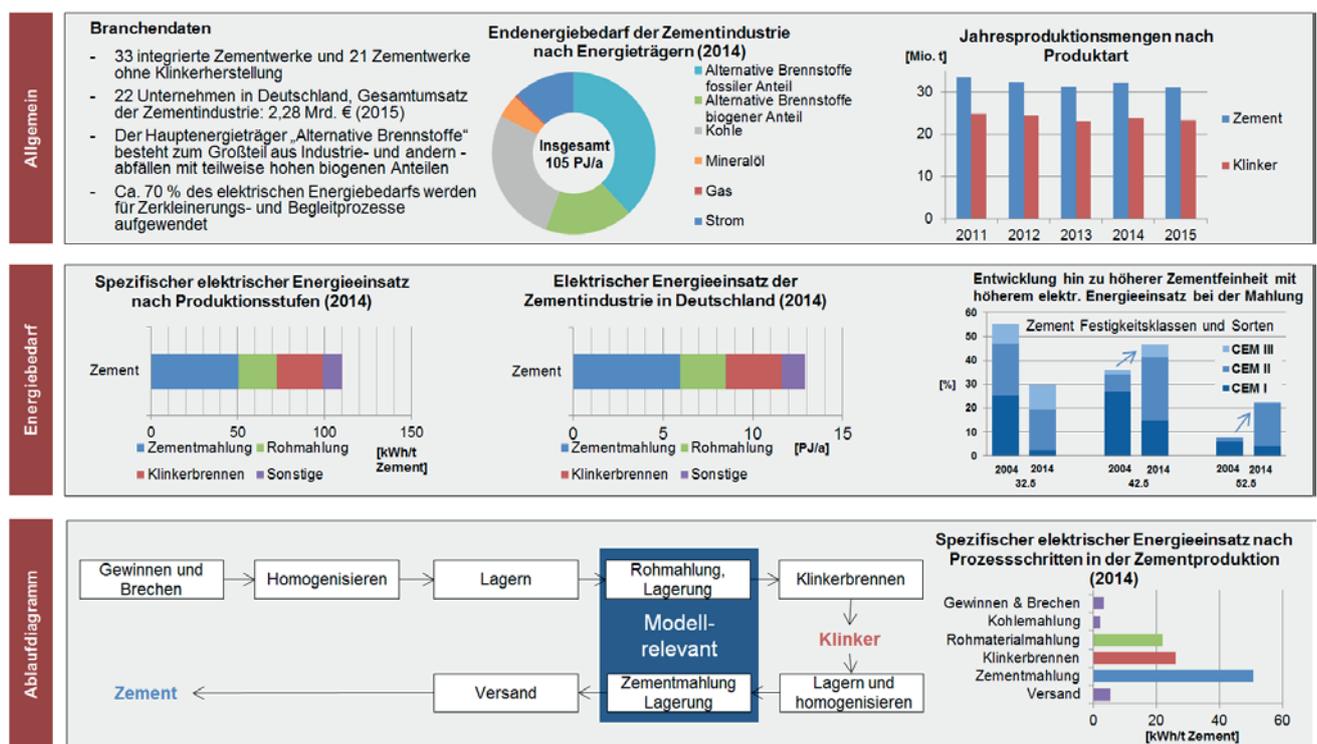
Falls darüber hinausgehende Abwärme zur Verfügung steht, kann es im Einzelfall wirtschaftlich sinnvoll sein, diese zur Erzeugung von Heißwasser oder Prozessdampf zu nutzen. Da in einem Zementwerk kein Dampf oder nur in geringem Umfang Heizleistung benötigt wird, lohnt sich deren Erzeugung nur, wenn eine gesicherte Abgabe, beispielsweise in Form von Fernwärme oder Prozessdampf an einen benachbarten Ort oder Betrieb, möglich ist. Problematisch ist in diesem Fall die Kopplung verschiedener Prozesse, die eine Redundanz der Energieerzeugungsanlagen erfordert. Gerade im Winter, wenn Fernwärme in besonderem Maße benötigt wird, ist der Zementabsatz und die Klinkerproduktion gering. Dementsprechend werden Drehofenanlagen in der Regel über mehrere Wochen oder Monate zur Wartung stillgesetzt. Abgaswärme kann im Einzelfall in elektrische Energie umgewandelt werden. Allerdings werden hierdurch im Vergleich zur direkten thermischen Nutzung geringere Wirkungsgrade [4] erzielt. Nach dem Brennen und Kühlen wird der Klinker in Silos oder geschlossenen Hallen gelagert, um Emissionen von Klinkerstaub zu vermeiden.

Zur Herstellung von Zement wird der Klinker allein oder mit weiteren Hauptbestandteilen gemeinsam feingemahlen (eine detaillierte Beschreibung des Prozesses findet sich in Kapitel 4.1.1). Weitere Hauptbestandteile im Zement können u.a. granuliert Hochofenschlacke, Puzzolane und Kalksteine sein. Diese werden zur Steigerung der Ressourceneffizienz und Reduktion des Anteils an Klinker im Zement (Klinker-Zement-Faktor) eingesetzt, was sich wiederum positiv auf die CO₂-Bilanz auswirkt [5]. Da die verschiedenen Einsatzstoffe unterschiedliche Feuchten und Mahlbarkeiten aufweisen können, kann für eine optimale Zementherstellung auch eine getrennte Stoffstromverarbeitung in Betracht kommen. In diesem Fall werden die Zementkomponenten getrennt feingemahlen und die mehlfeinen Zwischenprodukte zu Zement gemischt.

4.1 BEDEUTUNG DER ROH- UND ZEMENTMAHLUNG

Im Klinkerbrennprozess werden sehr hohe thermische Energien eingesetzt. Die bei einer Flexibilisierung des Klinkerbrennprozesses entstehenden Verluste und der Anlagenverschleiß im Heißbereich wären allerdings weder ökonomisch noch energetisch vertretbar. Deshalb besteht aktuell nicht die Möglichkeit oder Perspektive, die hohen thermischen Energien in eine Flexibilisierung mit einzubeziehen.

Der spezifische elektrische Energiebedarf in der deutschen Zementindustrie in den Jahren 2014 und 2015 betrug etwa 110 kWh/t Zement. Etwa 70 % des elektrischen Energiebedarfs für die Zementherstellung entfallen auf Zerkleinerungsprozesse [6]. In der Prozesskette der Zementproduktion bieten die Bereiche der Mahlprozesse Möglichkeiten zur Flexibilisierung des elektrischen Energiebedarfs. Relevant für eine Modellierung und Einschätzung der technischen Potentiale sind hierbei die Rohmahlung und Zementmahlung inklusive der zugehörigen Lagerung von Produkten (Abbildung 4.3).

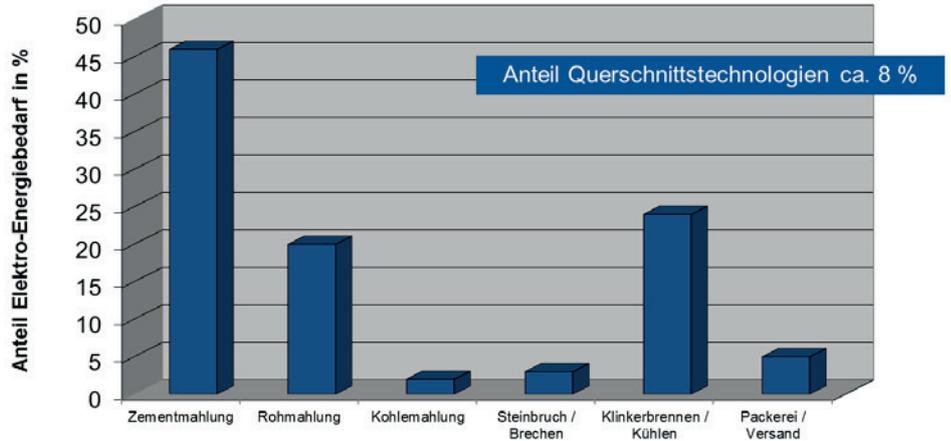


Die Mahlprozesse in der Zementherstellung können in zwei Prozesse unterteilt werden, die Roh- und die Zementmahlung.

Abbildung 4.3: VZD Branchensteckbrief zur Zementindustrie

Etwa 45 % des elektrischen Energiebedarfs entfallen auf die Zementmahlung und etwa 20 % auf die Rohmahlung (Abbildung 4.4). Der überwiegende Teil des elektrischen Energieeinsatzes von 3,57 TWh im Jahr 2014 erfolgt damit in den Zerkleinerungsprozessen. Für die Zementmahlung wird mit durchschnittlich 51 kWh/t Zement [1] der Hauptanteil an elektrischer Energie eingesetzt. Der Klinkerbrennprozess hat ebenfalls einen großen Anteil am elektrischen Energiebedarf von etwa 23 %. Die Kosten für elektrische Energie bezogen auf den gesamten Herstellungsprozess liegen bei etwa 15 bis 20 % [7].

Abbildung 4.4: Spezifischer elektrischer Energiebedarf (Deutschland, 2014): 110 kWh/t Zement [1], [10]

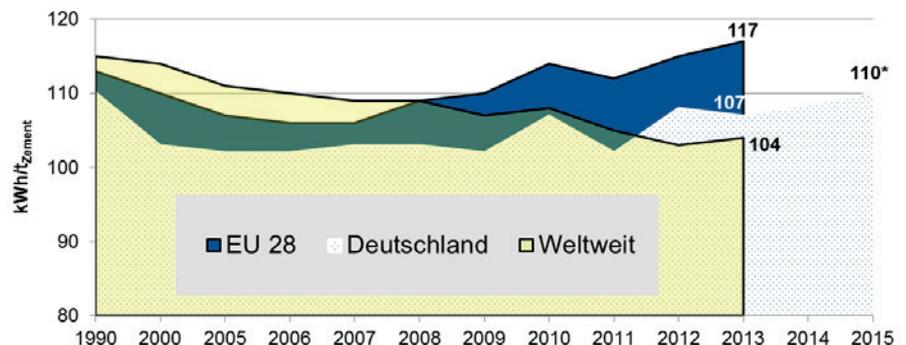


Die trockene Zerkleinerung der Rohmaterialien erfolgt in Vertikal-Wälzmühlen oder Kugelmühlen. Diese bereiten das Rohmaterial für den Klinkerbrennprozess vor. Zur Mahltrocknung werden Ofenabgasen genutzt um die Feuchte aus dem Material auszutreiben, es zu erwärmen und damit das Rohmehl für die Klinkerproduktion vorzubereiten. Zur Produktion des Klinkers wurden 2014 schätzungsweise 39,5 Mt Rohmehl gemahlen [8]. Vertikalmühlen erweisen sich als besonders effizient zur Mahltrocknung der Rohmaterialien. In Deutschland werden aktuell zu etwa 50 % Vertikal-Wälzmühlen und zu 50 % Kugelmühlen zur Rohmahlung eingesetzt. Die meisten integrierten Zementwerke verfügen über eine einzige Rohmühle, wenige über zwei.

Zement wird in Deutschland vorwiegend auf Kugelmühlen und Kombinationen der Kugelmühle mit Gutbett-Walzenmühlen gemahlen. Die Zementmahlung beeinflusst die Zementeigenschaften (z.B. Festigkeiten, Wasseranspruch) wesentlich. Im Jahr 2014 wurden 32,1 Mt Zement hergestellt [8].

In den vergangenen Jahren wurde eine deutliche Veränderung des Produktes Zement wahrgenommen. Es besteht ein Trend zu Zementen höherer Festigkeitsklassen und daher auch höheren Produktfeinheiten. Diese zunehmende Herstellung leistungsstärkerer Zemente führt gleichzeitig zu einer Erhöhung des spezifischen Energiebedarfs der Zementmahlung [9] (Abbildung 4.3 und Abbildung 4.5). Darüber hinaus werden vermehrt weitere Hauptbestandteile neben Klinker eingesetzt. Aus diesen Gründen ist die Zementherstellung heute und absehbar auch zukünftig mit weiter steigenden Anforderungen an die Produktion befasst.

Abbildung 4.5: Entwicklung des spezifischen Energiebedarfs der Zementherstellung [1], [10]



4.1.1 FLEXIBILITÄTSPOTENZIALE FÜR KURZ-, MITTEL- UND LANGFRISTIGE ANFORDERUNGEN

Die Zementindustrie weist im Bereich der Materialzerkleinerung zunächst theoretisch ein hohes Potenzial zur flexiblen Lastabnahme und -bereitstellung durch zeitliche Verschiebung der Produktion auf. Dabei kann die eingesetzte Energie sozusagen in Form der feingemahlten Produkte gespeichert werden. Besonders die Zementmühlen eignen sich hierfür. Ein Teillastbetrieb der Mahlanlagen ist allerdings aufgrund technischer Gegebenheiten des Zerkleinerungsprozesses meist nicht möglich.

Die technischen Potenziale und Kapazitäten zur Lastverschiebung wurden im Rahmen des Projektes durch den VDZ in einem Modell [11] abgebildet (Kapitel 4.4). Bei der Modellbildung sind Rahmenbedingungen der Produktions- und Speicherkapazitäten sowie organisatorische und wirtschaftliche Fragestellungen betrachtet worden.

Unter der Berücksichtigung der gegebenen Rahmenbedingungen sind bei ausreichenden Voraussetzungen kurzfristig An- und Abfahrvorgänge der Zementmühlen technisch realisierbar, wie in Anforderungsprofil 1 für kurze Abrufdauer (15 min) beschrieben. Ein kurzzeitiges Einschalten der Mühle ist allerdings meist nicht in der Lage die für die Produktqualität benötigten stabilen Produktionsbedingungen u.a. eine ausreichende Aufwärmung der Mühle zu erreichen. Ein kurzzeitiges Abschalten der Mühle ist eher möglich. Die Beeinflussung der Produktqualität wird hier geringer eingeschätzt als bei längeren Stillstandzeiten, in denen eine Mühle wieder auskühlt. Eine erhebliche Erhöhung der An- und Abfahrprozesse führt allerdings zu einer Verminderung der Effizienz der Mahlung und ggf. erhöhtem Verschleiß.

Die Bereitstellung von Kapazitäten zur Lastflexibilisierung mit mittlerer Abrufdauer (4–12 Stunden) entsprechend dem Anforderungsprofil 2 scheint technisch durch Lastverschiebung mit einer Garantie zum Nachholen ausgefallener Produktionszeiten möglich. Hierbei bleiben insgesamt ausreichend lange zusammenhängenden Produktionszeiträumen von i.d.R. mehr als 4 Stunden kontinuierlichem Betrieb erforderlich, um negative Auswirkungen auf die Produktqualität zu vermeiden. Eine besondere Herausforderung stellt hierbei die Personalplanung, die zusätzliche Bereitschaft von Personal und daraus entstehende erhöhte Personalkosten dar (Kapitel 4.6.5).

Es zeigt sich eine deutliche Abhängigkeit zur Versorgungssicherheit für den Absatz des Produktes Zement in den nachfragstärksten Jahreszeiten und hinsichtlich möglicher kurzfristiger Produktnachfragen. Es sind Situationen bekannt, in denen die Nachfrage nach Zement die Produktionskapazität deutlich überschreitet. Eine exakte Prognose dieser Situationen ist allerdings schwierig. Bei ausreichend vorhandenen Kapazitäten und außerhalb der Hauptsaison für die Zementnachfrage, scheinen Lastverschiebung für längere Zeiträume möglich. Standortspezifisch kann ggf. durch organisatorische Maßnahmen die Koordination der Mühlenlaufzeiten derartige Anforderungen erfüllen. Der langfristigen Lastverschiebung für längere Stromknappheitsperioden wie in Anforderungsprofil 3

rungsprofil 3 beschrieben (bis zu 5 Tage), kann in den meisten Fällen nur mit Anpassung der Silokapazitäten entsprochen werden. Die Kosten für den Neubau und die Vergrößerung der Silos unterliegen standortspezifischen Einflüssen und scheinen aus heutiger Perspektive nicht rentabel. Eine weitere beispielhafte Konkretisierung für ein zukünftiges Szenario scheint erst auf der Grundlage von genaueren Anlagendaten und in Zusammenarbeit mit einem Zementunternehmen möglich und sinnvoll.

4.2 TECHNISCHE BESCHREIBUNG DER REFERENZPROZESSE

4.2.1 ROHMAHLUNG

Sowohl der Betrieb als auch die Auslegung der Rohmühle sind in den meisten Fällen stark an den Drehrohrofen im Werk angelehnt. Dennoch schwanken die Kennzahlen der Anlagen standortbedingt stark.

Die Kapazität der Rohmühle wird etwas größer als für den kontinuierlichen Betrieb des Drehrohrofens nötig ausgelegt, um die Verfügbarkeit von Rohmehl in jeden Fall gewährleisten zu können und Produktionsdefizite (z.B. durch Ausfälle und Wartungen der Mühle) nachholen zu können. Der Betrieb der Rohmühle erfolgt aus Emissions- und Effizienzgründen i.d.R. zu über 80 % im sogenannten Verbundbetrieb [1] mit der Klinkerproduktion. Die technische Flexibilisierbarkeit der Rohmehlproduktion ist daher zugunsten der effizienten Nutzung thermischer Energie und effizienter Abgasreinigung eingeschränkt und stark mit den standortabhängigen Gegebenheiten im Werk verknüpft (Kapitel 4.7). Es sind Zementwerke bekannt in denen es dennoch möglicherweise praxisrelevante Potentiale für eine Flexibilisierung der Rohmahlung gibt [3], [12]. Zusammenfassend ist festzuhalten: Die Flexibilisierbarkeit der Rohmahlung ist an viele Faktoren gekoppelt und nur in Einzelfällen praktisch möglich und sinnvoll:

- Die Betriebssicherheit des Drehrohrofens darf nicht gefährdet werden.
- Ausgefallene Produktion muss durch Lastverschiebung nachgeholt werden können.
- Die Qualität, Homogenität und energieeffiziente Trocknung des Rohmehls dürfen nicht beeinträchtigt werden.
- Durch den Direktbetrieb des Drehrohrofens ohne Betrieb der Rohmühle dürfen keine zusätzlichen Emissionen entstehen und die Abgasreinigung darf nicht negativ beeinflusst werden.
- Die ökonomischen Randbedingungen dürfen den vorher genannten Punkten nicht widersprechen und der zusätzliche Aufwand und ein verbleibendes Risiko muss vergütet werden.

Die installierte Leistung von Rohmühlen liegt bei durchschnittlich etwa 3.000 kW und die Kapazität bei 166 t/h [10]. Hiernach kann sich eine Tagesproduktion von bis zu 4.000 t Rohmehl ergeben. Die Verbundbetriebszeiten liegen in der Praxis meist über 80 % der Betriebszeit. Direktbetriebszeiten ohne Betrieb der Rohmühle werden für Wartungs- und Instandhaltungsarbeiten der Rohmühle genutzt. Aus Emissions- und Effizienzgründen versuchen einige Werke die Direktbetriebszeiten weiter zu reduzieren. Zur Darstellung im VDZ Modell (s. Kapitel 4.4) läuft die Rohmühle mit einer durchschnittlichen Betriebszeit von 7.000 h/a. Das entspricht bei 320 Tagen mit Klinkerproduktion pro Jahr einem Anteil von 87 %.

Der Rohmühle vorgeschaltet ist das Rohsteinlager, welche als nicht limitierend für die Flexibilisierung der Rohmahlung angenommen wird. Diese Rohmehlsilos dienen der weiteren Homogenisierung und der Versorgungssicherheit des kontinuierlich betriebenen Drehrohrofens. Aus betrieblichen Gründen liegt der minimale Füllstand der Silos bei ein bis zwei Tagesbedarfen an Rohmehl.

4.2.2 ZEMENTMAHLUNG

Zur Zementmahlung werden in Deutschland heute hauptsächlich Kugelmühlen oder Kombinationen der Kugelmühle mit Gutbett-Walzenmühlen eingesetzt. Zur Steigerung der Effizienz und zur Erhöhung der Produktfeinheit werden diese Anlagen im geschlossenen Kreislauf mit einem Sichter betrieben. Diese Mahlsysteme zeichnen sich durch hohe Betriebssicherheit aus. Die Produkteigenschaften des Zementes werden in entscheidendem Maße durch die Mahlung beeinflusst. Neben der Feinheit und Korngrößenverteilung des Produktes Zement ist auch die Entwässerung des Sulfatträgers von entscheidender Bedeutung. Dies gilt ebenfalls für die Trocknung weiterer Zementhauptbestandteile (z. B. Kalkstein und Hüttensand) während des Mahlprozesses (sog. Mahltrocknung). Hier zeigt sich, dass vor allem die Verfügbarkeit ausreichender Betriebswärme und die Verweilzeit entscheidend sind. Bei Kugelmühlen liegt die Betriebstemperatur i. d. R. bei 95 bis 125 °C im Mühlenaustrag [13]. Bei Vertikalmühlen ist die Temperatur etwas geringer. Hier wird für die Zementmahlung meist die Sulfatträgerzusammensetzung angepasst. Aus diesen Gründen scheinen Abschaltungen von bis zu 2 Stunden technisch ohne zu große Auskühlung und Beeinträchtigungen der Produktqualitäten möglich. Seitens der Stromanbieter müsste darauffolgend Stromverfügbarkeit für eine Mindestbetriebszeit der vom Netz genommenen Mühle garantiert werden. Kontinuierliche Betriebszeiten von mindestens 4 Stunden sind in jedem Fall nötig. Wird die Entwässerung des Sulfatträgers nicht durch ausreichende Wärmeenergie in der Mühle gewährleistet kann es zur Vorhydratisierung des Zements im Silo kommen. Die Qualität des Produktes wird hierdurch verringert.

Auf das ganze Jahr gesehen sind Zementmühlen durchschnittlich zu über 50 % in Betrieb. Bisher werden Wartungs- und Instandsetzungsarbeiten nach Möglichkeit in geplanten Stillstandzeiten der Mühlen durchgeführt. Vor allem in den Sommermonaten kann es zu einer nahezu vollständigen Auslastung der Mahlanlagen kommen. Zement wird in integrierten Zementwerken durch mehrere Zementmühlen gemahlen. Für die einzelnen Zementmühlen sind hierbei unterschiedliche Betriebsstunden in einem weiten Bereich von 1.000 bis 7.000 Stunden pro Jahr üblich. Neben integrierten Zementwerken wird Zement auch in Mahlwerken ohne eigene Klinkerproduktion hergestellt. Die Anzahl der Mühlen und ihre Betriebsstunden fallen im Durchschnitt etwas geringer aus als in integrierten Zementwerken. Standort, markt- und saisonbedingt kann der tatsächliche Mühlenbetrieb allerdings sehr unterschiedlich ausfallen. Die Zementnachfrage bestimmt im Wesentlichen die Auslastung der Mühlen (Abbildung 4.6).

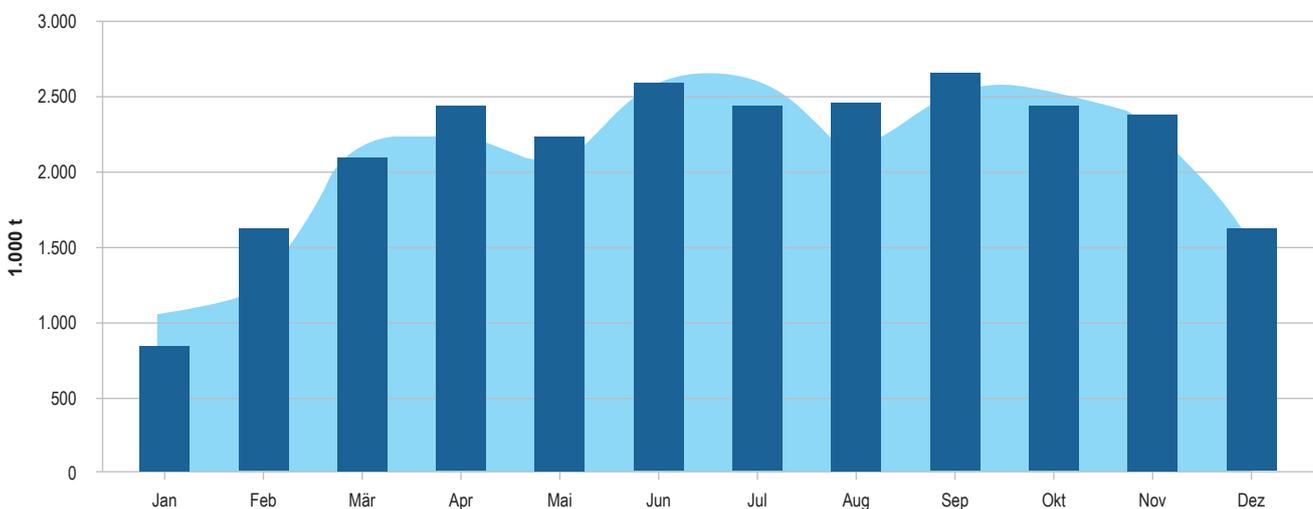


Abbildung 4.6: Zementversand Inland (Monatsdaten) [14] ■ 2015 ■ 2016
Quelle: VDZ

Anmerkung: 1996–2011 Versand der BDZ-Mitgliedsunternehmen (ab 2004 geänderter Berichtskreis); ab 2012 Versand der VDZ-Mitgliedsunternehmen, Berichtskreisänderungen 2013, 2016

Die installierte Leistung des Hauptantriebs von Zementmühlen liegt bei durchschnittlich 2.250 kW [9]. Tatsächlich abgerufen werden etwa 2.050 kW [8] inklusive Nebenantrieben. Abhängig von der Mühlengröße und -konfiguration sind hierin etwa 17 % Antriebsleistung von Nebengaggregaten [15] beinhaltet. Ein Teillastbetrieb ist in den meisten Fällen nicht möglich. Die Kapazität einer durchschnittlichen Anlage liegt bei 40 t/h [14]. Oft werden mehrere, z. B. vier, verschiedene Zementsorten auf einer Mühle produziert. Aufgrund unterschiedlicher Zementsorten und fluktuierender Materialeigenschaften der Einzelkomponenten die auf der Mühle gemahlen werden kann es zu Schwankungen im Durchsatz kommen.

Im Fall eines Sortenwechsels wird in vielen Fällen der Zement in das Silo des Zementes der geringeren Qualität transportiert, bis die Qualität des höherwertigen Zementes erreicht wurde. In anderen Fällen existieren spezielle Abmahlsilos für die Übergangszeiträume. Materialien aus diesen

Silos werden später i. d. R. vollständig in den Zementherstellungsprozess rezirkuliert und dadurch ein Materialausschuss vermieden. Ein zusätzlicher Arbeitsbedarf von etwa 1 bis 2 kWh/t kann hierdurch entstehen. Die Dauer des Sortenwechsels sollte 30 bis 45 Minuten bis zur Stabilisierung des Betriebs nicht überschreiten.

Der Zementmühle im integrierten Zementwerk vorgeschaltet sind ein oder mehrere Silos für den Hauptbestandteil Klinker, welche als nicht limitierend für die Flexibilisierung der Zementmahlung angenommen werden. Die Größe der Silos für weitere Zementhauptbestandteile ist stark von der jeweiligen Anlagenentwicklung und dem Produktportfolio abhängig. Vor dem Hintergrund fehlender Möglichkeiten zur konkreten Bewertung wurden die Silokapazitäten für weitere Hauptbestandteile zunächst auch als nicht limitierend angenommen. Auf der Produktseite wird die Kapazität der Zementsilos in integrierten Zementwerken im Mittel mit etwa 35.000 t [14] eingeschätzt, wobei besonders bei Neuinstallationen wesentlich höhere Lagerkapazitäten bekannt sind. Mahlwerke verfügen tendenziell über kleinere Silokapazitäten von im Mittel etwa 22.000 t [14] Kapazität. Gerade bei Silokapazitäten sind Zusammenhänge schwer herzustellen und standortabhängige Gegebenheit und Faktoren für die Anlagengestaltung sehr groß.

4.3 METHODIK DER DATENERHEBUNG

Für die Bestimmung von Potentialen zum flexiblen Energieeinsatz in der Zementindustrie wurden die Zerkleinerungsprozesse als relevante Referenzprozesse identifiziert. Grundlage hierfür ist einerseits der hohe spezifische Einsatz elektrischer Energie für die Zerkleinerung und andererseits die weitreichende Entkopplung der Mahlprozesse von dem kontinuierlichen und wesentlich energieintensiveren thermischen Prozess der Klinkerherstellung durch vor- und nachgelagerte Materialspeicher in Form von Silos.

Für die Modellierung und Abschätzung der technischen Flexibilitäts-potentiale wurden zunächst die statistischen Daten der deutschen Zementindustrie herangezogen [1], [4] (Tabelle 4.1). Anhand der Daten zur Produktion und zum Energieeinsatz wurde für die beiden unterschiedlichen Arten von Zementwerken (Mahlwerk: Modell 1, integrierte Werke mit Klinkerproduktion: Modell 2) jeweils mittlere Größen bestimmt [14], so dass in Summe mit der Statistik konsistente Einschätzungen möglich werden. Diese sind jedoch im Prinzip nicht in der Lage, die spezifischen Gegebenheiten eines einzelnen Standorts wiederzugeben. Die Berechnung anhand mittlerer Modellwerte kann spezifische Einschränkungen von technischen Potentialen ggf. nur unvollständig darstellen. Insofern müssen die Ergebnisse in Summe prinzipiell als Maximalabschätzung betrachtet werden und vor Anwendung in einem Einzelfall weiter relativiert und u.U. deutlich eingeschränkt werden.

	Einheit	Übersicht Zementindustrie 2014 [4]	Modell 1: Mahlwerk	Modell 2: Integriertes Zementwerk mit Klinkerproduktion
Zementproduktion	Mt	32,1	Zementmahlung	Zementmahlung
Klinkerproduktion	Mt	23,9		Rohmahlung
Anzahl der Werke		55	21	34
Elektrischer Energieeinsatz	MWh	3.570.000		

Tabelle 4.1: Daten der Zementindustrie in Deutschland für die Bestimmung der Referenzprozesse

Als weitere Datenquelle wurden Informationen aus den Expertengremien des VDZ, insbesondere aus dem Arbeitskreis Zerkleinerung [16] genutzt, um spezifische technische Parameter zu den Zerkleinerungsprozessen in Zementwerken zu bestimmen. Dies bezieht sich insbesondere auf die Bestimmung von Anlagengrößen und den Leistungsdaten und Kapazitäten von Mühlen und Silos. Die Verbindung aller Daten und Erfahrungen des VDZ aus Audits zum Energiemanagement in Zementwerken erlaubte eine Einschätzung zur Auslastung und Nutzung von Mühlen und Silos. Als Vereinfachung wurde angenommen, dass die Flexibilität im Wesentlichen durch das Zusammenwirken von Produktionskapazität und Produktspeicherkapazität bestimmt wird. Wesentlich sind demnach die Größe und Kapazität folgenden Anlagenteile:

- Rohmühle, Rohmehlsilos und spezifischer Energieeinsatz für den Rohmahlprozess
- Zementmühlen, Zementsilos und spezifischer Energieeinsatz für den Zementmahlprozess

Alle Eingangsdaten für die Modellierung wurden weiterhin in den vom VDZ durchgeführten Expertengesprächen [7] durch spezielle Interviewfragen und durch Diskussion der Modellannahmen überprüft und bei Bedarf weiter angepasst. Ein erstes informelles Expertengespräch diente der Überprüfung des Modellansatzes. Im weiteren Projektverlauf wurden drei je mindestens einstündige Gespräche mit Unternehmensexperten aus dem Fachgremium des VDZ durchgeführt und in Protokollen vom VDZ ausgewertet. Grundlagen der Expertengespräche waren insbesondere:

- Beschreibung der Referenzprozesse in der Zementindustrie (VDZ)
- Eingangsdaten und erste Ergebnisse der Auswertung des VDZ-Modells
- Eine für die Gespräche konkretisierte Beschreibung und durch Beispiele ergänzte Darstellung der drei Anforderungsprofile für kurz-, mittel- und langfristige Lastanpassungen (FFE, VDZ)
- Ein mit den Projektpartnern branchenspezifisch zugeschnittener Katalog an Fragen zu technischen, praktischen, organisatorischen und ökonomischen Voraussetzungen und Hemmnissen des flexiblen Energieeinsatzes (VDZ, FFE, WI)

In dem angepassten VDZ-Modell wurde eine quantitative Auswertung zur Einschätzung der technischen Flexibilitätspotentiale für das Modell 1: Mahlwerk und das Modell 2: Integriertes Zementwerk und für die Anforderungsprofile 1 und 2 durchgeführt (Kapitel 4.5). Die Ergebnisse wurden anhand der protokollierten Informationen der Experteninterviews [7] auf Plausibilität überprüft.

Eine ergänzende Auswertung für das langfristige Anforderungsprofil 3 und die Anwendung eines einfachen Batteriemodells haben gezeigt, dass die Einschätzung langfristiger Flexibilitätspotential zusätzliche technische Einschränkungen berücksichtigen muss. Diese ergeben sich aus der saisonal unterschiedlichen Nutzung und Auslastung der Produktions- und Speicherkapazitäten, und aus der differenzierten Produktion und Lagerung einzelner Zementsorten. Die wesentlichen Erkenntnisse dieser Untersuchungen wurden qualitativ zusammengefasst (Kapitel 4.5.3). Eine genauere Untersuchung anhand von konkreten Unternehmensdaten und Zeitreihen ist für die geplante Weiterführung des Projekts vorgesehen.

Die Identifikation wesentlicher Hemmnisse (Kapitel 4.6) wurde vor allem anhand der Expertengespräche unter Federführung des VDZ und mit Beteiligung der wissenschaftlichen Partner vorgenommen.

4.4 VDZ MODELL ZUR EINSCHÄTZUNG DER TECHNISCHEN FLEXIBILITÄTSPOTENTIALE

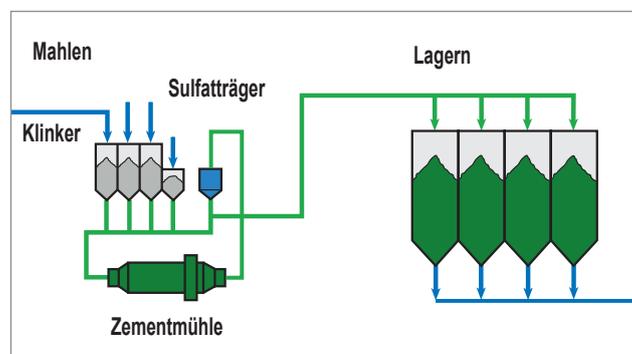
Zur übergreifenden Beschreibung des technischen Flexibilitätspotentials der Mahlanlagen in Zementwerken in Deutschland wurden vom VDZ zwei Modellansätze entwickelt. Hierbei wurden für alle 34 Zementwerke mit eigener Klinkererzeugung der Betrieb beider Referenzprozesse, d. h. Rohmahlung und Zementmahlung, angenommen. Werke mit Klinkerproduktion werden in dieser Studie als integrierte Zementwerke bezeichnet (Abbildung 4.2 blaue Punkte, Modell 2). Bei den 21 Zementwerken ohne eigene Klinkererzeugung handelt es sich um Mahlwerke (Abbildung 4.2 weiße Punkte, Modell 1). Diese erhalten die Mahlgüter meist aus anderen Werken und von externen Zulieferern. In der Regel wird Klinker mit weiteren Bestandteilen wie in integrierten Zementwerken zu Zementen vermahlen oder bereits fertige Zemente werden vor Ort mit weiteren gemahlten Hauptbestandteilen zu Kompositzementen gemischt. Im Modell wird für Mahlwerke nur der Referenzprozess Zementmahlung angenommen. Hierbei wird im Vergleich mit den integrierten Werken im Mittel von einer etwas niedrigeren Zementproduktion und geringeren Anzahl an Zementmühlen ausgegangen. Beim Zementwerk in Rostock handelt es sich um ein Zementmischwerk und Versandterminal ohne Mühlenbetrieb. Die im Modell für das Jahr 2014 und 21 Werke ohne Klinkerproduktion gemittelte Zementproduktion kann für die Zementproduktion in Rostock hinsichtlich der Zementmahlung und des hierfür nötigen Einsatzes elektrischer Energie statt am Standort Rostock ersatzweise bei den Standorten Lägerdorf und Höver des gleichen Zementunternehmens verortet werden.

Im Modell werden die Annahmen zur Produktion und Nachfrage des Produktes mit den effektiv nutzbaren Silokapazitäten in Beziehung gesetzt. Dieses Vorgehen entspricht einem einfachen Batteriemodell [17], in dem die Silokapazität und ihre Füllung mit Produkt als Speicher genutzt wird. Für drei unterschiedliche Betriebssystemen (Hauptsaison, Nebensaison, Revisionszeit) ergeben sich so unterschiedliche technische Potentiale zum flexiblen Energieeinsatz. Insgesamt können die modellierten mittleren Werte nicht die standortspezifischen Gegebenheiten und Betriebsweisen der einzelnen Werke wiedergeben. Dennoch erlauben Sie eine erste Einschätzung der technischen Potentiale für gemittelte modellhafte Annahmen für die beiden unterschiedlichen Arten von Zementwerken und eine grobe räumliche Verortung von möglicherweise umsetzbaren technischen Potentialen zum flexiblen elektrischen Energieeinsatz. Eine erste Einschränkung des technischen Potentials erfolgt durch die Fokussierung auf den flexiblen Betrieb einer großen Mühle je Werk. Hierdurch wird der spezifische organisatorische Aufwand in der Betriebspraxis klein gehalten. Dieser Ansatz wird durch Erfahrungen mit ersten Projekten in der Zementindustrie bestätigt [7]. Soweit möglich sind Voraussetzungen und Hemmnisse, die das eingeschätzte technische Flexibilitätspotential praktisch und ökonomisch weiter einschränken, in den Kapiteln 4.5 bis 4.7 beschrieben. Tatsächlich in der Betriebspraxis nutzbare und ökonomisch realisierbare Potentiale sind grundsätzlich geringer als die modellierten und technischen Potentiale einzuschätzen. Insbesondere muss auch eine theoretische Hochrechnung von technischen Potentialen eines Werkes auf die Summe der Werke in Deutschland zur Einschätzung eines maximalen technischen Potentials (Kapitel 4.5.4 und 4.5.5) durch erforderliche werksspezifische Voraussetzungen sowie praktische und ökonomische Hemmnisse weiter eingeschränkt werden.

4.4.1 PRODUKTIONSKAPAZITÄT

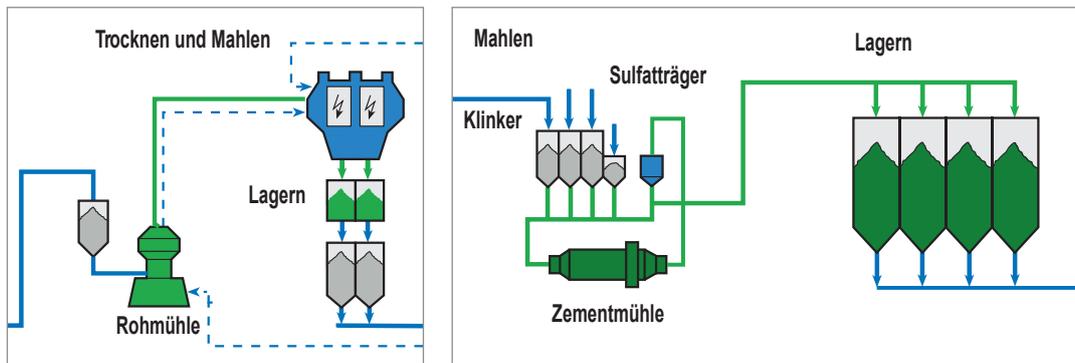
Im Modell 1 wird für ein Mahlwerk in Deutschland angenommen, dass dieses im Mittel über 2,4 Mühlen verfügt, welche im Modell vereinfacht zu einer Mühle entsprechender Kapazität zusammengefasst wurden (Abbildung 4.7). Die Produktionskapazität wurde mit 97 t/h Zement abgeschätzt.

Abbildung 4.7: Schematische Darstellung
Modell 1: Mahlwerk mit Zementmahlprozess



Im Modell 2 verfügt ein durchschnittliches integriertes Zementwerk mit Klinkerproduktion in Deutschland über eine Rohmühle und 3,8 Zementmühlen. Die Rohmühle hat eine Kapazität von etwa 166 t/h zur Herstellung von Rohmehl für die Klinkerproduktion. Auch im Modell 2

wird zunächst davon ausgegangen, dass die Zementmühlen als Einheit auf Lasterhöhungen und -reduktionen reagieren. In der Praxis zeigt sich, dass Aufgrund gegebener Anlagenkonfigurationen einige Mühlen gewisse Anlagenkomponenten teilen. Die Flexibilisierung dieser Mahlanlagen wäre in diesen Fällen nur im Verbund möglich. Die Zementmühlen werden im Modell 2 zusammengefasst als eine Mühle mit einer Produktion von im Mittel etwa 151 t/h Zement dargestellt (Abbildung 4.8).



In Modell 1 und 2 werden die Speicherkapazitäten der Ausgangsstoffe im Klinkerlager bzw. Rohsteinlager als nicht limitierend angenommen. Die wesentlichen Modellparameter der Referenzprozesse für den flexiblen elektrischen Energieeinsatz wurden anhand der im VDZ verfügbaren statistischen und technischen Daten als Mittelwerte abgeschätzt und sind in Tabelle 4.2 zusammengefasst.

Abbildung 4.8: Schematische Darstellung Modell 2: Integriertes Zementwerk mit Rohmahlprozess und Zementmahlprozess

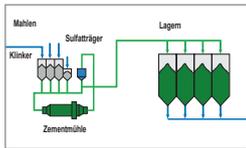
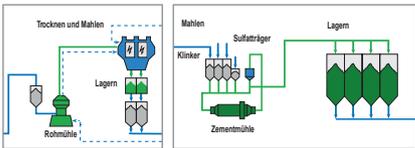
	Einheit	Modell 1: Mahlwerk	Modell 2: Integriertes Zementwerk mit Klinkerproduktion
Referenzprozesse für flexiblen elektrischen Energieeinsatz		 Zementmahlung	 Rohmahlung, Zementmahlung
Zementmühlen	Anzahl	2,4	3,8
Rohmühlen	Anzahl		1
Spez. Energiebedarf Zementmahlung	kWh/t Zement	51	51
Spez. Energiebedarf Rohmahlung	kWh/t Rohmehl		18
Installierte Leistung Hauptmotoren	MW	5,5	11,4
Abgerufene Leistung inkl. Nebenaggregaten	MW	5,0	10,7

Tabelle 4.2: Beschreibung der Mühlen in den VDZ Modellen 1 und 2

4.4.2 SAISONALE NUTZUNG DER PRODUKTIONSKAPAZITÄT

Die Zementproduktion zeigt eine deutliche Abhängigkeit von der Saisonalität der Baubranche (siehe Abbildung 4.9). Der Betrieb der Zementmühlen wird dieser Saisonalität angepasst. Im Sommer wird die Produktionskapazität der Zementmühlen zur Herstellung absatzstarker Produkte oft vollständig ausgenutzt. Hierbei müssen möglicherweise notwendige Wartungsarbeiten, z.B. während einer Schicht pro Woche, berücksichtigt werden.

Die Rohmahlung zeigt keine starke saisonale Abhängigkeit, da die Rohmahlung direkt mit der kontinuierlichen Klinkerproduktion im Drehrohrofen verknüpft ist. I.d.R. wird ein ca. einmonatiger Stillstand der Klinkerproduktion für eine Revision innerhalb der Saison mit schwacher Nachfrage im Winter eingeplant. Vereinzelt wurde die Verschiebung der Winterreperatur diskutiert, allerdings ist die Terminfindung nicht flexibel, u.a. da sie von externen Dienstleistern, der Urlaubs- und Schichtplanung sowie der Zementnachfrage abhängig ist. Darüber hinaus gibt es nur selten z.B. in Phasen schwacher Konjunktur langfristig geplante Stillstände des Drehrohrofens.

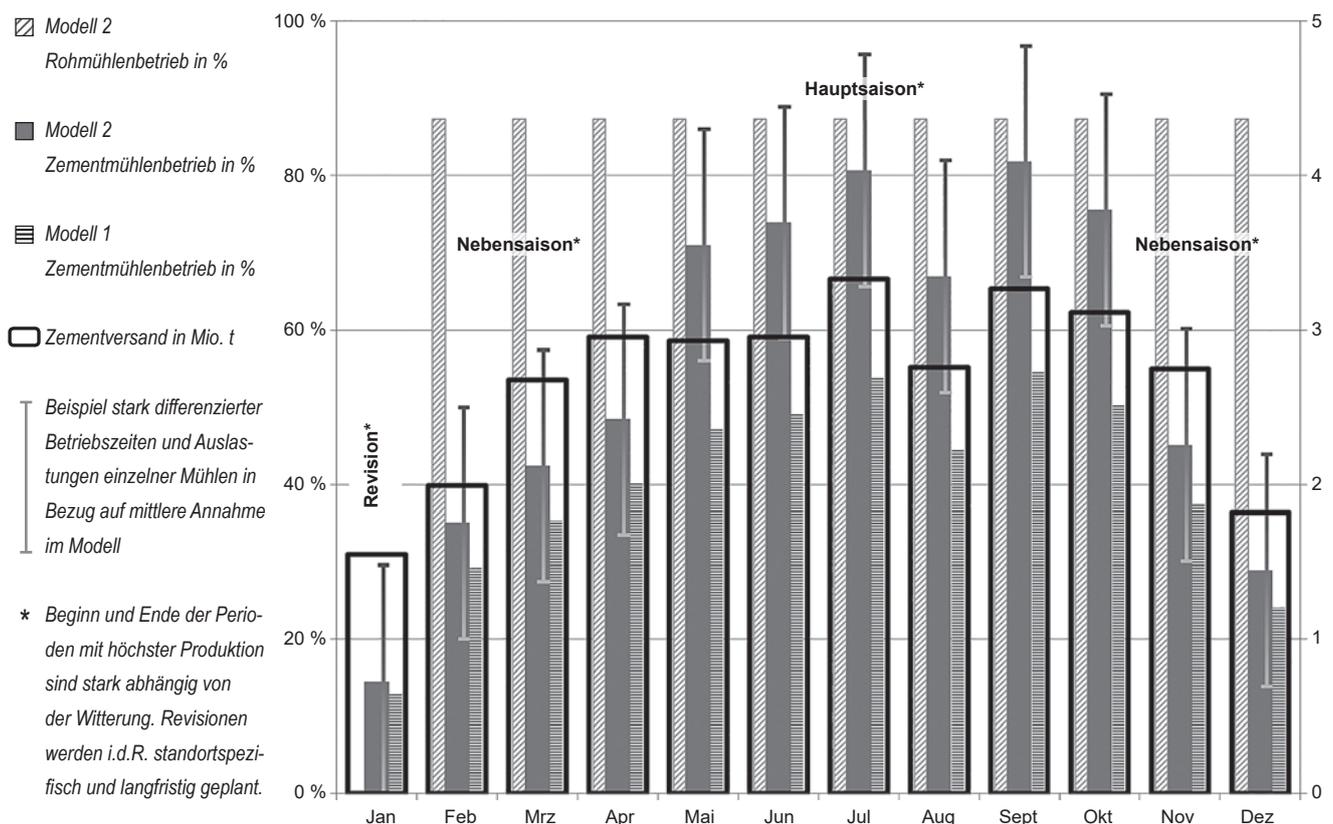


Abbildung 4.9: Geschätzter Verlauf des Mühlenbetriebs für Modell 1 und 2 und des Zementversands von Zementwerken in Deutschland

Die in Abbildung 4.9 dargestellten anteiligen Betriebszeiten sind als mittlere Modellannahmen zu verstehen. Standort- und marktbedingt können deutliche Abweichungen ergeben. Auch innerhalb eines Werkes kann sich die Auslastung einzelner Mühlen je nach Produktnachfrage stark unterscheiden. Dementsprechend wurde für die Auswertung der saisonal variierenden Mühlennutzung ein weiter Schwankungsbereich abgeschätzt. Dieser ist exemplarisch für Modell 2 und den Zementmüh-

lenbetrieb in Abbildung 4.9 dargestellt. Zur weiteren Berücksichtigung der Variation zwischen einzelnen Werken wurden außerdem für Modell 1 und 2 z. T. unterschiedliche Annahmen getroffen (Kapitel 4.2.2, Tabelle 4.3), ohne dass diese eindeutig einem unterschiedlichen Betrieb von Mahlwerken und integrierten Zementwerken zuzuordnen sind.

Tabelle 4.3: Geschätzte Mühlennutzung in Deutschland, 2014

	Modell 1: Zementmühlen	Modell 2: Zementmühlen	Modell 2: Rohmühle
Hauptsaison	30–70 %	50–100 %	75–100 %
Nebensaison	10–55 %	15–65 %	65–100 %
Revisionszeit	0–35 %	0–35 %	0 %

4.4.3 PRODUKTSPEICHERKAPAZITÄT IN SILOS

Als weitere Voraussetzung für eine flexible Nutzung der Produktionskapazität wurden für die Modellierung mittlerer Speicherkapazitäten und die technischen Möglichkeiten zu ihrer Nutzung abgeschätzt. Einschätzungen zu regelmäßig möglichen Minimalbeständen ergeben sich aus den technischen Voraussetzungen zur sicheren Entleerung und der erforderlichen Produktverfügbarkeit. Diese sollte in der Hauptsaison höher liegen. Für die Rohmehlsilos ergeben sie sich weiterhin aus der notwendigen Betriebssicherheit für einen Neustart des Drehofens zur Klinkerherstellung im Fall eines Ofenstillstands, weil die Rohmehlproduktion hinsichtlich der Rohmaterialtrocknung selbst vom Ofenbetrieb abhängig ist (Tabelle 4.4).

Tabelle 4.4: Geschätzte Silogrößen und -nutzung

	Modell 1:	Modell 2:	
	Zementsilos	Zementsilos	Rohmehlsilos
Anzahl der Zement- oder Rohmehlsorten	5 bis 10	5 bis 20	1 bis 3
Summe der Silogröße im Modell in t	22.900	35.500	10.500
Maximalbestand	90 %	90 %	90 %
Minimalbestand, - technisch	25 %	25 %	35 %
- in der Hauptsaison	50 %	50 %	50 %
- in der Revisionszeit	25 %	25 %	75 %

4.5 TECHNISCHES FLEXIBILITÄTSPOTENZIAL DER ROH- UND ZEMENTMAHLUNG

4.5.1 KURZFRISTIGE FLEXIBILITÄT NACH ANFORDERUNGSPROFIL 1

¹ Die Begriffe „positive Regelleistung und -energie“ werden in Kapitel 4 in Bezug auf eine Flexibilität zur Lastminderung und entgegengesetzt die Begriffe „negative Regelleistung und -energie“ in Bezug auf eine Flexibilität zur Lasterhöhung verwendet. Im Glossar des Synergieprojekts (V6) [18] werden entsprechend hierfür die Begriffe Leistungspotential und Energiepotential verwendet, um eine Verwechslung mit eng gefassten Begriffen der Primär- und Sekundärregelung im Bereich des Strommarktes zu vermeiden. Hierbei bezeichnet ein „positives Leistungspotenzial“ eine Flexibilität zur Lastminderung, und ein „negatives Leistungspotenzial“ eine Flexibilität zur Lasterhöhung. Daran angelehnt könnten die Möglichkeiten für flexibel eingesparte/eingesetzte Energie auch als „positives/negatives Energiepotential“ einer Lastreduktion/Lasterhöhung bezeichnet werden.

Tabelle 4.5: Einschätzung der technischen Potentiale zum flexiblen Energieeinsatz für kurzfristige Lastminderung nach Anforderungsprofil 1

Für die kurzfristige Flexibilität der Roh- und Zementmahlung ergibt sich technisch ein unterschiedliches Bild für eine positive Regelleistung (Lastminderung) und eine negative Regelleistung (Lasterhöhung)¹. Während eine kurzzeitige Abschaltung der Mühlen technisch möglich ist, benötigt der Start des Mühlenbetriebs insbesondere bei den Zementmühlen eine Aufwärmphase und ausreichend lange Betriebsdauer, damit sich ein stabiler Produktionsbetrieb einstellt und die Materialien ausreichend getrocknet werden. Zusätzlich ist ein ungeplanter Mühlenstart mit erheblichem organisatorischen Aufwand verbunden und benötigt i.d.R. zusätzliches Personal in Bereitschaft (Kapitel 4.6.5). Für einen effektiven und stabilen Mühlenbetrieb mit gesicherter Produktqualität werden auch im Nachgang zu einer kurzfristigen Abschaltung mindestens 4 Stunden andauernder Betrieb angesetzt. Gleichzeitig sollte eine kurzfristige Abschaltung auf ca. 1 bis 2 Stunden begrenzt werden, um ein weitreichendes Auskühlen der Mühlen und Auswirkungen auf die Produktqualität zu vermeiden.

Für Modell 1 und 2 ergibt sich entsprechend nur für die positive Regelleistung ein kurzfristiges technisches Flexibilitätspotential (Tabelle 8.5, Tabelle 8.6). Die Produktspeicherkapazität ist ausreichend groß um kurzfristige Abschaltungen der Mühlen überbrücken zu können, wenn wie im Produktionsbetrieb eines Zementwerks üblich, möglichst volle Silosstände angestrebt werden. Die Einschätzung der maximalen Regelenergie ergibt sich aus der maximalen Dauer der kurzfristigen Lastminderung und entsprechend der Beschreibung des Anforderungsprofils 1.

Positive Regelleistung durch kurzfristige Lastminderung	Einheit	Modell 1:	Modell 2:		
		Mahlwerk	nur Zementmahlung	nur Rohmahlung	Integriertes Zementwerk mit Klinkerproduktion
Maximale positive Regelleistung (Volllast)	MW	5,0	7,7	3,0	10,7
Einschätzung zur Dauer der Lastminderung entsprechend Anforderungsprofil 1	Stunden	0,25 bis 2	0,25 bis 2	0,25 bis 2	0,25 bis 2
Einschätzung zum minimalen zeitlichen Abstand zwischen Lastanpassungen	Stunden	> 4	> 4	> 4	> 4
Maximale positive Regelenergie (Volllast)	MWh	1,25 bis 10	1,9 bis 15	0,75 bis 6	2,7 bis 21

Negative Regelleistung durch kurzfristige Lasterhöhung	Einheit	Modell 1:	Modell 2:		
		Mahlwerk	nur Zementmahlung	nur Rohmahlung	Integriertes Zementwerk mit Klinkerproduktion
Maximale negative Regelleistung (Volllast)	MW	i.d.R. nicht kurzfristig verfügbar, erforderliche Betriebszeit > 4 Stunden	i.d.R. nicht kurzfristig verfügbar, erforderliche Betriebszeit > 4 Stunden	i.d.R. nicht verfügbar	i.d.R. nicht kurzfristig verfügbar, erforderliche Betriebszeit > 4 Stunden
Einschätzung zur Dauer der Lasterhöhung	Stunden				

Tabelle 4.6: Einschätzung der technischen Potentiale zum flexiblen Energieeinsatz für kurzfristige Lasterhöhung nach Anforderungsprofil 1

4.5.2 MITTELFRISTIGEN FLEXIBILITÄT NACH ANFORDERUNGSPROFIL 2

Die Einschätzung der technischen Potentiale zur mittelfristigen Flexibilität nach Anforderungsprofil 2 erfordern eine weitere Untersuchung der Speicherkapazitäten in Silos und der produktionstechnischen und organisatorischen Voraussetzungen. Der maximale Speicherinhalt beschreibt rein theoretisch den Regelenergieinhalt der Produktmenge zwischen technisch möglichem minimalem und maximalen Silofüllstand. Um gleichzeitig positive und negative Regelleistung einzurichten, sollten mittlere Silostände zwischen einem praktikablen Minimal- und Maximalbestand angestrebt werden. Füllung und Leerung der Silokapazitäten erlauben dann eine mittelfristige Lastminderung oder -erhöhung in der Zementmahlung nach Anforderungsprofil 2 über 3 bis 12 Stunden (Tabelle 4.7, Tabelle 4.8). Durch die dauerhafte Speicherung im Produkt Zement können Produktionszeiten theoretisch über sehr lange Zeiträume verschoben werden. Praktisch und organisatorisch wird die Einhaltung von Produktionsplänen ein Nachholen innerhalb weniger Tage erforderlich machen.

Eine gleichzeitige Laständerung an allen Zementmühlen scheint als Maximalszenario zwar theoretisch möglich, wäre allerdings mit großem organisatorischen Aufwand und starken Einschränkungen und Eingriffen in die Produktionsplanung und diesbezügliche Schichtplanung verbunden. Praktikabler und hinsichtlich des organisatorischen Aufwands sehr viel effizienter erscheint deshalb die Nutzung des Flexibilitätspotentials und der Regelleistung einer großen Mühle. Oft wird eine Mühle mit hoher Produktionskapazität für die Produktion der Hauptsorte(n) der Produkte eines Zementwerkes genutzt. Für die Lagerung der Hauptsorte(n) sind meist große oder mehrere Silos eingerichtet. Der regelmäßige eingeplante Produktionsbetrieb für die Hauptsorte(n) lässt einen geringeren Aufwand zur organisatorischen Anpassung und bessere Verfügbarkeit zur Flexibilität vermuten. Voraussetzung ist, dass die Mühle unabhängig von anderen Anlagenteilen ein und ausgeschaltet werden kann. Wenn lediglich die größte Mühle für den flexiblen Betrieb eingesetzt wird, reduzieren sich Regelleistung und Regelenergie entsprechend (Tabelle 4.7, Tabelle 4.8). Die Mühlen sind technisch i.d.R. auf die Produktion bestimmter Zementsorten ausgelegt und optimiert. Es stehen also für die Produkte einer Mühle i.d.R. nicht alle Silos mit ihrer Speicherkapazität zur Verfügung. Es kann in erster Näherung davon ausgegangen werden, dass in Bezug auf die Produktionskapazität einer große Mühle

die für ihre Produkte verfügbare Silokapazität verhältnismäßig ähnlich groß ist, wie im Verhältnis für alle Mühlen und alle Zementsilos angenommen.

Im normalen Betrieb eines Zementwerks ist es vorteilhaft Materiallager in Silos möglichst gut gefüllt zu haben. Dann können etwaige Störungen im Produktionsbetrieb durch ausreichende Vorräten gut überbrückt werden. Auch deshalb muss ein Produktionsausfall durch Lastverschiebung innerhalb weniger Tage (nach Möglichkeit ein bis drei Tage) wieder ausgeglichen werden. Dies gilt besonders für die Bevorratung von Rohmehl, dessen ausreichende Verfügbarkeit (mindestens eine Tagesproduktion) eine wichtige Voraussetzung für den kontinuierlichen Klinkbrennprozess darstellt. Für die Rohmahlung muss das Potential zur Lastreduktion weniger entsprechend der Bevorratung (z.B. 12 Stunden) sondern eher anhand der beschränkten Möglichkeit zum Nachholen der Produktion bei hoher Kapazitätsauslastung der Rohmühle eingeschätzt werden (geringes bzw. ggf. fehlendes Potential, 0 Stunden, Tabelle 4.7). Aufgrund dieser Bedingung scheint weiterhin eine Beendigung der Lastverschiebung nach 24 Stunden erforderlich. Die oft einmonatige Revision der Ofenanlage bedingt gleichzeitig den geplanten Stillstand der Rohmühle, so dass bei der Rohmahlung während der Revisionszeit kein Flexibilitätpotential verfügbar ist. Entsprechend der möglichst vollständigen Füllung der Rohmehlsilos ist bei der Rohmahlung auch mittelfristig i.d.R. kein negative Regelleistung durch Lasterhöhung verfügbar (Tabelle 4.8).

Im Gegensatz hierzu wird für die Zementmahlung außerhalb der Hauptsaison ein Potential für mittelfristige negative Regelleistung eingeschätzt. Als Voraussetzung für eine effiziente Zementproduktion wird allerdings eine ununterbrochene Mühlenlaufzeit von mindestens vier Stunden erwartet (Tabelle 4.8).

Die beste Verfügbarkeit der technischen Flexibilitätpotentiale kann in Zeiten mittlerer Produktionsauslastung erwartet werden. Aus den geplanten Mühlenbetriebszeiten ergibt sich zudem eine höhere Wahrscheinlichkeit für die Möglichkeit zur Lasterniedrigung bei guter (zeitlich überwiegender) Auslastung und zur Lasterhöhung bei mäßiger Auslastung.

In Phasen besonders starker Produktnachfrage stellen aber auch bei der Zementmahlung einerseits die fast vollständig eingeplanten Mühlenlaufzeiten und andererseits die fehlenden Möglichkeiten zum Nachholen ausgesetzter Produktion bei unveränderter Produktionskapazität eine wesentliche Einschränkung der technischen Potentiale zum flexiblen Energieeinsatz dar.

Während der für die Zementmühlen vorgesehenen Revision ist oft ein Stillstand der Mühlen für schätzungsweise 1 bis 2 Wochen eingeplant und deshalb ggf. kein Potential zum flexiblen Stromeinsatz vorhanden. Unmittelbar vor und nach der Revision wird von einem eingeschränkten Potential ausgegangen, da der geplante Stillstand ggf. durch vor- und nachläufig festgelegte Produktionszeiten überbrückt werden muss.

Positive Regelleistung durch mittelfristige Lastminderung	Einheit	Modell 1:	Modell 2:		
		Mahlwerk	nur Zementmahlung	nur Rohmahlung	Integriertes Zementwerk mit Klinkerproduktion
Maximale positive Regelleistung (Volllast)	MW	5,0	7,7	3,0	10,7
Positive Regelleistung (eine große Mühle je Werk)	MW	ca. 2,5	ca. 3,5	ca. 3,0	ca. 3,5
Einschätzung zur Dauer der Lastminderung entsprechend Anforderungsprofil 2	Stunden	3 bis 12	3 bis 12	0 bis 12	3 bis 12
Einschätzung zur möglichen zeitlichen Lastverschiebung	Stunden	ca. 48 bis 72	ca. 48 bis 72	ca. 24	ca. 24 bis 48
Theoretisch maximaler Speicherinhalt (alle Silos)*	MWh	610	950	100	1.030
Maximale positive Regelernergie (Volllast)	MWh	15 bis 60	23 bis 93	0 bis 36	32 bis 128
Positive Regelernergie (eine große Mühle je Werk)	MWh	ca. 8 bis 30	ca. 11 bis 42	ca. 0 bis 36	ca. 11 bis 42

Einschätzung der saisonalen Verfügbarkeit

Hauptsaison		bei sehr starker Auslastung ggf. nur eingeschränkt verfügbar (lange Nachholzeiten)			
Nebensaison		beste Verfügbarkeit bei guter Auslastung			
Revisionszeit		Potential eingeschränkt, bei geplanter Revision nicht verfügbar	Potential eingeschränkt, bei geplanter Revision nicht verfügbar	nicht verfügbar	Potential eingeschränkt, bei geplanter Revision nicht verfügbar

Tabelle 4.7: Einschätzung der technischen Potentiale zum flexiblen Energieeinsatz für mittelfristige Lastminderung nach Anforderungsprofil 2

* Für eine Abschätzung des Potentials zur angfristigen Lastanpassung nach Anforderungsprofil 3 sind eine sortenspezifische Nutzung der Mühlen und Belegung der Silos sowie der jeweils tatsächlich erreichte Füllstand einschränkend zu berücksichtigen.

Negative Regelleistung durch mittelfristige Lasterhöhung	Einheit	Modell 1:	Modell 2:		
		Mahlwerk	nur Zementmahlung	nur Rohmahlung	Integriertes Zementwerk mit Klinkerproduktion
Maximale negative Regelleistung (Volllast)	MW	-5,0	-7,7	i.d.R. nicht verfügbar	-7,7
Negative Regelleistung (eine große Mühle je Werk)	MW	ca. -2,5	ca. -3,5		ca. -3,5
Einschätzung zur Dauer der Lastminderung entsprechend Anforderungsprofil 2	Stunden	4 bis 12	4 bis 12		4 bis 12
Einschätzung zur möglichen zeitlichen Lastverschiebung	Stunden	ca. 48 bis 72	ca. 48 bis 72		ca. 48 bis 72
Maximale negative Regelenergie (Volllast)	MWh	-20 bis -60	-31 bis -93		-31 bis -93
Negative Regelenergie (eine große Mühle je Werk)	MWh	ca. -8 bis -30	ca. -11 bis -42		ca. -11 bis -42

Einschätzung der saisonalen Verfügbarkeit

Hauptsaison		bei sehr starker Auslastung i.d.R. nicht verfügbar (wenige geplante Zeiten ohne Betrieb/Last)			
Nebensaison		beste Verfügbarkeit bei mäßiger Auslastung	beste Verfügbarkeit bei mäßiger Auslastung	i.d.R. nicht verfügbar	beste Verfügbarkeit bei mäßiger Auslastung
Revisionszeit		bei geplanter Revision nicht verfügbar	bei geplanter Revision nicht verfügbar	nicht verfügbar	bei geplanter Revision nicht verfügbar

Tabelle 4.8: Einschätzung der technischen Potentiale zum flexiblen Energieeinsatz für mittelfristige Lasterhöhung nach Anforderungsprofil 2

4.5.3 EINSCHÄTZUNG DER TECHNISCHEN POTENTIALE ZUM FLEXIBLEN ENERGIEEINSATZ FÜR LANGFRISTIGE LASTANPASSUNGEN NACH ANFORDERUNGSPROFIL 3

Erste Ansätze zur Einschätzung der technischen Potentiale zum flexiblen Energieeinsatz für langfristige Lastanpassungen nach Anforderungsprofil 3 wurden auf der Grundlage der Modelle 1 und 2 unternommen. Hierfür wurde unter anderem ein einfaches Batteriemodell angesetzt [17]. Die Analyse der Ergebnisse haben allerdings vielfältige Einflüsse der tatsächlichen Mühlennutzung auf das technische Potential gezeigt, die nicht ausreichend durch das Batteriemodell wiedergegeben werden. Eine weitere Untersuchung ist in der geplanten folgenden Projektphase vorgesehen. Vorläufig lassen sich folgende Erkenntnisse aus den ersten Ergebnissen zusammenfassen:

- Für eine Abschätzung des technischen Flexibilitätpotentials zur langfristigen Lastanpassung nach Anforderungsprofil 3 sind neben der Regelleistung gemäß des theoretisch maximal möglichen Speichergehalts aller Silos (Tabelle 4.7) die sortenspezifische Nutzung der Mühlen und Belegung der Silos sowie der jeweils tatsächlich erreichte Füllstand einschränkend zu berücksichtigen.
- Technische Potentiale für eine positive Regelleistung durch langfristige Lastminderung sind bei starker Auslastung (Hochsaison) im Prinzip am höchsten aber aufgrund der starken Produktnachfrage und der begrenzten Kapazitäten und Zeiten zur Nachholung ausgefallener Produktion i.d.R. nicht verfügbar oder stark eingeschränkt. Ähnliche Einschränkungen wurden für den flexiblen Rohmühlbetrieb und das Nachholen der Produktion bei hoher Kapazitätsauslastung der Rohmühle beschrieben (Kapitel 4.5.2).
- Die beste Verfügbarkeit ist bei einer mittleren Auslastung der Anlagen zur Zementproduktion zu erwarten.
- Die Verfügbarkeit positiver Regelleistung ist eingeschränkt in Zeiten mit geringer planmäßiger Produktion (Nebensaison) möglich. In der Hauptsaison sind lange Abrufungsdauern i.d.R. nicht möglich.
- In Zeiten der geplanten Revision sind durch den Anlagenstillstand keine Potentiale zur Lastanpassung verfügbar, bzw. der Einsatz elektrischer Energie ist nach Planung bereits minimal zu erwarten.
- Die Planung der Revisionszeiten in Abstimmung mit der längerfristigen Personalplanung des Werkes und Beauftragung externen Dienstleistern lässt i.d.R. keine zeitliche Verschiebung der Revisionszeiten im Zusammenhang mit dem Anforderungsprofil 3 und nach einer Ankündigungszeit von weniger als einer Woche zu. Eine strategische Planung der Revisionszeiten könnte allerdings die sehr langfristige erwartbare Nachfrage nach flexiblem Energieeinsatz nach Anforderungsprofil 3 neben vielen weiteren ausschlaggebenden Faktoren mit in Betracht ziehen.
- Aufgrund der nötigen Produktbevorratung und damit einhergehend geringer freier Silokapazitäten zur Aufnahme zusätzlicher Produkte werden zunächst keine Potentiale für eine langfristige negative Regelleistung durch andauernde Lasterhöhung in Zementwerken gesehen.

4.5.4 EINSCHÄTZUNG MAXIMALER TECHNISCHER POTENTIALE ZUM FLEXIBLEN ENERGIEEINSATZ IN DER ROH- UND ZEMENTMAHLUNG IN DEUTSCHLAND

Die VDZ-Modelle 1 und 2 erlauben eine theoretische Hochrechnung zur Bestimmung maximaler technischer Flexibilitätspotentiale der beiden Referenzprozesse Rohmahlung und Zementmahlung für die Zementindustrie in Deutschland. Zu betonen bleibt, dass viele standortspezifische Einschränkungen des technischen Potentials für eine genauere Einschätzung notwendig wären.

Erfahrungen, die in benachbarten Ländern gemacht wurden, können hier als konkrete Beispiele fungieren. Dem VDZ ist ein Zementwerk bekannt, das die größte am Standort vorhandene Zementmühle bereits mit einem Flexibilisierungskonzept ausgerüstet hat, um nötigen Nachfragen seitens des Energieversorgers zur Lastreduktionen zu entsprechen. Im gegebenen Beispiel gab es kein starres Stromtarifmodell mit Hoch- und Niedertarifen (HT-/NT-Regelung). Vielmehr wurde eine vertragliche Vereinbarung mit dem Anbieter geschlossen, um Lastreduktionen bereitstellen zu können. Die Rahmenbedingungen wurden im Vorfeld festgelegt, hierzu zählen u.a.

- Ein Vetorecht seitens des Betreibers, d.h. der Betrieb bleibt garantiert.
- Mögliche Abschaltzeiträume werden eine Woche im Voraus gemeldet.
- Mögliche Abschaltzeiten von max. 4 Stunden wurden festgelegt, wobei diese i.d.R. auf 30 bis 90 min begrenzt blieben.
- Bei Nichterfüllung der Reduktionsforderung ist keine Strafe zu entrichten, was die Einführung eines derartigen Systems für die Zementhersteller wesentlich attraktiver macht.

Dearartig klare Rahmenbedingungen ohne erhebliche Nachteile für den Produktionsbetrieb erlauben eine Einschätzung der Risiken und sind für die Attraktivität und die Bereitschaft der Grundstoffindustrie zur Bereitstellung von Flexibilität besonders wichtig.

Vor diesem Hintergrund wurde die Einschätzung für die Regelleistung bei mittelfristigen Lastanpassungen nach Anforderungsprofil 1 und 2 auf das Potential einer großen Mühle pro Werk eingeschränkt (Tabelle 4.9). Weiterhin bleiben Hemmnisse und Voraussetzungen zur praktischen Umsetzung und hinsichtlich der ökonomischen Voraussetzungen, d.h. der ggf. nötigen Investitionen und der Kompensation des zusätzlichen Betriebsaufwands zu berücksichtigen (siehe auch Kapitel 4.4, 4.5 und 4.6).

	positive Regelleistung durch Lastminderung	negative Regelleistung durch Lasterhöhung	Zeiträumen der Lastanpassung
Einheit	MW	MW	Stunden
Kurzfristige Lastanpassungen nach Anforderungsprofile 1 (eine große Mühle je Werk)	ca. +172	i.d.R. nicht kurzfristig verfügbar	0,25 bis 2 Stunden, nachfolgend > 4 Stunden garantierter Betrieb und nachholen der Lastmin- derung
Mittelfristige Lastanpassungen nach Anforderungsprofile 2 (eine große Mühle je Werk)	ca. +172	ca. -172	4 bis 12 Stunden, Lastver- schiebung: ca. 48 Stunden

Tabelle 4.9: Einschätzung maximaler technischer Potentiale zum flexiblen Energieeinsatz in der Roh- und Zementmahlung in Deutschland. Hochrechnung als Summe für alle Werke entsprechend Modell 1 für Mahlwerke & Modell 2 für integrierte Zementwerke mit Klinkerproduktion.

4.5.5 ERGEBNISÜBERSICHT

Tatsächlich in der Betriebspraxis nutzbare und ökonomisch realisierbare Potentiale sind grundsätzlich geringer als die modellierten und technischen Potentiale einzuschätzen (Kapitel 4.4). Somit müssen die hier dargestellten technischen Potentiale und ihre theoretische Hochrechnung in Tabelle 4.10 durch erforderliche werksspezifische Voraussetzungen sowie praktische und ökonomische Hemmnisse weiter eingeschränkt werden. Soweit möglich sind Voraussetzungen und Hemmnisse, die das technische Flexibilitätspotential praktisch und ökonomisch weitere einschränken, in den Kapiteln 4.5 bis 4.7 beschrieben.

Referenzprozess, Modell	Branche, Werke	Regelleistung	Maximales Technisches Potential (Volllast)	mittlere Auslastung, Betriebsstunden pro Jahr
			MW	%, Stunden
Zementmahlung, Modell 1	Zementmahlwerke	Lasterhöhung (negativ)	-105	40 %, 3.500 Stunden
		Lastreduktion (positiv)	+105	40 %, 3.500 Stunden
Zementmahlung, Modell 2	integrierte Zementwerke	Lasterhöhung (negativ)	-263	57 %, 5.000 Stunden
		Lastreduktion (positiv)	+263	57 %, 5.000 Stunden
Rohmahlung, Modell 2	integrierte Zementwerke	Lasterhöhung (negativ)	0	80 %, 7.000 Stunden
		Lastreduktion (positiv)	+100	80 %, 7.000 Stunden
Zementmahlung, Modelle 1+2: alle Zementwerke	Zementindustrie	Lasterhöhung (negativ)	-470	
		Lastreduktion (positiv)	+470	

Tabelle 4.10: Einschätzung technischer Potentiale zum flexiblen Energieeinsatz in der Roh- und Zementmahlung in Deutschland. Hochrechnung als Summe für Zementwerke in Deutschland entsprechend Modell 1 für Mahlwerke & Modell 2 für integrierte Zementwerke mit Klinkerproduktion.

Technisches Potential (Lastverschiebung für eine große Mühle je Werk bei mittlerer Auslastung)			Eingeschränktes technisches Potenzial unter Berücksichtigung von 50 % Verfügbarkeit ²	
MW	MW	MW	MW	MW
Anforderungsprofil 1 ³	Anforderungsprofil 2 ⁴	Anforderungsprofil 3 ⁵	Anforderungsprofil 1	Anforderungsprofil 2
i.d.R. kein Potential	-52	derzeit i.d.R. kein Potential	i.d.R. kein Potential	i.d.R. kein Potential
+52	+52	eingeschränkt <52	+26	+26
i.d.R. kein Potential	-120	derzeit i.d.R. kein Potential	i.d.R. kein Potential	-60
+120	+120	eingeschränkt <120	+60	+60
i.d.R. kein Potential	i.d.R. kein Potential	derzeit i.d.R. kein Potential	i.d.R. kein Potential	i.d.R. kein Potential
+100	+100	eingeschränkt <100	+50	+50
i.d.R. kein Potential	-172	derzeit i.d.R. kein Potential	i.d.R. kein Potential	-86
+172	+172	eingeschränkt <172	+86	+86

² unter der Annahme, dass zum Zeitpunkt der Abfrage die Hälfte der Anlagen für eine Lastanpassung zur Verfügung steht.

³ i.d.R. keine kurzfristige Lasterhöhung möglich, Lastminderung 0,25 bis 2 Stunden, nachfolgend > 4 Stunden garantierter Betrieb und nachholen der Lastminderung

⁴ nachholen bei Lastminderung erforderlich

⁵ derzeit i.d.R. kein langfristige Lasterhöhung möglich, Potential zur Lastminderung ist anlagen-spezifisch und nach Lagerbestandssituation eingeschränkt

4.6 HEMMNISSE UND EINSCHRÄNKUNGEN DES TECHNISCHEN POTENTIALS

Die im Kapitel 4.5 ausgewiesenen technischen Potentiale stehen nicht an jedem Standort, nicht zu jeder Zeit und nur unter Voraussetzung entsprechender ökonomischer Rahmenbedingungen zur Verfügung. Des Weiteren erfordert ihre Hebung teilweise organisatorische Umstellungen. Hinweise auf die speziellen Voraussetzungen in Bezug auf die Anforderungsprofile 1 bis 3 finden sich bereits in Kapitel 4.5. Im Folgenden werden auf der Grundlage der Expertengespräche [7] wichtige Hemmnisse und Einschränkungen für die Nutzung der technischen Potentiale bezogen auf technische, organisatorische und ökonomische Aspekte zusammengefasst.

4.6.1 TECHNISCHE HEMMNISSE ZUR FLEXIBILISIERUNG DER ROHMÜHLEN

Der Betrieb der Rohmühle eines integrierten Zementwerkes unterliegt besonderen Anforderungen hinsichtlich der Versorgungssicherheit des Drehrohrofens mit Rohmehl. In der Regel handelt es sich um Mahltrocknungsanlagen die weit überwiegend im sogenannten Verbundbetrieb mit dem Drehofen betrieben werden. Es ergeben sich hohe jährliche Einsatzstunden von oft ca. 7.000 Stunden/Jahr und – bezogen auf die Laufzeit des Drehrohrofens – oft mehr als 90 % Auslastung der Rohmühlen. Da die Rohmühlen demnach i.d.R. kontinuierlich in Betrieb sind, ist eine Bereitstellung von negativer Regelleistung durch Anschalten der Mühle in den meisten Werken nicht möglich.

Die Abschaltung dieser Mahlanlagen ist kritisch hinsichtlich einer optimalen Energienutzung im Verbundbetrieb der Rohmahlung mit der Klinkerproduktion und der Absicherung der nachgelagerten Klinkerproduktion. Dies gilt insbesondere, wenn die zwischengeschalteten Silos vergleichsweise geringe Kapazitäten oder geringen aktuellen Füllstand haben. Technische Probleme beim Wiedereinschalten der Mahlanlagen und Rohmehlproduktion können nicht vollständig ausgeschlossen werden. Deshalb ist ein ausreichend großer Vorrat an Rohmehl erforderlich, um jederzeit Material für einen Neustart des Drehrohrofens vorzuhalten. Rohmühlen verfügen i.d.R. nur über geringe Überkapazitäten und sind daher nur in den wenigsten Fällen in der Lage nicht stattgefundene Produktion kurzfristig wieder nachzuholen. Das Potenzial zur regelmäßigen Bereitstellung von Regelenergie durch die Rohmühle(n) beschränkt sich daher auf wenige Standorte mit ausreichend großer Kapazität der Rohmühle(n) im Vergleich zur Kapazität des Drehrohrofens. Lediglich in Einzelfällen kann ein Teil der Mahltrocknung, beispielsweise bei einer vorhandenen externen Vor-Trocknung, flexibilisiert werden.

Der sogenannte Direktbetrieb des Drehrohrofens ohne Rohmühle ist auch im Hinblick auf Energieeffizienz und Emissionsreduktion ungünstiger, da im Verbundbetrieb bei der Mahltrocknung heiße Ofenabgase besonders energieeffizient zur Trocknung der Rohmaterialien verwendet

werden, und die hohe spezifische Oberfläche des Rohmehls gleichzeitig die Abgasreinigung unterstützt. Somit sprechen sowohl energetische wie auch emissionschutztechnische Gründe gegen eine häufige Abschaltung der Rohmühle.

4.6.2 TECHNISCHE HEMMNISSE ZUR FLEXIBILISIERUNG DER ZEMENTMAHLUNG

Die Qualität des Zementes als Produkt ist von übergeordnetem Interesse für den erfolgreichen Betrieb eines Zementwerks. Eine Beeinträchtigung der Qualität ist daher technisch und ökonomisch nicht tolerierbar. Die Flexibilisierung der Zementmühlen kann unter Umständen diverse Probleme hinsichtlich der Zementqualität verursachen:

Die Entwässerung des bei der Zementmahlung beigefügten Sulfatträgers (z.B. Gips) ist entscheidend für die Qualität des Produkts Zement. Da die für die Entwässerung nötige thermische Energie durch den Mahlvorgang selbst erzeugt wird ist bei Stillständen die zeitliche Begrenzung thermischer Verluste in der Mahlanlage besonders wichtig. Ein starkes Auskühlen der Mühle sollte verhindert werden. Hierbei zeigen sich auch sortenabhängige Einflüsse. Werden sehr feuchte Hauptbestandteile (z.B. Hüttensand) mit vermahlen könnten längere Abschaltdauern (1 bis 4 Stunden) problematisch werden.

Bei Wiederanfahrvorgängen und Sortenwechseln stellt sich unter Umständen nicht direkt die gewünschte Produktqualität ein. In Übergangphasen könnten sehr geringe Mengen des beim Anfahren erzeugten, unfertigen Produkts zwischengelagert werden. In begrenztem Umfang können diese durch erneute Verarbeitung später in ein verkaufsfertiges Produkt überführt werden, das dann die erforderlichen Qualitätsstandards sicher einhält. Dabei entstehen jedoch Mehraufwände für die Lagerung und die zumindest teilweise erneute Verarbeitung mit einem zusätzlichen Energieeinsatz von ca. 2 %.

4.6.3 EINFLUSS DER SILOKAPAZITÄT

Die Entkopplung der Teilprozesse in der Zementproduktion durch Materiallager und Silos ermöglicht technisch eine teilweise Flexibilisierung. Pauschale Bewertungen der Lagerkapazitäten sind jedoch vor dem Hintergrund standortabhängiger Gegebenheiten und Einflüsse schwierig. Silos werden nach ihrer Gesamtkapazität ausgewiesen, allerdings zeigen sich statische Einschränkungen besonders bei älteren Silos, die zur Minimierung des Risikos einer Rissbildung ggf. nicht vollständig gefüllt werden können. Hierbei spielen auch Änderungen in der Normierung von Silobauwerken und den Bemessungsgrundlagen eine Rolle.

Besonders bei der Rohmehlproduktion ist die Lagerkapazität für eine kontinuierliche Klinkerproduktion im Drehrohrofen als kritische Größe zu betrachten. Der Füllstand der Silos ist entscheidend für die Betriebs-

sicherheit. Im normalen Betrieb wird der maximale Füllstand der Silos anvisiert. Um die Klinkerproduktion nicht zu gefährden, muss in jedem Fall genügend Rohmehl für 1 bis 2 Tage Klinkerproduktion zur Verfügung stehen. Entsprechend kann nur ein Teil der Silokapazität zur Flexibilisierung der Rohmühle genutzt werden (vgl. Tabelle 4.4). An einigen Standorten werden die Rohmehlsilos gleichzeitig als Homogenisierungssilos genutzt. In diesen Fällen ist eine Nutzung der Silokapazität zur Flexibilisierung meist nicht möglich.

Im Zementsilo muss eine Mindestmenge Material vorgehalten werden um einen sicheren Betrieb für die Entnahme zu gewährleisten. Durch die Hitze im Silo kann es zur Nachentwässerung des im Zement enthaltenen Gipses zu Halbhydrat kommen. Ist kein ausreichender Füllstand vorhanden, kann es dabei aufgrund unzureichender Dehydrierung zu Klumpenbildung (Vorhydratation des Zements) kommen. In einem durchschnittlichen Zementwerk werden etwa 10 bis 12 verschiedene Zementsorten in einer Vielzahl von Zementsilos gelagert. Die Größen der einzelnen Silos orientieren sich dabei üblicherweise an den Abnahmezahlen der Produkte, d.h. stark nachgefragter Zement (z.B. die Hauptsorte) wird oft im größten Silo gelagert. Es kann aber bedingt durch Großprojekte zu starker Nachfrage von anderen Zementen kommen. Die Produktion und Lagerhaltung wird dann dementsprechend angepasst. Ein großer Teil der Silokapazitäten werden für diesen flexiblen Betrieb zwischen Produktion und Abnahme und für eine hohe Lieferbereitschaft benötigt. Generell sind größere Silokapazitäten zur Steigerung der Flexibilität der Mahlanlagen vorteilhaft.

4.6.4 ÖKONOMISCHE HEMMNISSE UND TARIFSYSTEME

Die Zementunternehmen in Deutschland sind seit langem durch eine langfristige und genaue kurzfristige Planung von Stromeinsätzen (Stromfahrplänen) ein klassischer Anbieter von Flexibilität im Strommarkt (Demand Side Management). Hierbei werden Zementmühlen vorwiegend im Niedertarif (NT) in der Nacht betrieben und Stillstandszeiten nach Möglichkeit im Hochtarif (HT) am Tag angesiedelt. Weiterhin werden Lastspitzen durch genaue zeitliche Planung und Steuerung der Einsatzzeiten von Maschinen mit großer Last vermieden.

In Deutschland sind momentan die ökonomischen Vorteile für die Zementbetriebe, die aus einer weiterführenden Flexibilisierung der Fahrweise gezogen werden könnten, nach Expertenmeinungen [7] zu gering, um eine entsprechende Entwicklung zu befördern. Dies wird durch aktuelle Erfahrungen in Zementunternehmen in Deutschland untermauert, die gezeigt haben, dass im HT/NT-Tarifsysteem zusätzliche Vereinbarungen zur Nutzung von Flexibilitäten im Vergleich zum ökonomischen, organisatorischen und technischen Mehraufwand für den Betreiber eines Zementwerks meist nicht wirtschaftlich sind. Individuelle Lösungen z. B. durch direkte Beteiligungen an Kraftwerken sowie eigene Kraftwerke zum Ausgleich von Hochtarifzeiten sind jedoch in einigen Fällen bereits jetzt ökonomisch tragfähig. Erfahrungen aus Nachbarländern haben gezeigt, dass bei entsprechender Kompensation des ökonomischen Mehraufwands durch geeignete und zuverlässige Vertragsgestaltung die Flexibilisierung wirtschaftliche Potentiale aufweisen kann, und daher

auch entsprechenden Zuspruch bei Zementunternehmen findet. Alternativ sind in Deutschland einzelne Zementunternehmen regelmäßig an der Strombörse aktiv. Hierbei werden in Zeiten mäßiger Auslastung freie Produktionskapazitäten punktuell zur Flexibilisierung eingesetzt. Die hierbei oft nur für kurze Zeiträume erzielten Gewinne und Verluste durch niedrigere oder höhere Strombeschaffungskosten scheinen größere und langfristige Investitionen für eine Steigerung der Flexibilität nicht zur rechtfertigen.

Die Flexibilisierung der Roh- und Zementmahlung kann sich negativ auf den Verschleiß der Anlagen auswirken. Aus aktuellen Betriebserfahrungen ist aufgrund der relativ niedrigen Häufigkeit zusätzlicher Ein- und Abschaltvorgänge jedoch keine generelle Aussage möglich. Besonders die in Anforderungsprofil 1 aufgezeigte Perspektive kann die Häufigkeit der Ein- und Abschaltvorgänge jedoch stark vergrößern und könnte damit den Verschleiß stark erhöhen. Entsprechen müsste mit höheren Reparatur und Wartungskosten gerechnet werden. Eine praxisbezogene Bestimmung der Auswirkung flexibler bzw. häufigerer Anlagenschaltungen auf den Verschleiß wäre die nötige Grundlage für eine genauere Kostenschätzung und darauf aufbauende Wirtschaftlichkeitsrechnung.

Ein wichtiges ökonomisches Hemmnis stellen große Ungewissheiten bei der Entwicklung am Strommarkt dar. Um Flexibilität im Stromeinsatz zu ermöglichen sind i. d. R. langfristig zu amortisierende Investitionen seitens des Zementwerksbetreibers nötig. Entsprechend muss eine ausreichende Planungssicherheit bestehen, dass diese Investitionen ökonomisch langfristig tragfähig sind. Dies gilt insbesondere falls Silokapazitäten erweitert werden müssten, was sehr hohe Investitionen erfordern würde. Aus heutiger Sicht sind diese Investitionen nicht amortisierbar.

Ein weiteres ökonomisches Risiko ergibt sich aus möglichen Lastspitzen, die einen höheren Leistungspreis⁶ nach sich ziehen. Wie oben beschrieben werden durch genaue zeitliche Planung und Steuerung der Einsatzzeiten großer Stromverbraucher Lastspitzen nach Möglichkeit vermieden. Eine Flexibilisierung erhöht hier den Abstimmungsbedarf zwischen Zementwerksbetrieb und Stromanbieter und damit die Wahrscheinlichkeit von Abstimmungsproblemen, die Möglichkeit für gravierende Fehler [20] und hierbei entstehende ökonomische Risiken. Um diese Risiken für die Zementwerkbetreiber zu reduzieren, könnten z. B. vertragliche Garantien gegeben oder Ausnahmeregelungen beim Leistungspreis berücksichtigt werden.

Besonders wichtig für den Zementhersteller sind ausreichende vertragliche Sicherheiten. Hierzu zählen unter anderem:

- Das Nachholen nicht stattgefundener Produktion während einer zuvor geplanten Abschaltzeit und Aufholen des Produktionsdefizits zur Sollproduktion muss gewährleistet werden.
- Nach Abschaltungen der Mahlanlagen muss i. d. R. eine kontinuierliche Betriebsdauer von mindestens 4 Stunden gewährleistet sein. Nur so kann ein stabiler Mühlenbetrieb und eine hohe gleichbleibende Qualität der Zementprodukte sichergestellt werden.
- Die Zwangsabschaltung der Anlagen gegen den Willen des Betreibers muss ausgeschlossen sein. Der Schutz der Anlagen und die Einhaltung von Lieferverpflichtungen sind von übergeordnetem Interesse.

⁶ Der Leistungspreis ist Teil des Strompreises gewerblicher und industrieller Großverbraucher und ergibt sich nach der in einem bestimmten Zeitraum (z. B. ein Jahr oder ein Monat) maximal angeforderten Leistung (gemittelt über 15 Minuten).

4.6.5 PERSONALPLANUNG

Die Flexibilisierung der Zementmühlen hängt stark von den Möglichkeiten der Personal- und Schichtplanung ab. Die Personalplanung ist aktuell an die Bedingungen im Werk und das jeweilig verwendete Tarifmodell gekoppelt. Ein voll integriertes Werk wird von einer Besetzung von nur ca. 5 bis 6 Personen mit unterschiedlichen Kompetenzen und Möglichkeiten der wechselseitigen Vertretung betrieben. Je nach Standort und Auslastung läuft der Zementmühlenbetrieb häufig nur in einer oder zwei (von insgesamt 3) Schichten. Nach Angaben eines Experten [7] wird für diese Schichten – entsprechend dem Stromfahrplan üblicherweise Spät- bzw. Nachtschichten – eine zusätzliche Person zur Produktion eingeplant. In der Tagschicht wäre daher häufig kein Mitarbeiter eingeplant, der die Zementmühle betreiben könnte. Für eine regelmäßige kurzfristige Reaktion auf Änderungen im Strompreis müsste daher ggf. die Personaldecke erhöht werden („Springer“, Personal in Bereitschaft, Beispiel in Kapitel 4.7.1). Ein anderer Experte berichtete hingegen, dass in der Tagschicht generell mehr Personal im Werk ist, als in der Nachtschicht. Entsprechend wäre in der Tagschicht nicht mit einem Personalengpass zu rechnen, wenn im Bedarfsfall geeignet qualifiziertes Personal kurzfristig verfügbar ist.

Besonders um kurzfristigen Lastwechseln nach Anforderungsprofil 1 zu entsprechen wäre das Vorhalten entsprechenden Personals zur Bereitschaft nötig. In den meisten Werken wäre dies nur durch zusätzliches Personal und eine Erweiterung des aktuellen Schichtmodells für den Zementproduktionsbetrieb möglich. Höhere Personalkosten bei gleichzeitig steigenden Leerlaufzeiten des Personals wären als Konsequenz zu erwarten. Auch die Vorankündigungszeiten nach Anforderungsprofil 2 von einem Tag wären in der Regel nicht ausreichend um eine wöchentliche Personalplanung ohne zusätzlichen Aufwand und zusätzliches Personal in Bereitschaft umzustellen. Dies wurde unter anderem an einem konkreten Beispiel mit stark erhöhtem Stromangebot und negativen Börsenstrompreisen am 1. Mai 2017 deutlich. Eine Bereitschaft müsste auch an einem Feiertag und während üblicher Urlaubszeiten mit begrenzter Zeit der Vorankündigung verfügbar gehalten werden.

4.6.6 MARKTANFORDERUNGEN UND SAISONALITÄT DER PRODUKTION

Der Zementabsatz und damit indirekt auch die Produktion innerhalb der Zementwerke ist direkt von der Baunachfrage und -konjunktur abhängig. Insbesondere unterliegen diese einer starken Saisonalität. Es zeigt sich, dass ein höherer Zementabsatz in den Monaten April bis Oktober zu erwarten ist. Witterungsbedingt können einzelne Monate oder Wochen in, vor und nach dieser Zeit aber erhebliche Nachfragespitzen oder -kurzfristige Rückgänge aufzeigen. In Zeiten starker Nachfrage kann die Abnahme des gelagerten Zementes die verfügbare Produktionskapazität überschreiten. Insbesondere im Rahmen von Großprojekten wird in sehr kurzer Zeit sehr viel Material einer oder mehrerer bestimmter Sorten abgenommen. Die exakte Prognose des Abnahmezeitpunktes ist schwie-

rig. Vor diesem Hintergrund werden Lagerkapazitäten für eine flexible Lieferfähigkeit ausgelegt und möglichst volle Lagerstände angestrebt. In Zeiten starker Nachfrage kann entsprechend die Produktion nur in einem geringen Maße flexibilisiert werden. Die Lieferverpflichtungen müssen erfüllt werden.

In den Übergangszeiten (Frühjahr/Herbst) laufen die Zementmühlen i.d.R. nur im Ein- oder Zweischichtbetrieb (i. d. R. Spät-/Nachtschicht). Ein Potenzial für positive Regelenergie ist entsprechend (nur) in diesen Betriebszeiten verfügbar. Ein Potential zur Verlagerung der Produktion in die Tagschicht wie in Anforderungsprofil 2 vorgesehen ist nur in dem Umfang vorhanden wie es die Personalplanung ermöglicht (s.o.). Die Möglichkeit und die mögliche Länge eines Stillstands entsprechend Anforderungsprofil 3 sind abhängig von Auftragslage und den Silofüllständen abzuwägen. In den Zeiten besonders niedrigerer Nachfrage wird meist im Zeitraum Dezember bis März eine mehrwöchige Winterrevision im Zementwerk durchgeführt. Hierdurch trägt die Zementindustrie insgesamt bereits heute dazu bei, den elektrischen Energieeinsatz in der Winterzeit zu vermindern, in der das Angebot erneuerbarer Energien eingeschränkt ist. Die regelmäßige Abschaltung großer Verbraucher während der Winterrevision kann als mehrwöchige positive Regelenergie allerdings mit geringer Flexibilität verstanden werden. Die Verschiebung der Revision wurde bereits an verschiedenen Stellen diskutiert. Die Terminierung der Winterreparatur wird u. a. durch die Terminfindung mit vielen externen Unternehmen langfristig vorgenommen, so dass kurzfristig eine Verschiebung kaum möglich erscheint.

In den Wintermonaten besteht (außerhalb der Revisionszeit) ein Potential für längere geplante Stillstände der Zementmühlen entsprechend Anforderungsprofil 3. Da die Zementmühlen in dieser Zeit teilweise mehrere Tage still stehen, könnten diese Stillstände mit entsprechendem Vorlauf für die Personalplanung so geplant werden, dass zu Zeiten eines geringen Stromangebots nicht produziert wird. Bzgl. der Relevanz dieses Potentials für das Stromsystem ist jedoch zu berücksichtigen, dass sich das Potential für Lastreduktion während einer Dunkelflaute auf diejenigen Standorte beschränkt, die zum fraglichen Zeitpunkt überhaupt eine Zementmahlung geplant haben.

4.7 WECHSELWIRKUNGEN ZWISCHEN EFFIZIENZ UND FLEXIBILITÄT

Die Zementproduktion ist als weitgehend kontinuierlicher Prozess ausgelegt. Durch die Speicherkapazitäten in Form von Silos vor und nach den Zerkleinerungsprozessen kann allerdings eine Entkopplung und in gewissem Umfang Flexibilisierung dieser Teilprozesse mit dem größten Einsatz elektrischer Energie erreicht werden.

Zerkleinerungsverfahren haben einen relativ niedrigen energetischen Wirkungsgrad, der nicht mit anderen elektrischen Wirkungsgraden vergleichbar ist. Die kontinuierliche Überprüfung der Effizienz und ggf. möglicherer Optimierungen gehören zu den täglichen Aufgaben der Mitarbeiter der Werke und sind das Ziel von speziellen Projekten, die z. T. durch externe Dienstleister unterstützt werden. Vor dem Hintergrund

weitgehend optimierter Produktionsabläufe ist durch eine flexible Produktionsweise bei der Zementmahlung zunächst von einem begrenzten Verlust der bisher erzielten Effizienz auszugehen.

Flexibler Mühlenbetrieb wäre in der Regel mit häufigeren An- und Abschaltvorgängen in der Zementproduktion verbunden. Während der Übergangs- oder Aufwärmphasen entstehen ggf. nicht-sortengerechte Produkte. Diese können i. d. R. durch Rezyklierung in den Produktionsprozess vollständig wieder genutzt werden. Der zusätzliche Energieaufwand in der Zementmahlung durch die Produktion und Rezirkulierung von nicht-sortengerechten Produkten wird mit etwa 2 % abgeschätzt. Werden allerdings durch die Flexibilisierung der Mühlen thermische Verluste hervorgerufen, kann die Zementqualität stärker beeinträchtigt werden. In diesem Fall wäre von einem höherer zusätzlicher Energiebedarf bei der Rezirkulierung des Materials auszugehen. In jedem Fall muss ein noch nicht fertig produziertes Material zwischengelagert werden, was zu steigendem Lagerbedarf und damit zu hohen Investitionskosten führt.

Die Rohmahlung wird zum einen zur Zerkleinerung aber auch zur Trocknung der Rohmaterialien verwendet. Hier ist die Effizienz der Anlage besonders von den effizienten Nutzung der thermischen Energie der Gasströme abhängig. Darüber hinaus werden für einen effizienten Emissionsschutz gewisse Synergien zwischen Rohmahlung und Brennprozess genutzt (z. B. Abgasreinigung durch die hohe Oberfläche des Rohmehls im Verbundbetrieb). Unter anderem hieraus resultiert die in Kapitel 4.2.1 dargestellte hohe mittlere Verbundbetriebszeit. Eine Flexibilisierung der Rohmahlung kann zu höheren thermischen Energiebedarfen führen und damit zu Wechselwirkungen zwischen elektrischer und thermischer Energieeffizienz führen. Der Einsatz thermischer Energie im Klinkerbrennprozess und die Nutzung restlicher thermischer Energie zur Rohmaterialtrocknung übersteigen den Einsatz elektrischer Energie deutlich. Höhere thermische Energieverluste zugunsten von Flexibilität im Einsatz elektrischer Energie erscheinen deshalb im Sinne der Energieeffizienz insgesamt kaum akzeptabel.

4.7.1 ERFAHRUNGEN AUS EINEM BETRIEBSVERSUCH IM ZEMENTWERK

In einem Werk wurde ein Langzeit-Betriebsversuch zur Flexibilisierung der Rohmahlung durchgeführt. In diesem Einzelfall waren keine zusätzlichen Investitionen in Neuanlagen nötig und die Gegebenheiten im Werk waren bestmöglich. Dennoch wurde aufgrund fehlender ökonomischer Anreize seitens der Stromanbieter und Netzbetreiber dieses Versuchsvorhaben beendet [7]. Es handelt sich um ein integriertes Zementwerk mit hoher Kapazität von Rohmühle und Silos. Überwiegend liegt am Standort ein trockenes Rohmaterial mit etwa 5 % Feuchte vor. Es ergeben sich dadurch im Mittel etwas geringere Anforderungen an den Verbundbetrieb zwischen Mahltrocknung und kontinuierlicher Klinkerproduktion. Die Feuchte des Rohmaterials unterlag allerdings starken Schwankungen bei Maximalfeuchtegehalten von 12 %. Das Rohmaterial konnte in einen separaten Trommeltrockner, der bereits im Werk vorhanden war, durch zusätzlichen thermischen Energieeinsatz auf eine

niedrige Restfeuchte vorgetrocknet werden. Aufgrund der Überkapazität der Rohmühle war es dann möglich angeforderten Lasterhöhungen zu entsprechen. Neben den fehlenden ökonomischen Anreizen zeigten sich besonders große praktische Einschränkungen und Aufwendungen in der Personal- und Wartungsplanung. Etwa eine Fachkraft war zusätzlich nötig um den Tagschichtbetrieb und die Bereitschaft zum flexiblen Betrieb zu ermöglichen.

4.8 FLEXIBILITÄTSPERSPEKTIVEN DER ROH- UND ZEMENTMAHLUNG

Die praktische Nutzung von Flexibilitätspotentialen in den Mahlprozessen bei der Zementherstellung erfordert eine Schaffung geeigneter Voraussetzungen und die Beseitigung von bestehenden Hemmnissen (siehe Kapitel 4.4 bis 4.7). Aus heutiger Perspektive sind dabei die stark eingeschränkten wirtschaftlichen Voraussetzungen und ungeeignete Vertragsbedingungen für den flexiblen Stromeinsatz in Industriebetrieben in Deutschland zu nennen. Insbesondere der direkte personelle und arbeitsorganisatorische Mehraufwand müsste durch die Vergütung für die zusätzliche Flexibilität kompensiert werden. Gleichartige Schlussfolgerungen zum wirtschaftlich nutzbaren Potential wurden auch für die Zementindustrie in Österreich [19] und in Untersuchungen eines Industriebetriebes [20] gemacht. Neben der Kompensation von direktem Mehraufwand und betriebliche Risiken ist als Voraussetzung auch die tatsächliche Verfügbarkeit von Personal, deren Weiterqualifikation und Ausbildung zu berücksichtigen.

Technisch könnte die Erweiterung der Silo- und Mühlenkapazität unter Umständen zur Steigerung der Flexibilität bei der Mahlung in einem Werk beitragen. Allerdings sind derartige Investitionen mit sehr hohen Kosten verbunden. Sie erscheinen aus heutiger Sicht nicht wirtschaftlich. Andauernde Entwicklungen auf dem deutschen Zementmarkt zeigen einen zunehmenden Trend zu Zementen hoher Festigkeitsklassen. Die Steigerung der Festigkeitsklasse des Zementes resultiert maßgeblich aus der Steigerung der Zementfeinheit. Hoch-feine Zementsorten werden voraussichtlich auch in Zukunft steigende Absatzzahlen verzeichnen. Besonders die Mahlung hoch-feiner Produkte ist sehr energie- und zeitintensiv. Obwohl die Feinstfraktion nur einen kleinen Massenanteil des Zements ausmacht, weist ihre Herstellung einen überproportional hohen elektrischen Energiebedarf auf. Der Energieaufwand steigt exponentiell mit der Feinheit. Demnach könnte die Auskopplung der Feinstmahlung als energieintensivster Anteil innerhalb der Zementmahlung die Effizienz von Investitionen zur Flexibilisierung steigern.

Eine Entkopplung der Feinstmahlung bietet somit perspektivisch ein großes Potential zur sinnvollen Nutzung von zeitlich begrenzten Überkapazitäten in der Stromproduktion. Der Großteil der Produkte kann dabei weiter auf herkömmlichen Mahlanlagen zerkleinert werden. Hierbei entstehen relativ grobe Zwischenprodukte, von denen Teilmassenströme entnommen und nachgemahlen werden können. Diese Nachmahlung würde auf geeigneten Mahlanlagen geringer Baugröße durchgeführt. Die Zwischenprodukte würde anschließend mit den nachgemahlten Anteilen zu den fertigen Produkten gemischt werden. Die parallel geschalteten

Feinstmahlaggregate können dabei einzeln auf Anforderungen seitens des Strommarktes reagieren. Die hohe Diskretisierung der Potentiale zur Flexibilisierung seitens der großen Mahlanlagen wird reduziert und Produkte mit einem neuen Freiheitsgrad würden geschaffen.

Zu den technischen Potentialen dieser Technologie wird im weiteren Verlauf des Projektes eine Studie durchgeführt und in die bestehende Modellstruktur implementiert. Weitere Untersuchungen am praktischen Beispiel und eine Demonstration der Technologie in einer Pilotanlage sind nötig, um die tatsächlichen Flexibilitätsgewinne und die Auswirkungen auf den Prozess und die Produkte praxisrelevant bewerten zu können.

4.9 LITERATURVERZEICHNIS

- [1] Verein Deutscher Zementwerke, Hrsg. Umweltdaten der deutschen Zementindustrie 2015: Environmental data of the German cement industry 2015. Düsseldorf, 2016
- [2] Verein Deutscher Zementwerke, Hrsg. Zahlen und Daten: Zementindustrie in Deutschland 2015; Stand April 2015. Düsseldorf, 2015
- [3] Hoenig, V.; Koring, K.; Fleiger, P.; Müller, Ch.; Palm, S.; Reiners, J.: Energy efficiency in cement production. Cement International. 2013, 11(3/4), pp.50-67/pp.46–65
- [4] European Cement Research Academy; Cement Sustainability Initiative, Ed. Development of State of the Art-Techniques in Cement Manufacturing: Trying to Look Ahead; CSI/ECRA-Technology Papers 2017. Duesseldorf, Geneva, 2017 Available at: <http://www.wbcscement.org/technology>
- [5] Wagener, Carina; Ruppert, Johannes; Hoenig, Volker. Prozesskettenorientierte Ermittlung der Material- und Energieeffizienzpotentiale in der Zementindustrie; Umweltforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit Forschungskennzahl [3716 36 320 0]. Düsseldorf, 2017
- [6] European Cement Research Academy GmbH (2015): ECRA Future Grinding Technologies Project – Report about Phase I. Düsseldorf
- [7] VDZ Expertengespräche zu Flexibilitätspotentialen und -perspektiven in der Zementindustrie (2017-08), Projektdokumente SynErgie
- [8] Verein Deutscher Zementwerke, Hrsg. Zahlen und Daten: Zementindustrie in Deutschland 2017; Stand August 2017. Düsseldorf, 2017
- [9] Fleiger, Philipp M.; Schneider, Martin; Treiber, Kevin. Future grinding technologies – ECRA’s new research project. In: Chalmers University of Technology, Ed. 14th European Symposium on Commitment and Classification (Göteborg 07.10.09.2015). Göteborg, 2015

- [10] WBCSD GNR, Cement plant power consumption - Weighted average Grey and white cement, https://www.wbcscement.org/GNR-2014/world/GNR-Indicator_33AGW-world.html (02.05.2017)
- [11] VDZ Modell Flexible Zementmahlung (2017–09), Version 2, Projektdokumente SynErgie
- [12] Lidbetter, Raine T.; Liebenberg, Leon. Load-shifting opportunities for typical cement plants. *Journal of Energy in Southern Africa*. 2013, 24(1), S.35–45
- [13] Müller-Pfeiffer, M.; Fleiger, P.; Treiber, K., State of the art in cement grinding: First results form VDZ working-group „Comminution“, Präsentation ECRA-Seminar Comminution, Luxemburg 2017
- [14] Verein Deutscher Zementwerke, Zementversand Inland (Monatsdaten). <https://www.vdz-online.de/zementindustrie/branchen-ueberblick/zementversand-monatsdaten/> (19.06.2017)
- [15] Duda, Walter H. Internationale Verfahrenstechniken der Zementindustrie: Rechenverfahren, Formeln, Diagramme, Tabellen. 2. Aufl. Wiesbaden, 1977 (Cement-data-book 1) S. 130
- [16] Verfahrenstechnisches Merkblatt, VDZ Arbeitskreis Zerkleinerung, bislang unveröffentlicht
- [17] Innovative business models for market uptake of renewable electricity unlocking the potential for flexibility in the industrial electricity use (2016): Simplified assessment methodology for optimal valorization of Flexible Industrial Electricity Demand. Project report, Available at: www.industrie.eu/downloads/category/project-results
- [18] SynErgie Glossar 2017
- [19] Kollmann, Andrea; Schmidthaler, Michael; Elbe, Christian; Schmutzner, Ernst; Kraussler, Alois; Steinmüller, Horst; Frank, Fabian; Rebhandl, Lukas. LoadShift: Lastverschiebung in Haushalt, Industrie, Gewerbe und kommunaler Infrastruktur Potenzialanalyse für Smart Grids: Lastverschiebung in der Industrie Österreichische Begleitforschung zu Smart Grids. Wien, 2014 (e7/2015)
- [20] Brockmann, Bärbel. Flexibilität ist Trumpf. ThyssenKrupp techforum. 2017, (1), S.24–27



KAPITEL 5

FLEXIBILITÄTSPOTENZIALE UND – PERSPEKTIVEN DER CHLOR-ALKALI ELEKTROLYSE

Florian Ausfelder, Hanna Ewa Dura,
DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V.,
Frankfurt am Main

Karin Arnold, Georg Holtz,
Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH, Wuppertal

Ralph-Uwe Dietrich, Stefan Estelmann,
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Stuttgart

5.1 CHLOR-ALKALI ELEKTROLYSE – VERFAHREN

Die Chlor-Alkali Elektrolyse (CAE) ist ein zentrales Verfahren der chemischen Grundstoffindustrie. Sie wandelt eine wässrige Kochsalzlösung mit elektrischem Strom zu Chlor, Wasserstoff und Natronlauge (die sogenannte Electrochemical Unit, ECU, im Folgenden bezogen auf die Produktion von 1 t Cl₂ mit den stöchiometrischen Nebenprodukten) um. Chlor und Wasserstoff fallen als Gase an, während das Natriumhydroxid als Natronlauge in wässriger Lösung mit einer Konzentration abhängig vom verwendeten Verfahren produziert wird. Die Verteilung der Produkte ist stöchiometrisch durch die Reaktionsgleichung 1 festgelegt:



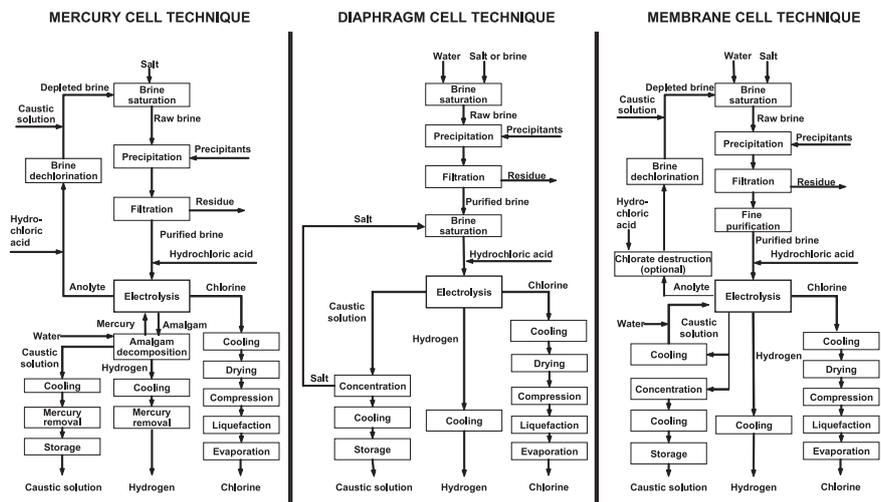
Für die Produktion von 1.000 kg Chlor fallen entsprechend 28,43 kg Wasserstoff und 1.128 kg Natronlauge (Trockengewicht) an.

Alle Verfahren setzen eine gesättigte wässrige Natriumchlorid-Lösung (Sole) mit ca. 26 Gew.-% NaCl ein. Die unterschiedlichen Verfahren führen zu unterschiedlichen Anforderungen an die Vorbereitung der Einsatzstoffe und die Aufarbeitung der Produkte. Die sich daraus ergebenden Verfahrensketten sind schematisch in Abbildung 5.1 dargestellt.

In der industriellen Nutzung der Chlor-Alkali Elektrolyse haben sich drei Hauptverfahren (Membran-, Diaphragma- und Amalgam-Verfahren) durchgesetzt. Für das Membran- und das Diaphragma-Verfahren sind zwei verschiedene Verschaltungen üblich. Im Fall einer bipolaren Verschaltung der Zellen, sind die Zellen in Reihe geschaltet, d.h. die Kathode einer Zelle ist direkt mit Anode der nächsten Zelle verbunden. Dies führt zu einer relativ geringen Stromstärke und einer relativ hohen Spannung. Im Gegensatz dazu werden im Fall der heute eher unüblichen monopolen Parallelschaltung die Zellen parallel zueinander verschaltet. Dies führt zu einer relativ hohen elektrischen Stromstärke und einer relativ geringen angelegten Spannung.

Der Branchensteckbrief für die Chlor-Alkali Elektrolyse ist in Abbildung 5.2 dargestellt. Die einzelnen Verfahren werden im Folgenden kurz beschrieben.

Abbildung 5.1: Schematische Darstellung der verschiedenen Verfahrensketten der Chlor-Alkali Elektrolyse [1]



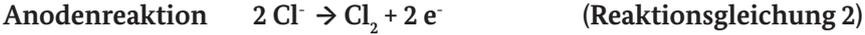
Source: Adapted from [1, Ullmann's 2006] [10, Kirk-Othmer 2002]

Allgemein	Branchendaten	Energieverbrauch der chemischen Industrie	Prozessbeschreibung												
	<ul style="list-style-type: none"> Größter Stromverbraucher der chem. Industrie 1308 GW (ohne Nebenaggregate), ≈11 TWh/a Strombedarf (ca. 2% des dt. Stromverbrauchs) Jährliche Produktionsmenge: 4 Mio. t Cl₂ 21 Anlagen an 17 Standorten Kontinuierlicher Prozess, Auslastung ≥95% Anorganische Grundchemikalie mit standort-spezifischer Einbindung in Folgeprozesse 		<p>Allgemeine Reaktionsgleichung:</p> $2 \text{ NaCl} + 2 \text{ H}_2\text{O} \rightarrow \text{Cl}_2 + \text{H}_2 + 2 \text{ NaOH}$ <p>Verfahren (% der installierten Kapazität):</p> <ol style="list-style-type: none"> Membran-Verfahren (70%) Diaphragma-Verfahren (23%) Amalgam-Verfahren (8%) 												
Auslastung und Effizienz			<p>Das Wichtigste in Kürze</p> <ul style="list-style-type: none"> Die CAE ist ein kontinuierlicher Prozess, verknüpft mit Folgeprozessen im Verbundstandort → Flexibilitätsoptionen standortspezifisch Über- oder Unterproduktion muss sehr zeitnah kompensiert werden Begrenzung der Flexibilitätsoptionen durch Bedingungen des §19.2 StromNEV PVC Produktion verläuft über EDC als speicherbares Zwischenprodukt → eröffnet Flexibilitätsperspektiven 												
	Schematische Darstellung der VCM-Produktion auf Basis des Vinnolit-Prozesses		Flexibilitätspotentiale und -perspektiven		Teillastpotenzial										
Flexibilitätspotentiale und -perspektiven			<ul style="list-style-type: none"> Teillastbetrieb Nutzung von Ethylendichlorid (EDC) als speicherbares Zwischenprodukt für Polyvinylchlorid (PVC) Standorte Schaltbare Sauerstoffverzehrkathoden (SVK) erlauben kontinuierliche Chlorproduktion unter Variation der Wasserstoffproduktion → bis zu 20% Lastreduktion, abhängig vom Wasserstoffbedarf des Standortes 		<table border="1"> <tr> <td>Typische Anlagengröße in MW</td> <td colspan="2">30 – 150</td> </tr> <tr> <td>Technisches Potenzial</td> <td>Negativ</td> <td>Positiv</td> </tr> <tr> <td>Potenzial in MW oder %</td> <td>-10-50% bedingt Nachholung der Produktion</td> <td>≤+5%, abhängig von Auslastung</td> </tr> </table>		Typische Anlagengröße in MW	30 – 150		Technisches Potenzial	Negativ	Positiv	Potenzial in MW oder %	-10-50% bedingt Nachholung der Produktion	≤+5%, abhängig von Auslastung
	Typische Anlagengröße in MW	30 – 150													
Technisches Potenzial	Negativ	Positiv													
Potenzial in MW oder %	-10-50% bedingt Nachholung der Produktion	≤+5%, abhängig von Auslastung													

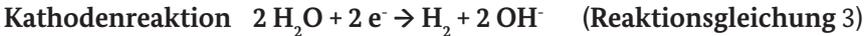
5.1.1 MEMBRAN-VERFAHREN

Abbildung 5.2: Branchensteckbrief Chemische Industrie Chlor-Alkali Elektrolyse

Im Membran-Verfahren werden Kathode und Anode durch eine ionendurchlässige komplexe Membran auf Basis von Per-fluorierten Polymeren getrennt, die es den Natrium-Ionen und Wassermolekülen ermöglichen, von der Kathodenseite zur Anodenseite zu wandern. Im Anodenbereich wird das Chlorid zum Chlor gemäß Reaktionsgleichung 2 oxidiert,



während im Kathodenbereich Wasser zu Wasserstoff und OH⁻ Ionen gemäß Reaktionsgleichung 3 reduziert wird.



Die Vorteile des Membran-Verfahrens sind, dass bis zu 30 % weniger elektrische Energie für die Herstellung von Chlor benötigt wird und keine giftigen oder kanzerogenen Hilfsstoffe im Verfahren zum Einsatz kommen. Als Nachteile des Verfahrens sind anzuführen, dass eine relativ hohe Reinheit der eingesetzten Sole benötigt wird und die entstehende Natronlauge mit einer Konzentration von ca. 32 Gew-% anfällt. Sie muss daher unter zusätzlichem Energieeinsatz (Dampf) aufkonzentriert werden, um die handelsübliche Konzentration von 50 Gew.-% zu erreichen.

Das Membran-Verfahren wird je nach Anlagengröße mit bis zu 200 einzelnen Elektrolysezellen zu einem Modul verschaltet. Die aktive Fläche beträgt pro Zelle bis zu 5 m² und wird mit einer elektrischen Stromdichte zwischen 3,0 bis 7 kA/m² beaufschlagt, im Mittelwert ca. 4–5 kA/m² [2,3,4]. Man versucht eher den Elektrolyseur mit einer möglichst hohen Stromdichte zu betreiben, da dann die erzeugte Lauge eine höhere Produktqualität aufweist (geringerer NaCl-Gehalt). Dies limitiert auch einen

hier angedachten Lastwechsel. Das Membran-Verfahren ist prinzipiell sehr robust gegenüber Lastabwürfen. Diese können laut [5] innerhalb von Sekunden erfolgen. An- und Abfahrprozesse im Teillastbereich sind nach eigenen Erhebungen technisch innerhalb von ca. 15 Minuten möglich, wohingegen ein Hochfahren nach vorherigem vollständigem Lastabwurf einen trägeren Verlauf aufweist [5]. Limitierend für die Leistungserhöhung ist die Leistungsfähigkeit der Nebenaggregate. Dazu zählt unter anderem das Wärmemanagement, welches die Zelltemperatur im Temperaturbereich zwischen 80–90 °C einregelt.

5.1.2 DIAPHRAGMA-VERFAHREN

Beim Diaphragma-Verfahren werden Anode und Kathode durch ein Diaphragma getrennt. Die Reaktionen verlaufen gemäß der Reaktionsgleichungen 2 und 3. Die Salzsole tritt in den Anodenraum ein und sickert aufgrund des dort eingestellten höheren hydrostatischen Drucks durch das Diaphragma in den Kathodenraum. Diese Druckdifferenz vermindert die unerwünschte Rückvermischung von OH^- Ionen aus dem Kathoden- in den Anodenraum und erhöht somit die Produktausbeute für Natronlauge. Die resultierende Lösung muss aufgearbeitet werden, wobei einerseits die Natronlauge, die in Konzentrationen von rund 10 % anfällt, aufkonzentriert werden muss, andererseits das verbleibende Salz größtenteils ausgefällt wird. Letzteres wird wieder gelöst als Salzsole in das Verfahren eingebracht. Das Diaphragma-Verfahren zeichnet sich durch einen niedrigen spezifischen Strombedarf und einen guten Umsatz pro Durchsatz aus¹. Die Konzentration der resultierenden Natronlauge ist deutlich geringer als im Membran- oder Amalgam-Verfahren. Die Zellen heizen sich bis auf 80–90°C auf und müssen aktiv gekühlt werden. In der Vergangenheit wurden Diaphragmen auf Asbestbasis eingesetzt. Neue Anlagen verfügen über asbestfreie Diaphragmen. Die Firma DOW, die die letzten Anlagen in Deutschland mit asbesthaltigen Diaphragmen betreibt, wird die Anlagen bis Ende des Jahres 2024 endgültig auf asbestfreie Diaphragmen umgerüstet haben.

¹ Unter Berücksichtigung des Energiebedarfs für Aufkonzentration der Natronlauge auf handelsübliche Konzentration ist der Energiebedarf höher als für das Membran-Verfahren. Die Diaphragma-Verfahren werden in Deutschland in Kombination mit dem Epichlorhydrin-Verfahren eingesetzt, was ohne weitere Aufkonzentration der Natronlauge auskommt.

5.1.3 AMALGAM-VERFAHREN

Das Amalgam-Verfahren basiert auf einer flüssigen Quecksilber-Kathode, welche ein hohes Spannungspotential gegenüber der Wasserstoffbildung hat und daher mit Natrium ein Amalgam bildet, vgl. Reaktionsgleichung 4.



Das Amalgam wird mit dem flüssigen Quecksilber aus der Zelle ausgezogen und in einem Zersetzer mit Wasser an einem Graphitkatalysator zersetzt, wobei das reine Quecksilber zurückgewonnen wird und Natronlauge und Wasserstoff gemäß Reaktionsgleichung 5 gebildet werden.



Beim Amalgam-Verfahren wird die eingesetzte Sole in einem Durchlauf auf ungefähr 23 bis 24 Gew.-% abgereichert. Das Amalgam-Verfahren ist sehr empfindlich gegenüber Schwermetallen, die ebenfalls mit Quecksilber Verbindungen eingehen und die Überspannung für die in der Elektrolysezelle unerwünschte Wasserstoffbildung reduzieren. Diese notwendige hohe kathodische Überspannung ist auch der Grund für die relativ hohe Spannung und den daraus resultierenden relativ hohen spezifischen elektrischen Energiebedarfs des Verfahrens gegenüber dem Diaphragma- oder Membran-Verfahren.

Die Vorteile des Verfahrens liegen einerseits in der hohen Reinheit des produzierten Chlors und der Produktion von konzentrierter Natronlauge, die bereits den Marktspezifikationen entspricht. Dafür lässt sich ein gewisser Austrag von Quecksilber aus der Anlage in die Umwelt nicht vollständig vermeiden. Die Chlor-Alkali Betreiber in Europa haben sich gegenüber der Europäischen Union verpflichtet, die Anlagen auf Basis des Amalgam-Verfahren freiwillig bis Ende 2017 auf andere BAT (Best Available Technology) Verfahren umzurüsten oder abzuschalten. Im Dezember 2013 hat die Europäische Kommission auf Basis der EU Richtlinie 2010/75/EU festgelegt [6], dass die Quecksilbertechnologie nicht mehr der besten verfügbaren Technologie (BAT) entspricht. Dieser Beschluss ist von den Mitgliedsstaaten innerhalb von 4 Jahren nach Veröffentlichung umzusetzen (bis spätestens 11.12.2017). In Deutschland gibt es noch zwei Betreiber von Anlagen zur Herstellung von Alkoholaten nach dem Amalgam-Verfahren. Da es derzeit kein Alternativverfahren für die gemeinsame Herstellung aller Alkoholate (Natriummethylat, Natriumethylat und Kaliummethylat) gibt, ist der Betrieb dieser Anlagen für weitere 10 Jahre bis Ende 2027 erlaubt. (s. Verordnung (EU) 2017/852 über Quecksilber zur Umsetzung der Minamata Convention [6],[7]).

5.2 CHLOR-ALKALI BETREIBER IN DEUTSCHLAND

Die Chlor-Alkali Elektrolyse produziert wesentliche anorganische Grundstoffe, die im Rahmen der Folgeprozesse eine der Säulen der chemischen Industrie darstellen. Da Chlor in der Regel vor Ort produziert und nur in Ausnahmefällen transportiert wird, sind viele der Chemie-Standorte in Deutschland mit Chlor-Alkali Elektrolysen ausgestattet. Die chemische Industrie hat in den letzten 20 Jahren tiefgreifende Veränderungen durchgemacht. Während ursprünglich die Standorte in der Hand einzelner Unternehmen lagen, ist heute die gesamte Bandbreite zu finden: Standorte, bei denen Standortbetrieb und Anlagenbetrieb in den Händen von verschiedenen Unternehmen liegen, bis hin zu Standorten, die auch heute noch dem ursprünglichen Modell folgen oder zumindest stark von einem Unternehmen dominiert werden. Für die Zusammenarbeit der unterschiedlichen Anlagenbetreiber an einem Standort ergeben sich, entsprechend der standortspezifischen Situation, verschiedenste Herausforderungen und ein hoher Abstimmungsbedarf entlang der Wertschöpfungskette. Daher ist die Betrachtung des einzelnen Prozesses, in diesem Fall der Chlor-Alkali Elektrolyse, auch nicht ausreichend, sondern es muss die standortspezifische Einbindung der Wertschöpfungskette berücksichtigt werden.

Tabelle 5.1: Übersicht der Chlor Elektrolysen in Deutschland. Orange eingefärbt sind die Standorte, die Chlor für die PVC Produktion produzieren [8]

Aktuell werden an folgenden Standorten in Deutschland Chlor-Alkali Elektrolysen betrieben, Tabelle 5.1:

Betreiber	Standort	Verfahren	Nennkapazität ²
			kt/a
AkzoNobel	Bitterfeld	Membran	99
AkzoNobel	Frankfurt	Membran	250
AkzoNobel/Evonik	Ibbenbüren	Membran	125
BASF	Ludwigshafen	Membran	215
BASF	Ludwigshafen	Amalgam	170
CABB	Gersthofen	Membran	52
Covestro	Dormagen	Membran	400
Covestro	Dormagen	Salzsäure-Diaphragma	80
Covestro	Leverkusen	Membran	390
Covestro	Uerdingen	Membran	240
Covestro	Uerdingen	Membran (SVK)	20
Covestro	Brunsbüttel	Salzsäure-Diaphragma	190
Covestro	Brunsbüttel	Salzsäure (SVK)	20
DOW	Schkopau	Membran	250
DOW	Stade	Membran	555
DOW	Stade	Diaphragma	1030
Evonik	Lülsdorf	Amalgam	137
Inovyn	Rheinberg	Membran	110
Inovyn	Rheinberg	Diaphragma	110
Leuna-Tenside	Leuna	Membran	15
Vestolit	Marl	Membran	260
Vinnolit	Knapsack	Membran	250
Vinnolit	Gendorf	Membran	180
Wacker	Burghausen	Membran	50

² Kapazität gemäß den Angaben von Eurochlor [8]. Die Nennkapazität kann von der realen Kapazität am Standort abweichen.

Der spezifische elektrische Energiebedarf der einzelnen Anlagen hängt von der individuellen Konfiguration am Standort ab. Dennoch ergeben sich, abhängig vom Verfahren, insgesamt sehr ähnliche Werte, wie in Abbildung 5.3 dargestellt. Rote Rauten stellen Diaphragma-Anlagen, gelbe Rauten Amalgam-Anlagen und blaue Rauten Membran-Anlagen dar. Grüne Rauten stellen Membran-Anlagen dar, zu denen aktuell keine Aussagen vorliegen und denen ein Wert von 2,5 MWh/ECU (tCl₂) zugeordnet wurde. Der letzte Eintrag stellt den elektrischen Energiebedarf für eine Sauerstoffverzehrkathode dar, die im normalen Modus als Membran-Elektrolyse (blauer Punkt) oder im Sauerstoffverzehrmodus (grauer Punkt), ohne Wasserstoffherzeugung betrieben wird³.

³ Vgl. Kap. 5.4.2.

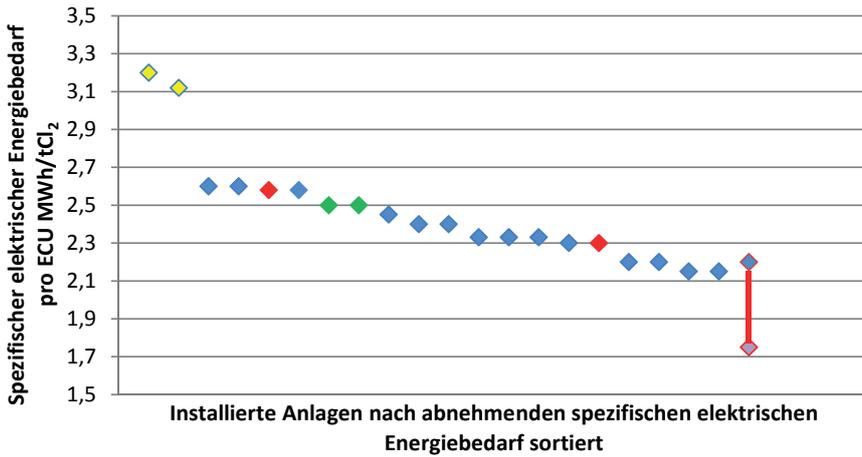


Abbildung 5.3: Benchmarking des elektrischen Energiebedarfs der Chlor-Alkali Elektrolyse⁴ ohne Nebenaggregate und Hilfsenergie in Deutschland

⁴ Der zusätzliche Bedarf an Hilfsenergie, insbesondere für die Aufkonzentration der Natronlauge beträgt 0,86 MWh/tCl₂ pro ECU für das Diaphragma-Verfahren und 0,32 MWh/tCl₂ pro ECU für das Membran-Verfahren.

5.2.1 WERTSCHÖPFUNGSKETTEN FÜR DIE PRODUKTE DER CHLOR-ALKALI ELEKTROLYSE

Die Wertschöpfungsketten, die auf den Produkten der Chlor-Alkali Elektrolyse beruhen sind extrem vielfältig. Chlor ist ein zentrales Produkt, welches in der chemischen und pharmazeutischen Industrie für viele chemische Umwandlungen benötigt wird. Es wird geschätzt, dass ca. 55 % der chemischen und 85 % der pharmazeutischen Endprodukte im Verlauf ihrer Herstellung über Zwischenstufen verlaufen, die auf die Produkte der Chlor-Alkali Elektrolyse zurückzuführen sind [9]. Die Produktion vieler Endprodukte verläuft über chlorhaltigen Zwischenstufen, auch wenn im Endprodukt kein Chlor mehr enthalten ist, wie in Abbildung 5.4 schematisch dargestellt.

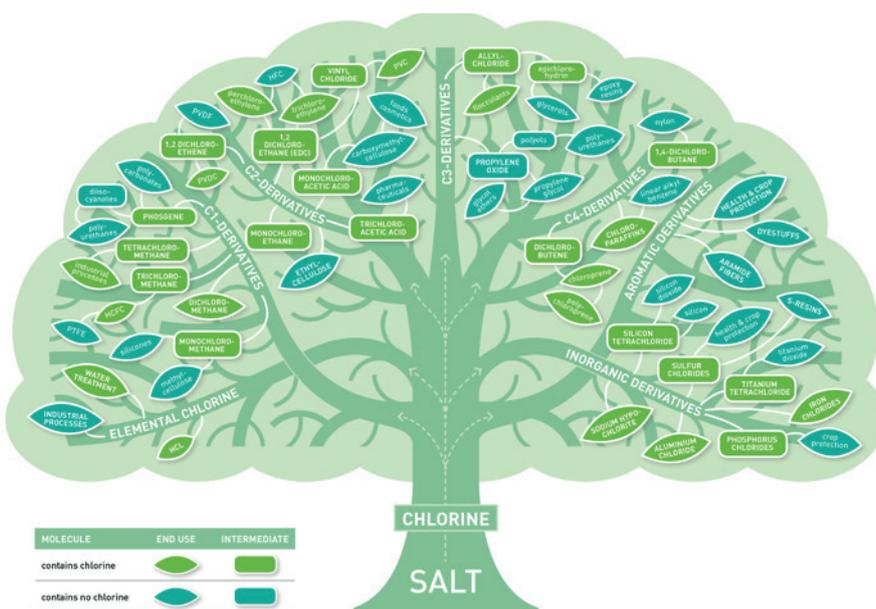


Abbildung 5.4: Übersicht über die Verknüpfungen und Produkte, bei denen Chlor in der Umsetzung beteiligt ist [10]

5.3 ROLLE UND EINBINDUNG DER CHLOR-ALKALI ELEKTROLYSE IN CHEMIESTANDORTEN

5.3.1 VERKNÜPFUNG ZU FOLGEPROZESSEN UND CHLORSPEICHER

Die meisten Standorte der chemischen Industrie sind hochvernetzte Verbundstandorte, in denen die Eingangsstoffe, Zwischenprodukte und die Prozesse untereinander so verknüpft sind, dass möglichst geringe Inventare, insbesondere an potenziell gefährlichen Stoffen bestehen. Dies ist die Implementierung der „just-in-time production“ in der chemischen Industrie.

Kritisch ist vor allen Dingen die Versorgung mit Chlor. Die Produktion von Chlor wird normalerweise in Abhängigkeit des Bedarfs der Folgeprozesse gesteuert. Ist die Reinheit des elektrolytisch produzierten Chlors nicht ausreichend für die Folgeprozesse, wird es abgekühlt, getrocknet, kondensiert und in einem Chlorspeicher zwischengelagert. Bei ausreichender Reinheit wird es direkt in die Folgeprozesse überführt. In diesem Fall ist ein Chlorspeicher nicht zwingend notwendig. Dementsprechend verfügen auch nicht alle Standorte über einen Chlorspeicher.

Aus dem Chlorspeicher wird Chlor verdampft und den Folgeprozessen über Pipelines zur Verfügung gestellt. Im Idealfall erfolgt eine konstante Chlorproduktion, die dem Speicher zugeführt wird und von dort direkt in die Folgeprozesse gespeist wird. Der Stand des Chlorspeichers wäre dann über den Zeitverlauf konstant, da immer so viel Chlor für die Folgeprozesse entnommen wird, wie durch die Chlor-Alkali Elektrolyse zugeführt wird.

Der Chlorspeicher erfüllt neben der Reinigung des Chlors primär die Funktion, im Falle einer Funktionsstörung der Chlor-Alkali Elektrolyse die Folgeprozesse kontrolliert herunterfahren zu können. Da Chlor ein extrem giftiges Gas ist, ist der Speicher aus sicherheitstechnischen Erwägungen so ausgelegt, dass das Chlor-Inventar möglichst klein ist. Seine Größe variiert von Standort zu Standort, von wenigen Stunden bis zu ungefähr ein bis zwei Tagesproduktionen Chlor.

Eine Vergrößerung des Speichers, mit dem Ziel, diesen verstärkt für eine Flexibilisierung der Chlor-Alkali Elektrolyse zu nutzen, ist weder im Interesse der Unternehmen, die versuchen ihre Inventare gefährlicher Stoffe zu minimieren, noch im Interesse der Regulierungsbehörden, die ebenfalls versuchen Risiken und Auswirkungen zu minimieren. Diese Speicher können dennoch prinzipiell für eine Flexibilisierung der Chlor-Alkali Elektrolyse genutzt werden.

Eine weitere Möglichkeit einer Speicherung tritt erst dann in der Wertschöpfungskette auf, wenn ein speicherbares Zwischenprodukt hergestellt wird. Unter der Perspektive der Flexibilität ist dann die Chlor-Alkali Elektrolyse gemeinsam mit der Prozesskette bis zur Produktion des speicherbaren Zwischenproduktes die Bilanzgrenze. Daher ist die Möglichkeit zum Anbieten von Flexibilität stark abhängig von der spezifischen Verbundstruktur eines jeden Standortes und kann nicht auf die Chlor-Alkali Elektrolyse alleine beschränkt werden.

5.3.2 FOLGEPROZESS DES MEMBRAN-VERFAHRENS: PVC-PRODUKTION

Ein für die Potenziale der Flexibilisierung bedeutender Fall der Chlor-Folgeprozesse ist die Polyvinylchlorid (PVC)-Produktion.

Chlor wird mit Ethylen, welches aus einem Ethan/Naphtha-Cracker über eine Pipeline zur Verfügung gestellt wird, katalytisch zu Ethylendichlorid (EDC) umgewandelt.



Im Gegensatz zu vielen anderen Folgeprozessen der Chlor-Alkali Elektrolyse, wird mit EDC eine gut speicherbare Substanz hergestellt, deren Speicherung ein mögliches Flexibilisierungspotenzial darstellt. In einem nächsten Schritt wird HCl aus EDC in einem Cracker abgespalten und Vinylchlorid Monomer (VCM) produziert. Je nach Standortkonfiguration wird der EDC-Cracker teilweise mit dem Wasserstoff aus der Chlor-Alkali Elektrolyse betrieben.



HCl kann durch Elektrolyse in Chlor und Wasserstoff zerlegt werden:



Chlor wird in den Prozess zurückgeführt, während Wasserstoff gemeinsam mit dem ursprünglichen Elektrolysewasserstoff weiterverarbeitet wird.

Alternativ kann unter Zuführung von Sauerstoff eine Oxychlorierung von Ethylen erfolgen, um erneut Ethylendichlorid zu erzeugen.



Nach Abtrennung des Wassers, kann das EDC wieder zur Umwandlung in Vinylchlorid eingesetzt werden. Vinylchlorid hingegen wird katalytisch zu PVC, dem gewünschten Endprodukt polymerisiert.



Dieses wird nach Aufarbeitung und Reinigung ausgetragen. Da PVC erhebliche Mengen (57 Gew.-%) an Chlor enthält, wird dieses ebenfalls mit dem Endprodukt ausgetragen und die entsprechenden Mengen müssen als NaCl der Elektrolyse wieder zugeführt werden. Die Verfahrenskette bis zur Produktion von VCM ist schematisch anhand des Vinnolit-Prozesses in Abbildung 5.5 dargestellt.

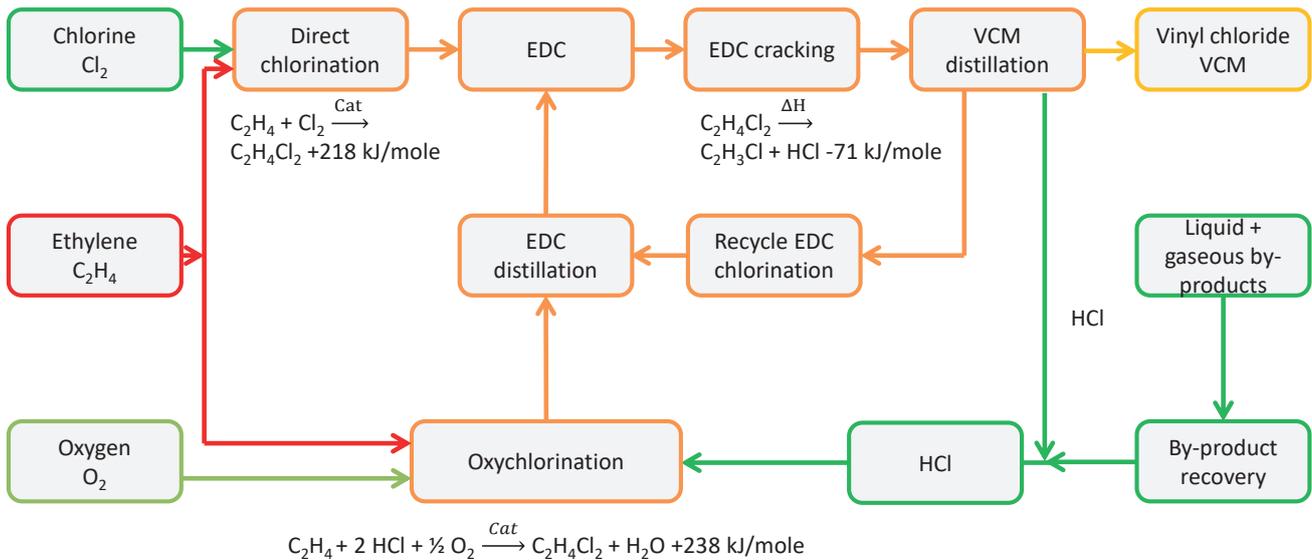


Abbildung 5.5: Schematische Darstellung der VCM-Produktion auf Basis des Vinnolit-Prozesses [11]

5.3.3 FOLGEPROZESS DES DIAPHRAGMA-VERFAHRENS: EPICHLORHYDRIN HERSTELLUNG

Der Diaphragma-Prozess wird in Deutschland von DOW und Inovyn betrieben. In beiden Fällen ist er an die Epichlorhydrin-Herstellung gekoppelt. Dabei wird in einem ersten Schritt Chlor mit Propylen zu Allylchlorid umgewandelt. Das Allylchlorid reagiert mit *in-situ* entstehender hypochloriger Säure zu Dichlorpropanol, welches anschließend mit der Natronlauge zu Epichlorhydrin verseift wird. Durch Abspaltung von HCl entsteht Propylenoxid, ein wichtiger Grundstoff für die Herstellung von Propylenglykol und Polyurethanen. In dieser Verfahrenskette kommt neben dem Chlor auch die Natronlauge, die für diese Anwendung nicht mehr aufkonzentriert werden muss, aus der Chlor-Alkali Elektrolyse zum Einsatz. Als finale Produkte fallen Propylenoxid und eine NaCl-Lösung an, die wieder in die Elektrolyse als Ausgangsstoff zurückgeführt werden kann, so dass die Chlor-Alkali Elektrolyse formal ihre Ausgangsstoffe mit Ausnahme von Wasser und Propylen vollständig recyceln kann.

5.4 ABSEHBARE ENTWICKLUNGEN FÜR DIE CHLOR-ALKALI ELEKTROLYSE

Der Anteil der Kosten für elektrische Energie an den Produktionskosten von Chlor beträgt zwischen 50–60 %. Obwohl es sich bei den verschiedenen Varianten der Chlor-Alkali Elektrolyse um ausgereifte Technologien mit jahrzehntelanger betrieblichen Praxis handelt, werden die einzelnen Elektrolyse-Zellen immer noch weiter entwickelt, mit dem Ziel, eine möglichst effiziente Elektrolyse und damit kostengünstige Chlorproduktion zu ermöglichen. Einige dieser Entwicklungen können bereits implementiert werden, während andere sich noch in einem Entwicklungsstadium befinden.

5.4.1 ZERO-GAP TECHNOLOGIE

Die Größe der aktiven Membrane im Membran-Verfahren wird durch ihre Halterung begrenzt. Die Zero-Gap Technologie von thyssenkrupp Uhde Chlorine Engineers, bzw. von Asahi Kasei (Japan) ermöglichen es mit einem speziellen Zelldesign, den Abstand zwischen Membrane und Elektroden auf null zu minimieren und die Zellspannung zu reduzieren, da keine Spannungsverluste durch den Elektrolyt mehr auftreten. Ein Austausch aktueller, sich im Betrieb befindlicher Zellen gegen ZeroGap Zellen reduziert den spezifischen elektrischen Energiebedarf um bis zu 5–10 %.

5.4.2 SAUERSTOFFVERZEHRELEKTRODE (SVK)

Die Sauerstoffverzehrkathode ersetzt die gängige Kathodenreaktion (Reaktionsgleichung 3) durch die Reaktion mit Sauerstoff gemäß Reaktionsgleichung 11.



Damit wird die Wasserstofferzeugung vermieden. Diese Technologie ist daher nur für jene Standorte geeignet, die nicht auf den Wasserstoff aus der Elektrolyse angewiesen sind. Der Kathode muss elementarer Sauerstoff in Reinform nach einer Luftzerlegung zugeführt werden. Insgesamt reduziert sich der spezifische elektrische Energiebedarf der Elektrolyse um bis zu 25–30 %. Unter Berücksichtigung des zusätzlichen Energiebedarfes für die Sauerstofferzeugung ist eine Reduktion des spezifischen elektrischen Energiebedarfs für die Chlorherstellung um 15–20 % realistisch⁵.

⁵ Je nach Standort liegt ggfs. ein Überschuss von Sauerstoff aus der Luftzerlegung vor.

5.4.3 SCHALTBARE SAUERSTOFFVERZEHRELEKTRODE

Diese Entwicklung zielt auf eine Kathode ab, die entweder im Sauerstoffverzehrmodus betrieben, mit einem ca. 15–20 % geringeren spezifischen elektrischen Energiebedarf pro t Cl₂ und keinen Wasserstoff produziert oder als eine „normale“ Elektrode betrieben werden kann, d.h. mit Wasserstoffproduktion und einem entsprechendem erhöhtem spezifischem elektrischem Energiebedarf. Falls an dem Standort die Wasserstoffversorgung nicht kritisch oder nicht in hohem Umfang von der Chlor-Alkali Elektrolyse abhängt, so ermöglicht diese Entwicklung theoretisch eine beachtliche, kurzzeitige Flexibilität von rund 20 %. Die Flexibilität hängt von dem Betriebszustand der Elektrode ab. Im Sauerstoffverzehrmodus kann sie zusätzliche Last aufnehmen und in den „normalen“ Elektrodenmodus unter Produktion von Wasserstoff wechseln, falls sie sich im „normalen“ Betriebsmodus unter Wasserstoffproduktion befindet, kann sie in dem Sauerstoffverzehrmodus wechseln und damit die Last reduzieren. Die Technologie einer Chlorproduktion mit schaltbarer Sauerstoffverzehrelektrode mit dem dafür benötigten Zellkonzept wird im Rahmen des SynErgie-Projektes aktiv erforscht.

5.5 BETRIEBSWIRTSCHAFTLICHE HEMMNISSE UND PRIORITÄTEN

Die Chlor-Alkali Elektrolyse stellt für die chemische Industrie wesentliche Grundstoffe her, die im Anschluss zum größten Teil direkt weiterverarbeitet werden. Die deutsche chemische Industrie hat in den letzten 20 Jahren einen Wandel durchlaufen, in dem sich die großen Unternehmen, die die gesamte Wertschöpfungskette von den Rohstoffen bis zu den Endprodukten inklusive der Infrastruktur in einem Unternehmen abbildeten, teilweise aufgespalten haben. Es haben sich viele kleinere Spezialunternehmen herausgebildet, die nur einen bestimmten Teil dieser Wertschöpfungskette abbilden, bzw. spezielle Chemieparksbetreiber ausgegründet, die die Infrastruktur des Chemieparks betreiben. Dennoch bleiben die Anlagen und ihre Betreiber durch die jeweilige Standortstruktur sehr eng miteinander verwoben und aufeinander angewiesen.

5.5.1 STANDORTEINBINDUNG

Die entsprechende Optimierung der Prozess- und Wertschöpfungsketten findet nun nicht mehr ausschließlich innerhalb eines zentral gesteuerten Unternehmens statt, sondern übergreifend mit allen beteiligten Partnern an einem Standort unter Berücksichtigung der jeweiligen Interessenslagen aller Unternehmen. Dieser Prozess wird unterstützt durch die Tatsache, dass viele der Personen an einem Standort zwar unter neuem Namen firmieren, sich aber aus der Zusammenarbeit in der Vergangenheit gut kennen. Im Idealfall läuft der Standort wie ein gut geöltes Uhrwerk, in dem ein Zahnrad (Zwischenprodukt) in das andere greift (reibungslöslos in den nächsten Prozess überführt wird). Dieser Prozess beruht im Wesentlichen auf Vertrauen, was sich über einen langen Zeitraum erfolgreicher Zusammenarbeit aufbaut.

Ein Anlagenbetreiber in der chemischen Industrie betreibt seine Anlage, um ein Produkt für seine Kunden herzustellen. Die Belieferung der Kunden mit dem Produkt in der vereinbarten Menge und der spezifizierten Qualität hat die höchste Priorität. Der Anlagenbetreiber versucht diesen Verpflichtungen möglichst kostengünstig und ressourceneffizient nachzukommen. Aus technischer Sicht bedeutet dies, dass die Anlagen möglichst vollständig ausgelastet betrieben werden sollten.

Der eventuelle wirtschaftliche Vorteil eines flexiblen Betriebs im Sinne von reduzierten Stromkosten muss abgewogen werden gegen die gesicherte Belieferung der Kunden in vereinbarter Menge und Qualität, der möglicherweise reduzierten Lebensdauer von Anlagenkomponenten durch erhöhte Abnutzung, zusätzlichen Aufwendungen für die Implementierung von Flexibilitätsvoraussetzungen, Fixkosten der Anlage, ggfs. zusätzlicher Ressourcenverbrauch, ggfs. Investition in zusätzliche Speicherkapazitäten sowie technische Durchführbarkeit der Flexibilität.

Da in einem vernetzten Produktionssystem keine Anlage unabhängig von den vor- oder nachgelagerten Prozessketten gedacht werden kann, ist auch das Konzept der Flexibilität in einem integrierten Standort nicht auf einen einzigen Prozess reduzierbar. Die Bilanzgrenze zur Betrachtung

der Flexibilitätsoptionen erweitert sich um die vor- und nachgelagerten Prozessketten bis hin zu speicherbaren Zwischenprodukten. Die dafür vorhandene oder ausbaufähige Speicherkapazität beschränkt unter Umständen die verfügbaren Flexibilitätsoptionen.

5.5.2 VERSORGUNG MIT ELEKTRISCHER ENERGIE

Die Chlor-Alkali Elektrolyse ist der Prozess der chemischen Industrie mit dem höchsten Bedarf an elektrischer Energie in der chemischen Industrie und die Kosten für die elektrische Energie machen zwischen 50–60 % der Produktionskosten der Betreiber aus. Jeder weitere Prozessschritt, der zu der Bilanzgrenze hinzugedacht werden muss, führt zu einer weiteren Wertschöpfung und damit zu einer Reduzierung des Anteils der Stromkosten in der Prozesskette. Dies hat direkte Auswirkungen auf die Strompreisdifferenz zwischen Normalbetrieb und der Flexibilitätsmaßnahme, die notwendig ist, um das Anbieten von Flexibilität an einem Standort für den Betreiber attraktiv zu gestalten. Generell muss die Strompreisdifferenz höher ausfallen, je länger die Prozesskette ist, um die vermiedene Wertschöpfung (z.B. im Fall von Lastreduktion) und entgangene Marge zu kompensieren.

Die Versorgung mit elektrischer Energie wird an den Standorten unterschiedlich gehandhabt. In den meisten Fällen tritt die Chlor-Alkali Elektrolyse als eigener Großverbraucher auf. Häufig wird ein Teil der absehbaren Energiemenge über langfristige Verträge gesichert und der fehlende Anteil kurzfristig an der Börse über den day-ahead Markt eingekauft. In diesem Umfeld gelten für die Betreiber der Chlor-Alkali Elektrolysen unterschiedliche Ausnahmefälle in den relevanten Regularien.

Die Kosten für elektrische Energie der Unternehmen setzen sich aus Commodity-Kosten, Netzentgelten und Umlagen zusammen. Wenn eine höhere Last als vereinbart abgerufen wird, wird ein deutlich erhöhter zusätzlicher Leistungspreis fällig. Dieser liegt in der Größenordnung von 100 €/kW im Jahr, so dass Unternehmen aktives Lastspitzenmanagement betreiben, um Lastspitzen zu vermeiden. Aus Sicht des Unternehmens sollte die Auslegung des Leistungspreises möglichst im Einklang zu der ständig benötigten Leistung stehen. Um einen weiteren Ausbau des Anschlusses um damit gegebenenfalls höhere Spitzenlasten zu ermöglichen, müssen sich der Energieversorger und das zu versorgende Unternehmen die Kosten teilen.

Für den Strompreis gelten bei Erreichung bestimmter Kriterien (Mindestverbrauch, Mindestanteil von Stromkosten an der Bruttowertschöpfung) die Besonderen Ausgleichsregelungen gemäß EEG §64 Stromkostenintensive Unternehmen. Für die erste verbrauchte Gigawattstunde fällt die reguläre EEG-Umlage an [12]. Für die darüberhinausgehende Stromabnahme fallen 15 % der regulären Abgabe an (§64.2 (2 a)), maximal jedoch 0,5 % der Bruttowertschöpfung gemäß (§64.2 (3 a)) solange die Grenzwerte in (§64.2 (4 b)), Strompreis maximal 0,1 €ct/kWh eingehalten werden.

Gemäß §19 Abs. 2 Satz 2 der Stromnetzentgeltverordnung (StromNEV) [13] ersetzen individuelle Netzentgelte die allgemein üblichen für Großverbraucher mit einem besonders einheitlichen Abnahmeprofil. Damit wird dem Umstand Rechnung getragen, dass eine besonders konstante

Stromentnahme netz-/systemdienlich ist und die allgemeine Netzentgeltsystematik zu überhöhten Netzentgelten führen würde. Für eine konstante Abnahme zwischen 7.000 h und 7.500 h im Jahr reduzieren sich die Netzentgelte für Abnahmen von über 10 GWh, (also eine Anlage über 1,5 MW Leistung, de-facto alle Chlor-Alkali Elektrolysen in Deutschland) – abhängig von den Kosten des sog. physikalischen Pfads – auf bis zu 20 % der üblichen Netzentgelte. Für eine konstante Abnahme zwischen 7.500 h und 8.000 h reduzieren sich die Netzentgelte auf bis zu 15 % und für eine Abnahme über 8.000 h auf bis zu 10 %. Die Höhe der Netzentgelte variiert regional, da diese die Kosten des Verteilnetz- und Übertragungsnetzunterhalts und -ausbaus widerspiegeln. Abhängig von der Region beträgt der erzielte Kostenvorteil leicht eine einstellige Millionensumme im Jahr. Das Anbieten von Flexibilität ist derzeit nur dann denkbar, wenn die Erfordernisse einer gleichmäßigen Abnahme gemäß §19 Abs. 2 (StromNEV) dadurch nicht gefährdet werden [13]. Eine Ausnahme davon bildet die sog. Abschaltbare Lasten Verordnung – AbLaV, bei der die erbrachte Flexibilität bei der Ermittlung der Kriterien gem. § 19 Abs. 2 StromNEV herausgerechnet wird [13, 14].

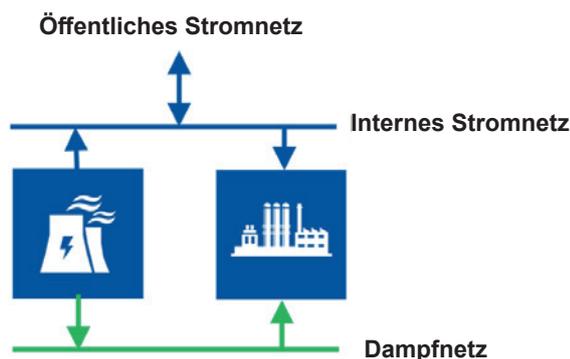
Die Rationale dieser Regelung ist die Tatsache, dass die Kosten für die Netzstabilisierung im Verteilnetz, bei einer durch grundlastfähige Kraftwerke dominierten Erzeugung, durch sehr kurzfristige Änderungen, in der Last dominiert werden. Ein konstanter Verbraucher, wie die Chlor-Alkali Elektrolyse, stabilisiert das Netz und ist nicht ursächlich für den kurzfristigen Netzstabilisierungsbedarf.

Vor dem Hintergrund des aktuell geltenden Strompreisdesigns werden die Unternehmen für eine möglichst konstante Abnahme bei der vereinbarten Leistung belohnt. Zu berücksichtigen sind hierbei auch die Ausfälle durch Wartung und unvorhergesehene Ereignisse. Während eine Reduzierung der Last innerhalb dieses Zeitrahmens prinzipiell möglich wäre, wird die notwendige Lasterhöhung durch die zusätzlichen Kosten für die Spitzenlast verteuert. Aus betriebswirtschaftlicher Sicht ergeben sich aus der aktuellen Regulationsstruktur wenig Anreize für das Anbieten von Flexibilität.

5.5.3 NUTZUNG VON KWK-EIGENERZEUGUNG

Bei Konstellationen mit hocheffizienter KWK-Eigenerzeugung, die Strom für die Elektrolyse und Prozessdampf für die Natronlaugeneindampfung gekoppelt erzeugt, sind andere Aspekte zu betrachten.

Abbildung 5.6: Energieversorgung durch interne KWK Strom- und Wärmeerzeugung [15]



Durch die Vorgabe der Viertelstundenbilanzierung (EEG §61h) wird die EEG-Umlage nur dann begrenzt, wenn die Eigenerzeugung in jeder Viertelstunde auch den Verbrauch abdeckt [12].

Wird der Strombedarf durch KWK-Eigenerzeugung gedeckt, hat der Marktpreis keinen Einfluss, da lediglich die Eigenerzeugungskosten relevant sind.

Wird zusätzlich Strom aus dem öffentlichen Netz entnommen, wird dieser mit den üblichen Abgaben belastet, sodass das Marktpreissignal bei hohem EE-Aufkommen mit den zusätzlichen Abgaben und Umlagen belastet, und damit der Anreiz niedriger Strompreise konterkariert wird.

Lediglich in Konstellationen, in denen mehr Strom erzeugt als verbraucht wird, und der Strom am Markt verkauft werden kann, kann mit einem Speicher ein zusätzlicher Deckungsbeitrag erwirtschaftet werden, wenn die Marktstrompreise höher sind als die Eigenerzeugungskosten.

Die Nutzung von flexiblen Lasten in Kombination mit KWK-Eigenerzeugung kann demnach funktionieren, wenn die KWK-Eigenerzeugung auch in gewissen Grenzen flexibilisiert werden kann.

5.5.4 TECHNISCHE LIMITIERUNGEN FÜR DIE BEREITSTELLUNG VON FLEXIBILITÄT

Letztendlich reduzieren technische Aspekte die Flexibilisierungsmöglichkeiten der Chlor-Alkali Elektrolyse. Neben der Randbedingung der Belieferung der Folgeprozesse, lassen sich die Elektrolyseure des Membran-Verfahrens, bzw. des Diaphragma-Verfahrens relativ gut dynamisch zwischen 50–100 % der Maximallast betreiben. Als ungefährender Wert für die Dynamik können 15–30 min für die Variation zwischen halber Last und Volllast angenommen werden.

Eine Reduktion der Teillast auf unter 50 % ist im Falle des Diaphragma-Verfahrens durch die minimale Stromdichte für den Prozess beschränkt, während im Falle des Membran-Verfahrens zunehmend Chlorid-Verunreinigungen in der produzierten Natronlauge auftreten und die geforderten Spezifikationen nicht mehr erfüllt werden können.

5.5.5 AUFTRAGS- UND SCHICHTPLANUNG

Die Chlor-Alkali Elektrolyse wird durchgehend („24/7“, also 24 h 7 Tage in der Woche) im 3-Schicht-Betrieb betrieben. Es wird angenommen, dass die Schichtplanung industrie-üblich wöchentlich geschieht mit übergeordneten länger laufenden Plänen. Auf die Auswirkungen einer Flexibilisierung auf den Schichtbetrieb und die Mitarbeiter wird an dieser Stelle nicht näher eingegangen; es wird nicht erwartet, dass für das Beispiel Chlor-Alkali Elektrolyse der chemischen Industrie Besonderheiten vorliegen, die prohibitiv sind.

Die Produktionsplanung richtet sich an der Nachfrage der Folgeprozesse aus. Schwankungen in der Produktion der Folgeprozesse haben daher direkte Auswirkungen auf die Produktion der vorgelagerten Chlor-Alkali Elektrolyse, da nur so viel Chlor produziert wird, wie die Folgeprozesse benötigen.

5.5.6 WARTUNG UND REPARATUREN

Die Wartung der Chlor-Alkali Elektrolyse ist an den Standorten unterschiedlich organisiert. Da die Chlor-Alkali Elektrolyse modular aufgebaut ist, können einzelne Elektrolyseure gewartet werden, während der Rest der Anlage den Betrieb aufrechterhält, so dass eine leicht reduzierte Produktionskapazität in der Produktion gehalten wird und es zu keinen Stillstandszeiten kommt.

Die Membranen unterliegen einer ständigen Degradation, so dass sie turnusmäßig ausgetauscht werden. Der Zeitpunkt wird in der Regel durch einen langfristigen Plan vorgegeben. Darüber hinaus werden in einzelnen Fällen Membranen ausgetauscht, wenn diese nicht mehr voll funktionstüchtig ist, was an einer erhöhten Zellspannung ablesbar ist.

Am Beispiel eines Standortes steht der Wechsel der Membranen rund zweimal im Monat an rund 10 % der Elemente durchgeführt und nimmt rund 12–14 Stunden in Anspruch. Für das An- und Abfahren der Elektrolyseure wird nochmal je eine Stunde benötigt. Die Wartung wird nur in der Tag-Schicht durchgeführt; das benötigte Material wie Membrane wird vor Ort gelagert, die Elemente, also einzelne ganze Elektrolyse-Zellen, allerdings nicht.

In einigen Fällen werden ganze Standorte für 1–2 Wochen heruntergefahren und sämtliche Prozesse am Standort werden parallel gewartet, umgerüstet, ertüchtigt und auch wieder parallel hochgefahren. Diese logistischen Herausforderungen können nicht als Flexibilitätsoptionen gewertet werden, da sie im Vorhinein dem Stromversorger angezeigt und entsprechend berücksichtigt werden. Unter Berücksichtigung eines 2-wöchigen Reparatur- und Wartungsintervalls oder der entsprechenden kontinuierlichen Reparatur und Wartung reduziert sich die maximal mögliche Anlagenauslastung bezogen auf die Nominalkapazität auf 94–96 %.

5.5.7 BISHERIGE ERFAHRUNGEN MIT FLEXIBILITÄT

Verschiedene Betreiber der Chlor-Alkali Elektrolyse (Membran-Verfahren) haben in der Vergangenheit an den Regelenergiemärkten teilgenommen und für die Minutenreserve Regelleistung angeboten. Die für die Präqualifizierung notwendigen Parameter konnten von der Chlor-Alkali Elektrolyse gut erfüllt werden, wenn auch die Präqualifizierung aus Sicht der Unternehmen als relativ aufwendig bewertet wurde. Einige Unternehmen haben von der Bereitstellung von Regelenergie wieder Abstand genommen, da der organisatorische Aufwand für

die relativ geringe Anzahl an Abrufen zu hoch war. Der Preisverfall auf den Regelenergiemärkten hat die betriebswirtschaftliche Berechnungsgrundlage für das Anbieten von Regelenergie aus Sicht der Betreiber entzogen. Einige Unternehmen bieten auch abschaltbare Leistung im Sinne der Verordnung zu abschaltbaren Lasten – AbLaV an [14]. Dies war jedoch aufgrund der restriktiven Präqualifikationsanforderungen der Übertragungsnetzbetreiber insbesondere bei der Lastcharakteristik bisher nur schwer möglich. Insgesamt wurde die AbLaV bisher von den Chemie-Unternehmen nur zögerlich angenommen [6].

Das Vermarkten von Regelenergie erfolgt über Aggregatoren, die verschiedene Beiträge zusammenführen und diese als Paket vermarkten. Der wesentliche Vorteil aus Sicht der Unternehmen ist, dass diese Bündelung zu Freiheitsgraden für die beteiligten Unternehmen führt. Sie müssen nicht jeden Abruf bedienen, sondern können ihr Flexibilitätsangebot in Abhängigkeit von den betrieblichen Erfordernissen anbieten. Generell wird die Priorität der betrieblichen Erfordernisse als wesentliche Bedingung für die Teilnahme an der Vermarktung von Flexibilität gesehen. Die Rolle der Aggregatoren stellt einen Schwerpunkt der folgenden Projektarbeiten dar.

5.6 WISSENSCHAFTLICH-TECHNISCHE RAHMENBEDINGUNGEN FÜR EINE FLEXIBILISIERUNG

5.6.1 ABHÄNGIGKEIT DES SPEZIFISCHEN ENERGIEBEDARFS VON DER STROMSTÄRKE

Eine Besonderheit der Elektrolyse-Verfahren ist die Tatsache, dass der spezifische Energiebedarf für die Produktion des Elektrolyseproduktes (hier die ECU) aufgrund von Überspannungseffekten und den erhöhten Ohm'schen Verlusten speziell am Separator mit der Stromdichte zunimmt. Im Umkehrschluss heißt dies, eine Reduzierung der Last reduziert proportional die Produktion der ECU. Für eine höhere Last, d.h. höhere Stromdichte kommt der umgekehrte Effekt zum Tragen: Es wird mehr elektrische Energie pro ECU benötigt um die zusätzliche Produktion zu ermöglichen. Die Abhängigkeit des spezifischen Energiebedarfs für die Chlorproduktion im Membran-Verfahren ist in Abbildung 5.7 dargestellt.

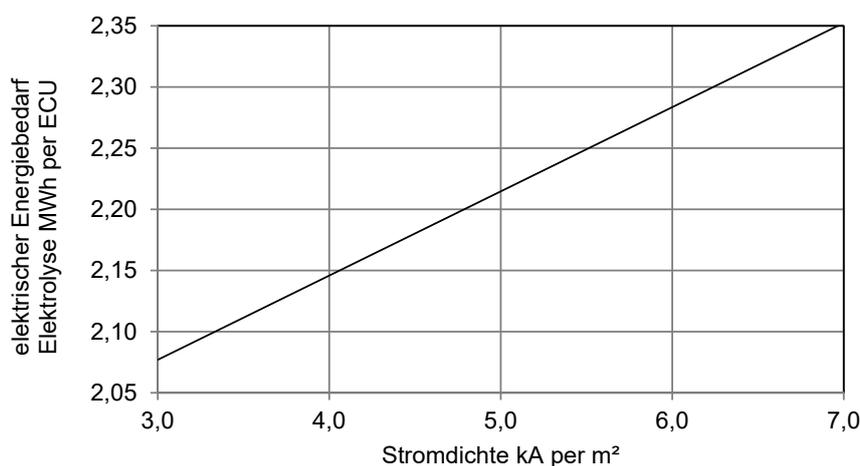


Abbildung 5.7: Beispielhafter Verlauf des spezifischen elektrischen Energiebedarfs als Funktion der Stromdichte für das Membran-Verfahren [4]

5.6.2 RANDBEDINGUNGEN FÜR LASTVERSCHIEBUNGEN

Aus Sicht eines Industrieunternehmens stehen die möglichst störungsfreie Produktion und die reibungslose Belieferung der Kunden und Folgeprozesse im Mittelpunkt. In diesem Sinne kann Flexibilität nur angeboten werden, wenn die damit verbundene Produktionsänderung im Laufe des betrachteten Zeitintervalls wieder ausgeglichen werden kann, d.h. eine Lastverschiebung erfolgt. Da der Ausgleich erfolgen muss, kann die Änderung der Produktionsbedingungen in eine Richtung maximal solange erfolgen, wie sie von der Änderung in die andere Richtung im Zeitintervall noch ausgeglichen werden kann.

Die Produktion ist gegeben als das Produkt der durchschnittlichen Auslastung (X) der Anlage mit der Nennkapazität und dem Betrachtungszeitraum (t). Daher muss gelten:

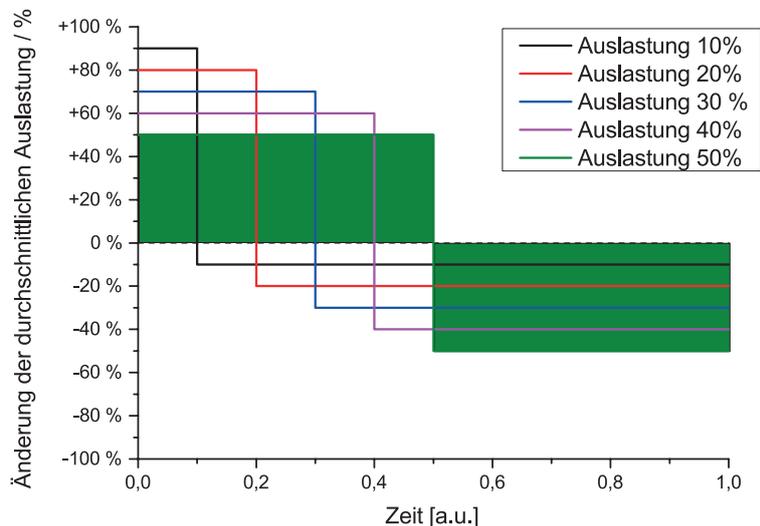
$$X \cdot t \cdot \text{Kap} = \text{Kap} \cdot (x_1 \cdot t_1 + x_2 \cdot t_2)$$

Mit $t = t_1 + t_2$ und $\Delta x_1 = x_1 - X$ (Erhöhung) und $\Delta x_2 = X - x_2$ (Reduzierung) folgt daraus

$$\Delta x_1 \cdot t_1 = \Delta x_2 \cdot t_2$$

Das Produkt von Zeit (t_1) und der Änderung der temporären Auslastung (Δx_1) in der einen Richtung (z.B. erhöhte Produktion) muss dem Produkt von Zeit (t_2) und Änderung der temporären Auslastung (Δx_2) (z.B. niedrigere Produktion) entsprechen, um im Durchschnitt die gewünschte Produktionsmenge (Xt) zu erreichen. Durch diese Bedingung sind die maximal möglichen Zeiten t_1 und t_2 ebenfalls eine Funktion der durchschnittlichen Auslastung, wobei die Flächen der erhöhten und reduzierten Auslastungsänderung gleich sein müssen. Dies ist schematisch in Abbildung 5.8 dargestellt. Die Linien geben durchschnittliche Auslastung der Anlage an. Erhöhung und Reduzierung verhalten sich spiegelverkehrt und das Diagramm kann entsprechend für die durchschnittlichen Auslastungen von 50–90 % interpretiert werden. Die Rechtecke markieren die Möglichkeit für eine durchschnittliche Auslastung von 50 % mit +/- 50 % Änderung.

Abbildung 5.8: Flexibilität bei gegebener durchschnittlicher Produktion



5.6.3 FLEXIBILITÄT ALS FUNKTION DER ANLAGENAUSLASTUNG

Die mögliche maximale Flexibilität als Lastverschiebung ist durch die Größe der Flächen gegeben. Sie wird dann erreicht, wenn die durchschnittliche Auslastung 50 % der Anlagenkapazität bei Vollauslastung entspricht. Diese maximal mögliche Flexibilität beträgt $\Delta x_1 \cdot t_1 = 50 \% \times 0,5 = 25 \%$ der Nennkapazität multipliziert mit dem Zeitintervall t . Die Anlage kann für die halbe Zeit ihre Produktion verdoppeln oder auf null reduzieren, muss dies aber in der zweiten Hälfte entsprechend kompensieren. Dabei spielt es keine Rolle, wie häufig in dem betrachteten Zeitintervall zwischen einer Produktionserhöhung und -verringerung hin- und her gewechselt wird, solange die Summe der Zeiten, d.h. die entsprechenden Produktionsmengen, eingehalten wird.

Eine reale Anlage kann von ihrer durchschnittlichen Auslastung auf 100 % hochgefahren werden oder auf 0 % reduziert werden. Durch die Lastverschiebung wird sichergestellt, dass die Änderung der Produktion im betrachteten Zeitintervall kompensiert wird. Damit ist die maximal mögliche Flexibilität eine Funktion der Anlagenauslastung, deren Verlauf in Abbildung 5.9 dargestellt ist.

In Gesprächen mit den Betreibern wurde bestätigt, dass die Chlor-Alkali Elektrolyse, sowohl im Membran- als auch im Diaphragma-Verfahren, die Bereiche zwischen halber Last (50 %) und Volllast (100 %) mit guter Dynamik abfahren kann.

Unter diesen Randbedingungen ist die maximale mögliche Flexibilität bei einer durchschnittlichen Anlagenauslastung von 75 % gegeben. Diese beträgt dann nur $(\Delta x_1) \cdot t_1 = 25 \% \times 0,5 = 12,5 \%$. Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 5.9 dargestellt.

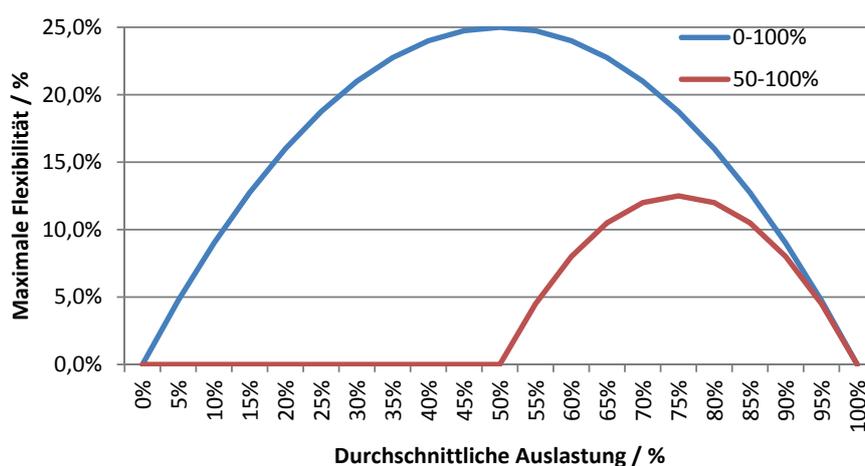


Abbildung 5.9: Zusammenhang von Auslastung und Flexibilität

5.6.4 WECHSELWIRKUNG ENERGIEEFFIZIENZ UND FLEXIBILITÄT

Generell werden Produktionsanlagen nach Möglichkeit an ihrem optimalen Betriebspunkt betrieben. Daher führt jede Abweichung von diesen Parametern, also auch die Erhöhung oder Erniedrigung der Last, zu einem Verlassen des optimalen Betriebspunktes und damit zu einer geringeren Effizienz des Prozesses.

Elektrolyse-Prozesse stellen, aufgrund der linearen Abhängigkeit des spezifischen Energiebedarfs der Produktherstellung von der Stromstärke, eine Ausnahme dar. Dennoch führt auch hier eine Flexibilität um einen Betriebspunkt, wenn die durchschnittliche Produktion im Betrachtungszeitraum unverändert bleiben soll, zu einer Abnahme der Effizienz. Dies hängt damit zusammen, dass der Anstieg des spezifischen elektrischen Energiebedarfs mit der Stromstärke (erhöhte Last) größer ist als Minderung für geringere Stromstärke (reduzierte Last), wie in Abbildung 5.7 dargestellt.

Beispiel: Angenommen, die Anlage verfügt im betrachteten Betriebspunkt über eine Leistung von 2,5 MW und der spezifische elektrische Energiebedarf für die Produktion von einer Tonne Chlor beträgt 2,5 MWh, womit die Anlage an dem Betriebspunkt 1 t Chlor pro Stunde produziert. Angenommen, eine Produktionsabweichung von 20 % nach oben und unten, d.h. eine Produktion von 1,2 t Cl_2/h bzw. 0,8 t Cl_2/h , führt zu einer relativen Änderung der spezifischen Energiebedarfs von 4 % bzw. -4 %, dann würde für die erhöhte Produktion eine Leistung von 3,12 MW (2,6 MWh/t Cl_2) abgerufen und für die reduzierte Produktion eine Leistung von 1,92 MW (2,4 MWh/t Cl_2). Wenn die Produktion im betrachteten Zeitintervall unverändert im Durchschnitt dem Normalbetrieb entsprechen soll, dann muss die reduzierte Produktion wieder durch eine erhöhte Produktion ausgeglichen werden. Im Normalbetrieb würde also eine Tonne Chlor mit einem elektrischen Energiebedarf von 2,5 MWh produziert werden. In einem flexiblen Wechselbetrieb werden in dem halben Zeitintervall 0,6 t Chlor mit 1,56 MWh und in der anderen Hälfte des Zeitintervalls 0,4 t Chlor mit 0,96 MWh produziert. Der energetische Gesamtbedarf für den Wechselbetrieb liegt damit bei 2,52 MWh/t Cl_2 und damit um 0,8 % höher als im Normalbetrieb. Das heißt, Flexibilität und Effizienz des Verfahrens verhalten sich auch im Falle der Chlor-Alkali Elektrolyse direkt gegenläufig.

5.6.5 EFFIZIENZ DER CHLOR-ALKALI ELEKTROLYSE ALS STROMSPEICHER

Aus Sicht des Stromsystems kann ein flexibler Betrieb der Chlor-Alkali Elektrolyse wie ein Stromspeicher aufgefasst werden. Dem Einspeichern des Stroms, d.h. der Abnahme von elektrischer Energie aus dem Stromnetz, z.B. das Hochpumpen in einem Pumpspeicherwerk entspricht einer Erhöhung der Produktion der Chlor-Alkali Elektrolyse, dem Auspeichern, d.h. dem Zuführen von elektrischer Energie in das Stromnetz, also dem Abfließen des Wassers durch die Turbinen im Pumpspeicher-

werk, entspricht die Drosselung der Produktion. Im Vergleich zu einem klassischen Stromspeicher (z.B. das Pumpspeicherwerk) erfolgt die Speicherung nicht durch Aufnahme und Abgabe elektrischer Energie von und an das Stromnetz, sondern durch erhöhte und reduzierte Aufnahme von elektrischer Energie. Der Effekt aus Sicht des Stromnetzes im Sinne einer Flexibilität ist jedoch identisch. Die Chlor-Alkali Elektrolyse kann elektrische Energie praktisch verlustfrei speichern.

Die Chlor-Alkali Elektrolyse (und auch andere Elektrolyseprozesse) profitieren dabei von der hohen Energiedichte ihrer chemischen Produkte. Die deutschen Pumpspeicher haben ungefähr 7 GW Leistung und eine Kapazität von 40 GWh [7]. Die installierte Leistung der Chlor-Alkali Elektrolyse Anlagen liegt mit ca. 1,3 GW deutlich niedriger, aber 40 GWh Speicherkapazität entsprechen nur der Produktionsdifferenz von 16 kt Chlor mit einer durchschnittlichen Membran-Elektrolyse (hier angenommen $2,5 \text{ MWh/tCl}_2$), mithin 10 % der Produktion der Referenzanlage. Insofern erscheint die Nutzung von flexibel betriebenen Chlor-Alkali Elektrolyse Anlagen in einem längeren Zeitintervall als bei Pumpspeichern üblich sinnvoll zu sein.

5.6.6 PERFEKTE VORAUSSICHT VS. PRODUKTIONSPLANUNG

Die Berechnungen in diesem Kapitel unterstellen eine perfekte Voraussicht des Betreibers über den zukünftigen Produktionsbedarf. Darüber hinaus ist die Berechnungsgrundlage für viele Aspekte ein Kalenderjahr. Für den Betreiber stellt sich daher die Frage, wann welche Flexibilitäts- und welche Produktionsbedarfe bestehen, um diese planen zu können. Da die Gesamtzahl der Stunden, in denen Flexibilität angeboten werden kann durch die Regeln des §19 Abs. 2 der Netzentgeltverordnung (StromNEV) [13] begrenzt ist, kann sich der Betreiber entweder sehr früh im Kalenderjahr entscheiden, seine Flexibilität anzubieten oder in Erwartung auf höhere Erlöse abwarten. In beiden Fällen ist es unwahrscheinlich, dass das Angebot an Flexibilität mit der Notwendigkeit aus Sicht des Stromsystems zusammen fällt. In der realen Welt wird ein Betreiber versuchen, einen Kompromiss zwischen der absehbar planbaren Produktion und dem voraussichtlichen Flexibilisierungsbedarf zu finden.

5.7 ABSCHÄTZUNG DES FLEXIBILITÄTSPOTENZIALS UND DER -PERSPEKTIVEN FÜR DIE CHLOR-ALKALI ELEKTROLYSE IN DEUTSCHLAND

In diesem Unterkapitel wird eine Abschätzung zu den Flexibilitätspotentialen und -perspektiven auf Basis der von den Betreibern zur Verfügung gestellten Informationen vorgenommen. Die Ergebnisse werden aggregiert dargestellt. Des Weiteren dient eine imaginäre Referenzanlage zur Darstellung der Effekte. Die verwendeten Parameter sind im Anhang (Kapitel 5.12.2 und Kapitel 5.12.3) zusammengefasst.

5.7.1 MODELLANSATZ

Im Rahmen des Modells können Lastverschiebungen, Lastreduktionen und Lasterhöhungen abgebildet werden. In allen Fällen wird vereinfachend von einer Nutzung des vollen dynamischen technischen Lastbereichs zwischen installierter Maximallast und minimaler Teillast der Elektrolyse ohne Nebenaggregate ausgegangen.

Die maximale Erhöhung der Last, ausgehend von einem durchschnittlichen Betriebspunkt der Anlage, wird durch die installierte Kapazität, die maximale Lastreduktion durch die minimale Teillast beschränkt. Es wird nach Angaben der Betreiber von einer durchschnittlichen Produktion von 95 %, bezogen auf die Produktionskapazität der Anlage ausgegangen.

5.7.1.1 LASTVERSCHIEBUNG

Eine Lastverschiebung besteht aus zwei gegenläufigen Teilmaßnahmen (Lasterhöhung bzw. Lastreduktion), die hintereinander ausgeführt werden, mit dem Ziel die Änderung der Produktion, die durch die Teilmaßnahme erwirkt wird, durch die zweite Teilmaßnahme zu kompensieren. Die erste Teilmaßnahme ist jene, die das geforderte Anforderungsprofil adressiert.

Aufgrund der hohen durchschnittlichen Auslastung erzielen die Teilmaßnahmen unterschiedliche Laständerungen, die aber mit dem Ziel einer konstanten Produktion über ihre jeweilige Dauer, unter Berücksichtigung der linear angenommenen Rampen, kompensiert werden. Die Gesamtdauer der Maßnahme setzt sich aus der Dauer der beiden Teilmaßnahmen inklusive der Rampenzeit zusammen.

5.7.1.2 LASTERHÖHUNG

Eine Lasterhöhung ist nur in dem Umfang möglich, in dem die maximale Produktionskapazität der Anlage noch nicht erreicht ist. Bei den durchschnittlich sehr hohen Auslastungen, die von den Betreibern berichtet wurden, sind Lasterhöhungen praktisch kaum möglich. Da die aktuelle Produktion bereits an der Nachfrage der Folgeprozesse ausgerichtet ist, ist es unwahrscheinlich, dass eine zusätzliche Produktion sinnvoll weiterverarbeitet werden kann.

5.7.1.3 LASTREDUKTION

Eine Lastreduktion ist mit einer Minderung der Produktion verbunden. Auch wenn diese technisch im Sinne der Elektrolyse möglich ist, führt sie parallel zu einer Minderung der Gesamtwertschöpfung entlang der Folgekette. Dieser Effekt ist standortspezifisch und hängt stark von den Folgeprozessen ab. Im Fall der PVC-Produktion werden die Folgeprozesse explizit berücksichtigt. Für andere Standorte wird die Bilanzgrenze mit der Produktion der ECU aus der Chlor-Alkali Elektrolyse gezogen.

5.7.1.4 KOSTENANALYSE

Für die Abschätzung der Kosten für Flexibilitätsmaßnahmen gegenüber einem durchschnittlichen Betrieb der Anlage, wurden folgende Aspekte quantitativ berücksichtigt:

- **Arbeitspreis:** Eine Lasterhöhung führt über den betrachteten Zeitraum zu einem erhöhten Bedarf an elektrischer Energie, während eine Lastreduktion zu einem geringeren Bedarf führt. Die Abhängigkeit des spezifischen elektrischen Energiebedarfs der Elektrolyse von der Stromstärke ergibt darüber hinaus auch bei Lastverschiebungen einen leicht erhöhten Bedarf an elektrischer Energie.
- **Netzentgelte:** Die Netzentgelte nach §19 Abs. 2 orientieren sich an der Anzahl der Stunden einer gleichmäßigen Abnahme [13], berechnet durch die Gesamtmenge an elektrischer Arbeit im Kalenderjahr dividiert durch die höchste im Kalenderjahr abgerufene Leistung (hier die installierte Leistung). Eine Reduzierung der Abnahme von elektrischer Energie führt bei gleicher Leistung zu einer Minderung der für die individuelle Netzentgeltberechnung relevanten Stundenzahl.
- **Investitionskosten:** Bedingt eine Flexibilitätsoption eine Investition, so werden die damit verbundenen Kosten berücksichtigt und werden auf die Flexibilitätsmaßnahmen umgelegt.
- **Rohstoffe:** Eine Lasterhöhung, d.h. zusätzliche Produktion, ist mit einem zusätzlichen Verbrauch an Rohstoffen verbunden, während eine Lastreduktion, d.h. reduzierte Produktion, zu einer Minderung des Rohstoffverbrauchs führt.
- **Entgangene Erlöse:** Die Produkte der Chlor-Alkali Elektrolyse werden zum Marktpreis berücksichtigt. Eine Lastreduktion führt zu geringerer Produktion und damit zu reduzierten Erlösen. Eine Lasterhöhung führt zu erhöhten Erlösen.

Nicht berücksichtigt in dieser Betrachtung sind alle anderen Aspekte, die zu weiteren Kosten im Vergleich zu einem durchschnittlichen Betrieb der Anlage führen. Insbesondere sind durch erhöhte Flexibilitätsbereitstellung Kosten aufgrund eines höheren Wartungs- und Reparaturbedarfs nicht berücksichtigt.

5.8 FLEXIBILITÄTSOPTIONEN FÜR DIE CHLOR-ALKALI ELEKTROLYSE

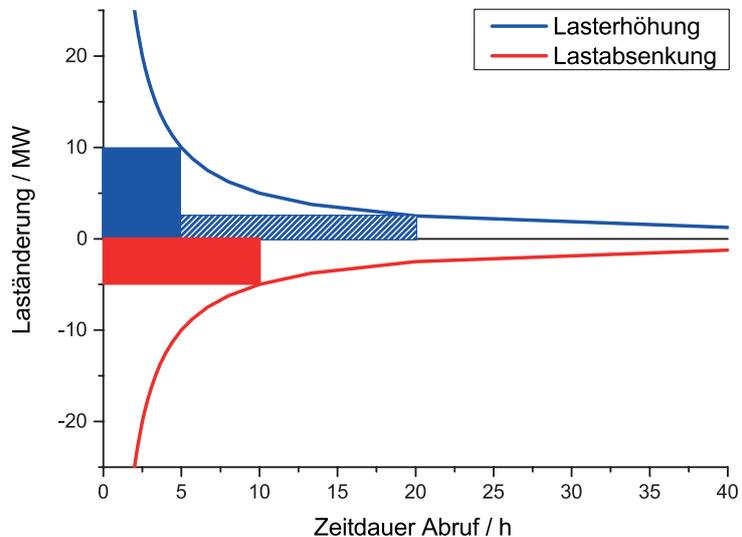
Die Chlor-Alkali Elektrolyse bietet in ihren gegenwärtigen Konfigurationen einige Ansatzpunkte, aber auch Beschränkungen für eine Flexibilisierung. Im Folgenden werden die Flexibilitätspotenziale und -perspektiven diskutiert. Das theoretische Potenzial, also die Differenz zwischen durchschnittlicher Last und Komplettabschaltung bzw. Volllast, entspricht aufgrund der sehr hohen durchschnittlichen Auslastung ($\geq 95\%$) der Chlor-Alkali Elektrolyse in Deutschland ungefähr +1.292 MW bzw. -16 MW ohne Nebenaggregate.

5.8.1 FLEXIBILITÄT IM TEILLASTBETRIEB

Anlagen, die nicht vollständig ausgelastet sind, können im Prinzip die Differenz zur maximalen oder minimalen Auslastung für die Bereitstellung von Flexibilität nutzen. Dabei wird eine ausreichende Dynamik bzw. Trägheit der Folgeprozesse unterstellt.

Wenn ein Produktionsausfall vermieden werden soll, muss die Flexibilitätsmaßnahme in einem relevanten Zeitraum durch eine gegenläufige Maßnahme kompensiert werden. Dabei ist zu beachten, dass die Kompensation der Produktion relativ schnell erfolgen muss, abhängig von der Dynamik der Prozesskette. Dies ist schematisch in Abbildung 5.10 dargestellt. Im Falle einer Lastverschiebung muss die Lastreduktion durch eine entsprechende Lasterhöhung kompensiert werden, deren Dauer von der möglichen Lasterhöhung abhängt. Für die nachfolgende Abschätzung wird davon ausgegangen, dass die Kompensation der Laständerung innerhalb einer halben Schicht (4 Stunden) abgeschlossen sein muss. Daraus folgt unter Berücksichtigung der Rampen, dass das Verhältnis der beiden Laständerungen den Faktor 6 nicht übersteigen darf und sich die Anwendung dieser Maßnahme auf das Anforderungsprofil 1 (Dauer: 15 Minuten) beschränkt. Diese Art der Lastverschiebungen ist aktuell kein handelbares Produkt.

Abbildung 5.10: Produktionsausgleich für eine initiierte Laständerung



Eine Lasterhöhung ist in der Regel aufgrund der sehr hohen durchschnittlichen Auslastung ($\geq 95\%$) der Anlagen nicht möglich. Damit ist auch eine Kompensation einer Lastreduktion praktisch nicht möglich und ein Teillastbetrieb führt in der Regel zu Produktionsausfall.

Die Chlor-Alkali Elektrolyse hat eine standortabhängige Teillastfähigkeit und entsprechend sind Lastreduktionen prinzipiell möglich. Das technische Potenzial beträgt für alle Anlagen in Deutschland ca. +443 MW, ausgehend von einer 95 % durchschnittlichen Auslastung bezogen auf die Gesamtproduktionskapazität. Diese entspräche einem Betrieb aller Anlagen auf minimaler Teillast. Unter Berücksichtigung der Kompensation innerhalb einer halben Schicht sowie einer eingeschränkten Verfügbarkeit der Anlagen, d.h. nur die Hälfte der Anlagen kann aus betrieblichen Gründen eine Lastreduktion in dem vorgegebenen Umfang durch-

führen, ergibt sich ein deutschlandweites eingeschränktes technisches Potenzial von +21 MW bis +95 MW.

Die Kosten der Lastreduktion werden dominiert von dem Verzicht auf die Erlöse aus der Produktion, welche den geringeren Bedarf an elektrischer Energie und Rohstoffe deutlich überkompensieren. Die Kosten werden für 365 Abrufe im Anforderungsprofil 1 (15 min Dauer) im Jahr für die Referenzanlage mit 535 €/MWh abgeschätzt und für die Anlagen in Deutschland im Bereich 230–600 €/MWh. Dabei ist zu beachten, dass der Produktionsausfall der Folgeketten (außer für die PVC-Produktion) aufgrund ihrer Komplexität nicht berücksichtigt wurde.

5.8.2 FLEXIBLE NUTZUNG DES CHLOR-SPEICHERS

Einige Standorte kondensieren das produzierte Chlor in einen Zwischenspeicher, bevor das flüssige Chlor durch Verdampfung, den Folgeprozessen zur Verfügung gestellt wird. Diese Chlorspeicher sind in ihrer Speicherkapazität beschränkt, da sie auf sicherheitstechnischen Überlegungen basierend ausgelegt wurden. Eine Erhöhung der vorhandenen Chlor-Speicherkapazität zur Bereitstellung von Flexibilität wird aufgrund der regulatorischen und sicherheitstechnischen Herausforderungen von den Anlagenbetreibern ausgeschlossen.

Dennoch kann die existierende Speicherkapazität eingeschränkt zum Anbieten von Flexibilität genutzt werden, wobei die Möglichkeiten standortspezifisch sehr unterschiedlich eingeschätzt werden. Um das nutzbare Flexibilitätspotenzial zu ermitteln, ist nicht nur die Größe des Chlor-Speichers von Relevanz, sondern vor allem die Produktionskapazität der Chlorproduktion, deren Teillastfähigkeit sowie die Produktionsauslastung, wie im Beispiel in Abbildung 5.11 gezeigt.

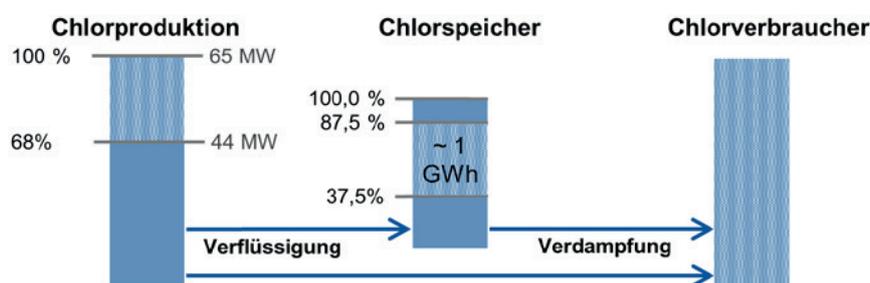


Abbildung 5.11: Interaktion Chlorproduktion, -speicher und -verbraucher [15]

Dementsprechend kann die Produktionsanlage nur in einem Lastbereich von 68–100 % der Produktionskapazität flexibel gesteuert werden.

Da der Chlorspeicher primär eine sicherheitstechnische Funktion hat, kann nicht der gesamte Speicherbereich für die virtuelle Batterie genutzt werden, sondern nur ein Teilbereich. In diesem Beispiel wurde angenommen, dass 50 % des Speichers für Flexibilitätspotenziale genutzt werden können, was einer Speicherkapazität von ca. 1 GWh entspricht. Entscheidend für das Flexibilitätspotenzial ist jedoch die Anlagenauslastung, wie Tabelle 5.2 gezeigt.

Auslastung	Äquivalente Stromlast	Freie Leistung für Speicher		Symmetrische Leistung
		Beladung / Entladung		
100 %	65 MW	0 MW	21 MW	0 MW
92 %	59 MW	5 MW	15 MW	5 MW
84 %	54 MW	10 MW	10 MW	10 MW
76 %	49 MW	15 MW	5 MW	5 MW
68 %	44 MW	21 MW	0 MW	0 MW

Tabelle 5.2: Freie Leistung für den Speicher in Abhängigkeit der Auslastung [15]

Bei einer Vollauslastung der Anlage zu 100 % (~ 65 MW Last) wird die gesamte Chlorproduktion auf die Abnehmer verteilt, sodass keine Kapazität mehr zur Verfügung steht den Speicher zu beladen. Eine Senkung der Anlagenlast ist nur bei gleichzeitiger Entladung des Chlorspeichers möglich.

Im umgekehrten Fall bei unterer Teillast von 68 % (~ 44 MW Last) kann die Anlagenlast zwar gesteigert werden um den Speicher zu beladen, eine weitere Reduktion der Last ist jedoch nicht mehr möglich.

Für die Bereitstellung einer dauerhaften symmetrischen Leistung für die Beladung bzw. Entladung des Speichers, ist in diesem konkreten Beispiel eine Anlagenauslastung von maximal 84 % möglich.

In Bezug auf die Produktionskosten hat die Anlage in diesem Fall jedoch Überkapazitäten, die nicht dauerhaft genutzt werden könnten, was zu deutlich höheren Fixkosten führt.

Aufgrund der geringen Größe der Chlorspeicher können nur Lastreduktionen mit anschließender Kompensation im Anforderungsprofil 1 zum Anbieten von Flexibilität adressiert werden. Für die Berechnungen wurde von einem dynamischen Bereich von 75 % ±25 % der Speicherkapazität ausgegangen. Da nicht alle Standorte mit Chlorspeichern ausgerüstet sind, liegt das technische Potenzial niedriger als im Falle eines reinen Teillastbetriebs bei ungefähr +273 MW. Ebenso ist das eingeschränkte technische Potenzial mit +15 MW bis +61 MW geringer.

Wenn die durchschnittliche Auslastung mit einer Kompensation im Rahmen des Betrachtungszeitraums einer halben Schicht erfolgen kann, sind die Kosten gering und orientieren sich am Mehrbedarf elektrischer Energie für hohe Stromstärken. Im Falle einer Lastreduktion sind die Kosten vergleichbar mit denen, die im Falle eines Teillastbetriebs anfallen.

5.8.3 NUTZUNG VON EDC-SPEICHERN

In der PVC-Produktion wird Chlor mit Ethylen zu Ethylendichlorid (EDC) umgesetzt, welches gelagert werden kann. EDC wird darüber hinaus als eigenständige Substanz gehandelt, so dass eine reduzierte Menge von EDC aufgrund einer reduzierten Chlorproduktion aus der Chlor-Alkali Elektrolyse durch Zukauf und Lagerung von EDC ausgeglichen werden kann. Zugekauftes „Nass-EDC“ muss einen Trocknungsschritt durchlaufen, bevor es in der PVC-Produktion eingesetzt werden kann.

Die PVC-Standorte verfügen über eigene EDC Speicher, die als Puffer eingesetzt werden können und Flexibilitätsoptionen in allen Anforderungsprofilen für eine Lastreduktion der Chlor-Alkali Elektrolyse eröffnen.

Wenn die EDC-Speicherung als Energiespeicher betrachtet wird, entspricht eine Speicherung von 1.000 t EDC einer elektrischen Energiemenge zur Chlorproduktion von 1,8 GWh, bei 2,5 MWh/tCl₂. Eine Erweiterung bestehender EDC-Speicherkapazitäten ist prinzipiell denkbar. Die Kosten betragen hierfür 300 €/tEDC bis 400 €/tEDC. Umgerechnet auf die Investitionskosten der elektrischen Speicherkapazität würden dies 167 €/MWh bis 222 €/MWh bedeuten.

Die Versorgung der Folgeprozesse wird aus dem EDC-Tank übernommen und verläuft ungestört weiter. Die standortspezifische Tankgröße stellt hierbei den limitierenden Faktor dar. Aktuell benötigt die Organisation des Fremdbezuges von großen Mengen von EDC einen Vorlauf von mehreren Wochen. Zu beachten ist weiterhin, dass EDC aus dem Fremdbezug teurer ist, als aus der eigenen Produktion. Im Gegenzug reduzieren sich am Standort die Kosten für die Rohstoffe der EDC-Produktion und elektrische Energie, welche überkompensiert werden durch erhöhte Kosten für die externe Rohstoffzufuhr (EDC) und der Wegfall der Erlöse der Kuppelprodukte Natronlauge und Wasserstoff.

Die aktive Nutzung der EDC-Speicher zum Bereitstellen von Flexibilität führt zu einem theoretischen Potenzial von +276 MW und einem technischen Potenzial von +125 MW für die Lastreduktion und zu einem eingeschränkten technischen Potenzial von +54 MW bis +95 MW.

Die Gesamtkosten werden dominiert von dem Verzicht auf Erlöse (aus NaOH und H₂) und der Differenz zwischen Fremdbezugskosten und Eigenproduktion von EDC. Für das Anforderungsprofil 1 (365 Abrufe) werden für die Lastreduktion Kosten von 400 €/MWh bis 480 €/MWh abgeschätzt. Für die Anforderungsprofile 2 und 3 ergeben sich 200 €/MWh bis 250 €/MWh für die Lastreduktion bei 52 bzw. 12 Abrufen.

5.8.4 KAPAZITÄTserweiterung

Aufgrund der hohen durchschnittlichen Auslastung der Anlagen steht nur ein geringes Potenzial für eine positive Laständerung zur Verfügung. Eine Installation zusätzlicher Produktionskapazität ist daher eine mögliche Strategie, um mehr Flexibilität anbieten zu können. Da sich der Gesamtbedarf an den Produkten der Anlage nicht ändert, reduziert sich die durchschnittliche Auslastung und es verändern sich die Bedingungen für die Gewährung der individuellen Netzentgelte gemäß §19.2 Strom-NEV [13].

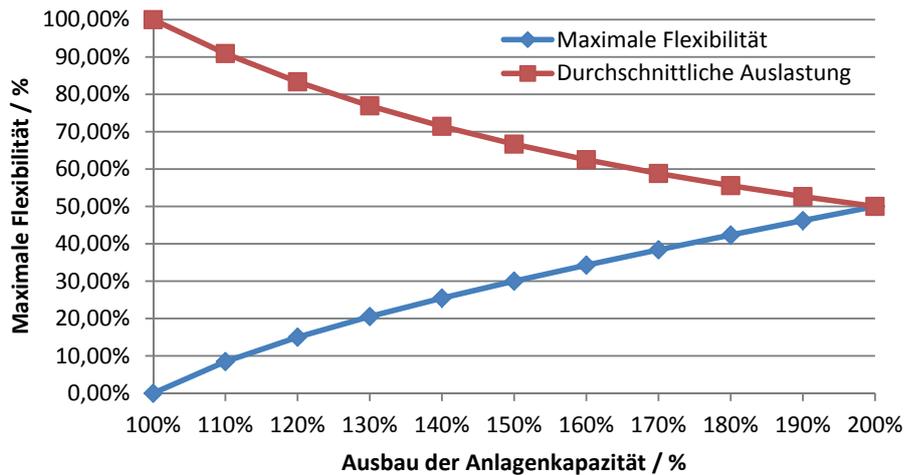
Eine Kapazitätserweiterung erhöht signifikant das Potenzial positiver Laständerungen, da die Differenz zwischen durchschnittlicher und maximaler Auslastung ansteigt. Allerdings geht die Erweiterung der Produktionskapazität mit signifikanten Investitionen einher, die mit 1.000 €/kW zusätzlicher installierter Leistung als untere Grenze abgeschätzt werden⁵. In der Modellierung wurde eine Erweiterung der Produktionskapazität von 10 % angenommen.

⁵ Dieser Wert umfasst die Installationskosten für die reine Elektrolyse. Die notwendigen Anpassungen der Peripherie sind hier nicht berücksichtigt, da diese sehr standortspezifisch sind. Die daraus abgeleiteten Zahlen sind als Abschätzung für eine untere Grenze zu verstehen und ersetzen keine standortspezifische betriebswirtschaftliche Kostenanalyse.

Auch eine erweiterte Kapazität ist durch die Rahmenbedingungen der Peripherie (z.B. Größe des Chlorspeichers) eingeschränkt. Daher sind ebenfalls nur Lastverschiebungen im Anforderungsprofil 1 möglich.

Dabei ist zu beachten, dass wie auch in den anderen Betrachtungen die Flexibilität der Elektrolyse sich in dem dynamischen Bereich von 50–100 % der Produktionskapazität der installierten Elektrolysezellen abspielt. Umgekehrt bedeutet dies, dass mit einem Zubau an Produktionskapazität die durchschnittliche Auslastung der Elektrolysezellen sinkt, vgl. Abbildung 5.12.

Abbildung 5.12: Effekt eines Kapazitätsausbaus auf die maximale Flexibilität und die durchschnittliche Auslastung



Als zusätzliche Kostenposition fallen dominant die Investitionskosten im Umfang von ca. 1000 €/kW zusätzlicher installierter Leistung für die Erweiterung der Elektrolysekapazität an. Diese Investition muss sich im Rahmen der üblichen Abschreibungszeiträume durch die Flexibilitätsabrufe amortisieren, da nicht von einem erhöhten Bedarf an Chlor auszugehen ist. Darüber hinaus ist von einer Änderung der individuellen Netzentgelte auszugehen, da die maximale Last ansteigt, aber die benötigte elektrische Energie praktisch konstant bleibt. Dagegen fallen die Kosten für den geringen zusätzlichen elektrischen Energiebedarf nicht ins Gewicht.

Eine 10 % Erweiterung der bestehenden Chlor-Alkali Produktionskapazität würde zu einem deutschlandweiten technischen Potenzials von +255 MW bis -106 MW führen. Das eingeschränkte technische Potenzial liegt bei +76 MW bis +194 MW für die Lastreduktion, bzw. bei -25 MW bis -88 MW für die Lasterhöhung. Die Kosten werden von den Kapitalkosten der Investition dominiert und betragen bei 365 Abrufen pro Jahr 2.500 €/MWh bis 2.800 €/MWh für die Lasterhöhung bzw. 1.200 €/MWh bis 1.800 €/MWh für die Lastreduktion. Eine höhere Anzahl von Abrufen führt zu geringeren spezifischen Kosten, eine geringere Anzahl zu höheren spezifischen Kosten.

5.8.5 VIRTUELLES KRAFTWERK

Die Kombination einer Chlor-Alkali Elektrolyse mit einem Batteriespeicher in Reihe geschaltet ergibt in der Funktion ein virtuelles Kraftwerk, bei der die Batterie die Lastwechsel des sehr schnell verfügbaren Kondensat-Anstaus und die Elektrolyse die Kesselfeuerungsanlage eines Kraftwerks ersetzt. Die Batterie bietet ein zusätzliches Potenzial für positive wie negative Laständerungen, das mit der Elektrolyse kombiniert werden kann. Als Betriebsstrategie liefert die Batterie einen Großteil der Flexibilität, eingeschränkt durch ihre Speicherkapazität. Die Elektrolyse hingegen wird nur in einem begrenzten Umfang eingeschränkt.

Ein Betriebsmodus kann die Bereitstellung möglichst konstanter Produktion unter Ausnutzung von Strompreisunterschieden sein. In diesem Fall agiert die Batterie als ein Puffer gegenüber dem Stromnetz und kann im Falle von hohen Strompreisen den Bezug reduzieren und sich entladen, um die Chlor-Alkali Elektrolyse zumindest teilweise zu versorgen, bzw. im Falle von niedrigen Strompreisen sich aufladen bei gleichzeitiger Versorgung der Chlor-Alkali Elektrolyse über das Stromnetz.

Ein anderer möglicher Betriebsmodus zielt auf die Bereitstellung maximaler Flexibilität ab. In Kombination mit der Chlor-Alkali Elektrolyse, die unter Volllast läuft, kann damit auch zusätzliche Last abgefragt werden, und zwar in dem Umfang der installierten Leistung des Batteriespeichers. Umgekehrt kann auch eine entsprechend erhöhte Lastreduktion erfolgen. Aufgrund der geringen Speicherkapazität von Batteriespeichern gegenüber dem Energiegehalt der Produkte der Chlor-Alkali Elektrolyse, bietet sich diese Erhöhung der Flexibilität nur für kurze Anforderungszeiträume an. Sein wesentlicher Vorteil ist das Anbieten einer größeren Lastdifferenz und damit das Abfangen kurzer, hoher Spitzen durch die Kombination des Batteriespeichers mit der Chlor-Alkali Elektrolyse.

Der in Schwerin installierte kommerzielle Stromspeicher auf Li-Ionen Basis hatte Investitionskosten von 12 Mio. Euro, eine installierte Leistung von 10 MW und eine Speicherkapazität von 15 MWh [18], was einer Produktion von ungefähr 6 Tonnen Chlor entspricht, also rund 20 min Volllastproduktion in der Referenzanlage. Die elektrochemische Speicherkapazität der Batterie ist daher klein im Vergleich zum Energiegehalt der Produkte und kann eine längerfristige Laständerung ohne Beeinträchtigung der Produktion nicht ermöglichen.

Eine andere Alternative können Redox-Flow Batterien darstellen. In Dalian, China wird aktuell ein auf Vanadium basierende Redox-Flow Speicher mit einer Leistung von 200 MW und 800 MWh Speicherkapazität installiert [19], was rund 16 Stunden der Produktion in der Referenzanlage entspricht.

Das virtuelle Kraftwerk kann ebenfalls nur Lastverschiebungen im Anforderungsprofil 1 anbieten. Alle möglichen Betriebsmodi werden durch die Anforderungen von §19.2 der Netzentgeltverordnung (StromNEV) beschränkt [13]. Für die Batterie fallen zusätzliche Investitionskosten an. Im Gegensatz zu diesen Positionen spielt der zusätzliche elektrische Energiebedarf, hier auch unter Berücksichtigung der Zykleneffizienz der Batterie eine untergeordnete Rolle.

Eine Installation von zusätzlichen elektrochemischen Speichern zum Anbieten von Flexibilität in Kombination mit der Chlor-Alkali Elektrolyse im Umfang von 10 % der jeweiligen Leistung der Chlor-Alkali Anlage führt zu einem technischen Potenzial von -150 MW für die Lasterhöhung und +358 MW für die Lastreduktion. Das eingeschränkte technische Potenzial liegt zwischen -28 MW und -119 MW für die Lasterhöhung und +82 MW bis +252 MW für die Lastreduktion. Die dominierenden Kostenbeiträge stammen von den Kapitalkosten der Li-Ionen Batterie. Die Kosten werden bei 365 Abrufen im Jahr insgesamt auf rund 3.600 €/MWh bis 3700 €/MWh für die Lasterhöhung und 1.100 €/MWh bis 2.000 €/MWh für die Lastreduktion abgeschätzt.

5.8.6 SCHALTBARE SAUERSTOFFVERZEHRKATHODE

Die schaltbare Sauerstoffverzehrkathode ermöglicht im Membran-Verfahren die Kathode zwischen einem regulären Betriebszustand unter Wasserstoffproduktion, mit höherem Bedarf an elektrischer Energie, und einem Sauerstoffverzehrmodus ohne Wasserstoffproduktion und mit 15 % reduziertem elektrischen Energiebedarf, hin- und herzuwechseln.

Da die Chlorproduktion durch den Wechsel nicht beeinflusst wird, können damit im Prinzip auch die Anforderungsprofile 2 und 3 adressiert werden. Am Standort variiert dann allerdings die Wasserstoffproduktion durch die Chlor-Alkali Elektrolyse. Es ist davon auszugehen, dass eine Ertüchtigung der Elektroden nur in dem Maße erfolgen kann, in dem die Wasserstoffversorgung am Standort nicht gefährdet wird. Wenn also 50 % des standortspezifischen Wasserstoffbedarfs durch die Chlor-Alkali Elektrolyse gedeckt wird, kann erwartet werden, dass eine entsprechende Anzahl an „normalen“ Membran-Elektrolyseuren am Standort verbleibt. Nur die darüber hinausgehenden Elektrolyseure werden mit schaltbaren Sauerstoffverzehrkathoden ausgestattet.

Die meisten Standorte der Chlor-Alkali Elektrolyse weisen einen Wasserstoffüberschuss auf. Je nach Standort wird Wasserstoff unterschiedlich verwendet und weiterverarbeitet. Dabei kommt folgende Hierarchie zum Einsatz:

1. Nutzung von Wasserstoff am Standort zur chemischen Umsetzung in Prozessen
2. Verkauf von Wasserstoff als Industriegas an externe Nutzer
3. Nutzung des Energiegehaltes des Wasserstoffs am Standort
 - a. zur kalorischen Umsetzung (z.B. als Erdgasersatz) in Prozessen
 - b. zur thermischen oder elektrischen Energieerzeugung (z.B. als Erdgasersatz)

Die Punkte 1 und 2 bedingen unverzichtbar eine gesicherte Versorgung mit Wasserstoff, während im Punkt 3 Wasserstoff als Substitut für Erdgas genutzt wird. Der Wasserstoff fällt im Normalbetrieb der Chlor-Alkali Elektrolyse an und seine Nutzung im Punkt 3 reduziert die CO₂-Bilanz und den Erdgasbedarf des Standortes. Eine energetische Nutzung des elektrolytisch erzeugten Wasserstoffs ist nicht energieeffizient, kann sich aber, abhängig von den Bilanzierungsgrenzen, im Sinne der CO₂-Belastung für den Standort lohnen.

In der Abschätzung wurde angenommen, dass die Standorte zu 50 % (bezogen auf die Chlor-Produktionskapazität) weiter die regulären Membran-Elektrolyseure betrieben und die verbliebenen 50 % der Produktionskapazität mit schaltbaren Sauerstoffverzehrkathoden ausgestattet sind. Als normaler Betriebszustand wurde angenommen, dass jeweils die Hälfte der Sauerstoffverzehrelektroden im dem normalen Betriebsmodus und die Hälfte im Sauerstoffverzehrmodus betrieben werden, was einer Maximierung der Flexibilität gleichkommt. Dieser Wechsel in der Anlagenkonfiguration führt zu einer symmetrischen Flexibilitätsoption für Lasterhöhung und -reduktion.

Die schaltbare Sauerstoffverzehrkathode entspricht einer zusätzlichen Investition im Umfang von rund 200 €/kW, die durch das Flexibilitätsangebot amortisiert werden muss. Der wesentliche Vorteil eines Einsatzes der Sauerstoffverzehrkathode für eine Flexibilisierung der Chlor-Alkali Elektrolyse liegt darin, dass die Chlorproduktion durch die Flexibilität nicht beeinflusst wird.

Die schaltbare Sauerstoffverzehrkathode kann alle Anforderungsprofile mit Lasterhöhungen und Lastreduktionen adressieren. Die Kosten werden von den Investitionskosten dominiert. Auch die Differenz der benötigten elektrischen Energie wird eine relevante Größe für die Kostenabschätzung. Im Falle von Lastreduktionen ist von einer Veränderung der Bedingungen für individuelle Netzentgelte nach §19 Abs. 2 StromNEV auszugehen [13]. Die Änderung der Erlöse beschränkt sich auf den Wasserstoff und ist damit von untergeordneter Bedeutung, wenn auch nicht vernachlässigbar.

Bei einem vollständigen Umrüsten der Membran-Standorte auf die schaltbare Sauerstoffverzehrkathode ergäbe sich ein technisches Potenzial von -32 MW für die Lasterhöhung und +32 MW für die Lastreduktion. Das eingeschränkte technische Potenzial liegt zwischen -8 MW und -27 MW für die Lasterhöhung und +8 MW bis +27 MW für die Lastreduktion.

Die Gesamtkosten werden dominiert von den Investitionskosten und mit 3.600 €/MWh für die Lasterhöhung und 3.800 €/MWh im Anforderungsprofil 1 (365 Abrufe) abgeschätzt. Für die Anforderungsprofile 2 (52 Abrufe) und 3 (12 Abrufe) ergeben sich 770 €/MWh und 350 €/MWh für die Lasterhöhung und 860 €/MWh bzw. 440 €/MWh für die Lastreduktion.

5.8.7 ERGEBNISSE

Die Chlor-Alkali Elektrolyse ist der Prozess der chemischen Industrie mit dem höchsten Stromverbrauch. Das theoretische Flexibilitätspotenzial entspricht der installierten Leistung (ohne Nebenaggregate). Allerdings ist einfaches Ein- und Ausschalten der Anlagen nicht zielführend. Die Anlagen werden betrieben um die Produkte für die Weiterverarbeitung in chemischen Verbundstandorten bereitzustellen und damit die entsprechenden Wertschöpfungsketten zu sichern.

Während eine Lasterhöhung aufgrund der hohen durchschnittlichen Auslastung kaum möglich ist, sind Lastreduktionen technisch machbar, führen jedoch zu einem Produktionsausfall, mit den entsprechenden Auswirkungen auf die angegliederten Folgeprozesse.

Die aktuellen Flexibilitätspotenziale, für Lastreduktionen, ergeben sich aus einem möglichen Teillastbetrieb der Anlage, ggfs. gepuffert durch vorhandene Chlorspeicher. Diese Potenziale stehen realistischer Weise nur für das Anforderungsprofil 1 (Dauer: 15 min.) zur Verfügung, da ein längerer Teillastbetrieb unweigerlich die Versorgung des Standortes gefährdet. Die Kosten werden durch den Wegfall der Produkterlöse dominiert und müssten konsequenter Weise standortspezifisch auf die Änderung innerhalb der gesamten Wertschöpfungskette bezogen werden, was in der Komplexität den Rahmen dieser Studie sprengen würde.

Eine Sonderrolle bei den verfügbaren Potenzialen ist die Nutzung von EDC-Speichern in der PVC-Produktion. Prinzipiell ist hier eine Nutzung für eine Lastreduktion in allen Anforderungsprofilen denkbar. Die Begrenzung durch die Größe des EDC-Speichers ist nicht limitierend, wenn das EDC extern bezogen werden kann. Die Kosten werden dominiert durch die Zusatzkosten für den Fremdbezug von EDC im Gegensatz zur Eigenproduktion.

Die Potenziale für Lastreduktionen führen in ihrer Anwendung zu einem reduzierten Bezug von elektrischer Energie und damit ggfs. zu einer Änderung der individuellen Netzentgelte gemäß §19 Abs. 2 StromNEV [13], was einen erheblichen Kostenfaktor darstellen kann.

Als zukünftige Flexibilitätsoptionen stehen mit der Installation von Überkapazitäten und dem virtuellen Kraftwerk Perspektiven zur Verfügung, die sowohl die mögliche Lastreduktion als auch Lasterhöhungen anbieten können. Im Falle der Überkapazitäten sind diese aber durch die Abnahmekapazität der Folgeprozesse beschränkt. Daher werden für beide Optionen ebenfalls nur Anwendungsmöglichkeiten im Anforderungsprofil 1 gesehen.

Die schaltbare Sauerstoffverzehrelektrode bietet, je nach Betriebsstrategie, eine symmetrische Flexibilitätsperspektive, begrenzt durch den Wasserstoffbedarf am Standort. Sie kann im Prinzip sämtliche Anforderungsprofile adressieren.

Für alle dargestellten Flexibilitätsperspektiven fallen zusätzliche Investitionskosten in erheblichem Umfang an, die über die Flexibilitätsabrufe amortisiert werden müssen. Daher sind die spezifischen Abrufkosten stark abhängig von der Anzahl der zu erwartenden Abrufe.

Aufgrund der Schwankungen der abgerufenen Last ist bei den Flexibilitätsperspektiven ebenfalls von einer Änderung der individuellen Netzentgelte gemäß §19.2 [13] auszugehen.

Insgesamt sind aktuell Potenziale für Lastreduktion durch Teillastbetrieb denkbar, jedoch nicht im Interesse der Unternehmen, da sie damit ihre Kundenbeziehung gefährden. Die aktive Nutzung der Chlorspeicher ist stark von den standortspezifischen Gegebenheiten abhängig und setzt voraus, dass die entfallene Produktion nachgeholt wird. Die Nutzung von EDC als speicherbares und extern beziehbares Zwischenprodukt bietet das Flexibilitätspotenzial mit der geringsten Beeinträchtigung der Folgeprozesse.

Von den möglichen Flexibilitätsperspektiven führt der Einsatz von Überkapazitäten zwar formal zu den Möglichkeiten einer Lasterhöhung, die jedoch von den Folgeprozessen verarbeitbar sein muss. Ansonsten gelten die gleichen Randbedingungen wie für den Teillastbetrieb. Der Einsatz einer vorgeschalteten Batterie führt zu Flexibilität in beide Richtungen, es sind Lasterhöhungen und -reduktionen möglich. Aufgrund der geringen Stromspeicherkapazität der Batterie im Vergleich zur Energiedichte der Elektrolyse-Produkte können nur kurze Abrufe adressiert werden. Die Frage, ob der Vorteil einer Kombination der Batterie mit der Elektrolyse gegenüber einer isolierten Installation der Batterie als Netzdienstleistung ausreichend ist, ist nicht untersucht worden. Die schaltbare Sauerstoffverzehrkathode bietet eine symmetrische Lasterhöhungs- und Lastreduktionsperspektive und verändert die Chlorproduktion durch die Flexibilitätsabrufe nicht, womit die Folgeprozesse unverändert betrieben werden können.

In Tabelle 5.3 werden die unterschiedlichen Flexibilitätspotenziale und -perspektiven für die Chlor-Alkali Elektrolyse in Deutschland als Laständerungen in den Anforderungsprofilen ausgewiesen. Tabelle 5.4 weist die Kosten gemäß der durchgeführten Abschätzung für die Anforderungsprofile und eine jeweils angenommene Abrufanzahl aus.

Maßnahme	Verfahren	Regelleistung	Theoretisches Potenzial ⁷	Auslastung
Anforderungsprofil			MW	%
Teillast	alle	Lasterhöhung	-16	>=95 %
		Lastreduktion	+1292	>=95 %
Chlorspeicher	Membran	Lasterhöhung	-11	>=95 %
		Lastreduktion	+911	>=95 %
EDC-Speicher	Membran (PVC)	Lasterhöhung	-	>=95 %
		Lastreduktion	+276	>=95 %
Kapazitätserhöhung	Membran	Lasterhöhung	-	>=95 %
		Lastreduktion	-	>=95 %
Virtuelles Kraftwerk	alle	Lasterhöhung	-	>=95 %
		Lastreduktion	-	>=95 %
Schaltbare	Membran	Lasterhöhung	-	>=95 %
		Lastreduktion	-	>=95 %

Tabelle 5.3: Übersicht der Flexibilitätspotenziale und -perspektiven (orange Schrift) der Chlor-Alkali Elektrolyse in Deutschland

⁷ Differenz zwischen durchschnittlich ausgelasteter und abgeschalteter Anlage bzw. Vollast.

Maßnahme	Verfahren	Regelleistung
Anforderungsprofil		
# Abrufe pro Jahr		
Auslastung (nur Lastverschiebung)	alle	Lasterhöhung
		Lastreduktion
Chlorspeicher (nur Lastverschiebung)	Membran	Lasterhöhung
		Lastreduktion
EDC-Speicher	Membran (PVC)	Lasterhöhung
		Lastreduktion
Kapazitätserhöhung (nur Lastverschiebung)	Membran	Lasterhöhung
		Lastreduktion
Virtuelles Kraftwerk (nur Lastverschiebung)	alle	Lasterhöhung
		Lastreduktion
Schaltbare Sauerstoffverzehrkathode	Membran	Lasterhöhung
		Lastreduktion

Tabelle 5.4: Abgeschätzte Kosten für die Flexibilitätspotenziale und -perspektiven (orange Schrift) in den verschiedenen Anforderungsprofilen. In Klammern die Kostenabschätzung für die Referenzanlage Darstellung des Effekts der Flexibilitätsoptionen und -perspektiven der Chlor-Alkali Elektrolyse in Deutschland.

Technisches Potenzial / Perspektive (gegenüber durchschnittlicher Auslastung)			Eingeschränktes technisches Potenzial / Perspektive unter Berücksichtigung von 50 % Verfügbarkeit ⁸		
MW	MW	MW	MW	MW	MW
1	2	3	1	2	3
-16 In der Regel nicht verfügbar	-	-	-4 bis -13 In der Regel nicht verfügbar	-	-
+443	-	-	+21 bis +95		
-11 In der Regel nicht verfügbar	-	-	-3 bis -10 In der Regel nicht verfügbar	-	-
+273	-	-	+15 bis +61	-	-
-	-	-	-	-	-
+125	+125	+125	+54 bis +95	+54 bis +95	+54 bis +95
-106	-	-	-25 bis -88		
+255	-	-	+76 bis +194		
-150	-	-	-28 bis -119		
+358	-	-	+82 bis +252		
-32	-32	-32	+8 bis -27	-8 bis -27	-8 bis -27
+32	+32	+32	+8 bis +27	+8 bis +27	+8 bis +27

⁸ Lastverschiebung muss innerhalb von einer halben Schicht 4 h (inklusive Abrufdauer) wieder kompensiert sein, Rampe jeweils 0,25 h, d.h. Verhältnis $x_2 \leq 6x_1$.
Es wird von einer betriebsbedingten Verfügbarkeit der Hälfte der Anlagen ausgegangen.

Geschätzte Kosten für Flexibilitätsmaßnahmen		
€/MWh	€/MWh	€/MWh
1	2	3
365 à 15 Minuten	52 à 8 Stunden	12 à 72 Stunden
In der Regel nicht verfügbar	Nicht verfügbar	Nicht verfügbar
230 bis 600 (535)	Nicht verfügbar	Nicht verfügbar
In der Regel nicht verfügbar	Nicht verfügbar	Nicht verfügbar
300 bis 560 (535)	Nicht verfügbar	Nicht verfügbar
In der Regel nicht verfügbar	Nicht verfügbar	Nicht verfügbar
400 bis 480 (425)	200 bis 250 (220)	200 bis 250 (220)
2.500 bis 2.800 (2.590)	Nicht verfügbar	Nicht verfügbar
1.200 bis 1.800 (1.390)	Nicht verfügbar	Nicht verfügbar
3.600 bis 3.700 (3.675)	Nicht verfügbar	Nicht verfügbar
1.100 bis 2.000 (1.230)	Nicht verfügbar	Nicht verfügbar
3.640 (3.640)	770 (770)	350 (350)
3.815 (3.815)	865 (865)	440 (440)

5.9 DARSTELLUNG DES EFFEKTS DER FLEXIBILITÄTSOPTIONEN UND -PERSPEKTIVEN DER CHLOR-ALKALI ELEKTROLYSE IN DEUTSCHLAND

Die Angabe einer aggregierten Zahl für das Flexibilitätspotenzial oder die -perspektive ist unzureichend für eine abschließende Bewertung im Sinne des Beitrages zu dem aktuellen und zukünftigen Stromsystem.

Ein Flexibilitätsbedarf kann aus verschiedenen Gründen auftreten:

1. Sehr hoher Eintrag an erneuerbarer Stromerzeugung im Gesamtsystem, ohne dass ausreichend Abnehmer zur Verfügung stehen. (Lasterhöhung)
2. Sehr geringer Eintrag an erneuerbarer Stromerzeugung im Gesamtsystem, der auch nicht durch konventionelle Erzeugung kompensiert wird. (Lastreduktion)
3. Sehr hoher lokaler Eintrag an erneuerbarer Stromerzeugung, ohne dass ausreichend lokale Abnehmer oder Transportmöglichkeiten zur Verfügung stehen. (Lasterhöhung)
4. Sehr geringer lokaler Eintrag an erneuerbarer Stromerzeugung, ohne dass ein lokaler Ausgleich durch konventionelle Erzeugung möglich ist. (Lastreduktion)

Die ersten beiden Punkte setzen ausreichende Netzkapazitäten voraus, während die letzten beiden Punkte durch die nicht vorhandenen Netzkapazitäten entstehen. Da die Chlor-Produktion sich an dem Bedarf der Folgeprozess orientiert, ist eine Lasterhöhung (Punkte 1. und 3.) nur sinnvoll, wenn die zusätzliche Produktion weiterverarbeitet werden kann. Lastreduktionen hingegen, sind mit Produktionsausfall verbunden und müssen kompensiert werden. Aufgrund der Netzausbaupläne und des geplanten Ausbaus erneuerbarer Stromerzeugung ist davon auszugehen, dass die Situationen „lokale Engpässe“ oder „lokale Überschüsse“ auch absehbar mittelfristig den Flexibilitätsbedarf definieren werden.

Es ist daher relevant, wo sich der Flexibilitätsanbieter in Bezug auf den Flexibilitätsbedarf räumlich befindet. Ein Flexibilitätsbedarf an der Küste kann nicht im Oberbayrischen kompensiert werden. Die folgende Abbildung 5.13 zeigt die Standorte der Chlor-Alkali Elektrolyse in Deutschland und ihre Produktionskapazitäten, hinterlegt mit den aktuellen Stromnetzstrukturen im Höchst- und Hochspannungsbereich. Der größte Standort ist DOW in Stade, während sich die anderen Standorte in Nordrhein-Westfalen konzentrieren. Darüber hinaus verfügen Chemieparks in Mitteldeutschland sowie in Hessen und Rheinland-Pfalz über Anlagen. Alle Standorte sind an das bestehende Höchst- (380 kV) oder Hochspannungsnetz (220 kV) angebunden.

Die absehbaren Schwerpunkte der Erzeugung von erneuerbarem Strom liegen an den Küsten im Norden für Windkraft und im Süden für Photovoltaik. Die Zentren der Chlor-Alkali Elektrolyse liegen nicht in unmittelbarer Nähe der erneuerbaren Stromerzeugung und können damit nur einen eingeschränkten Beitrag im Sinne der Flexibilität leisten.

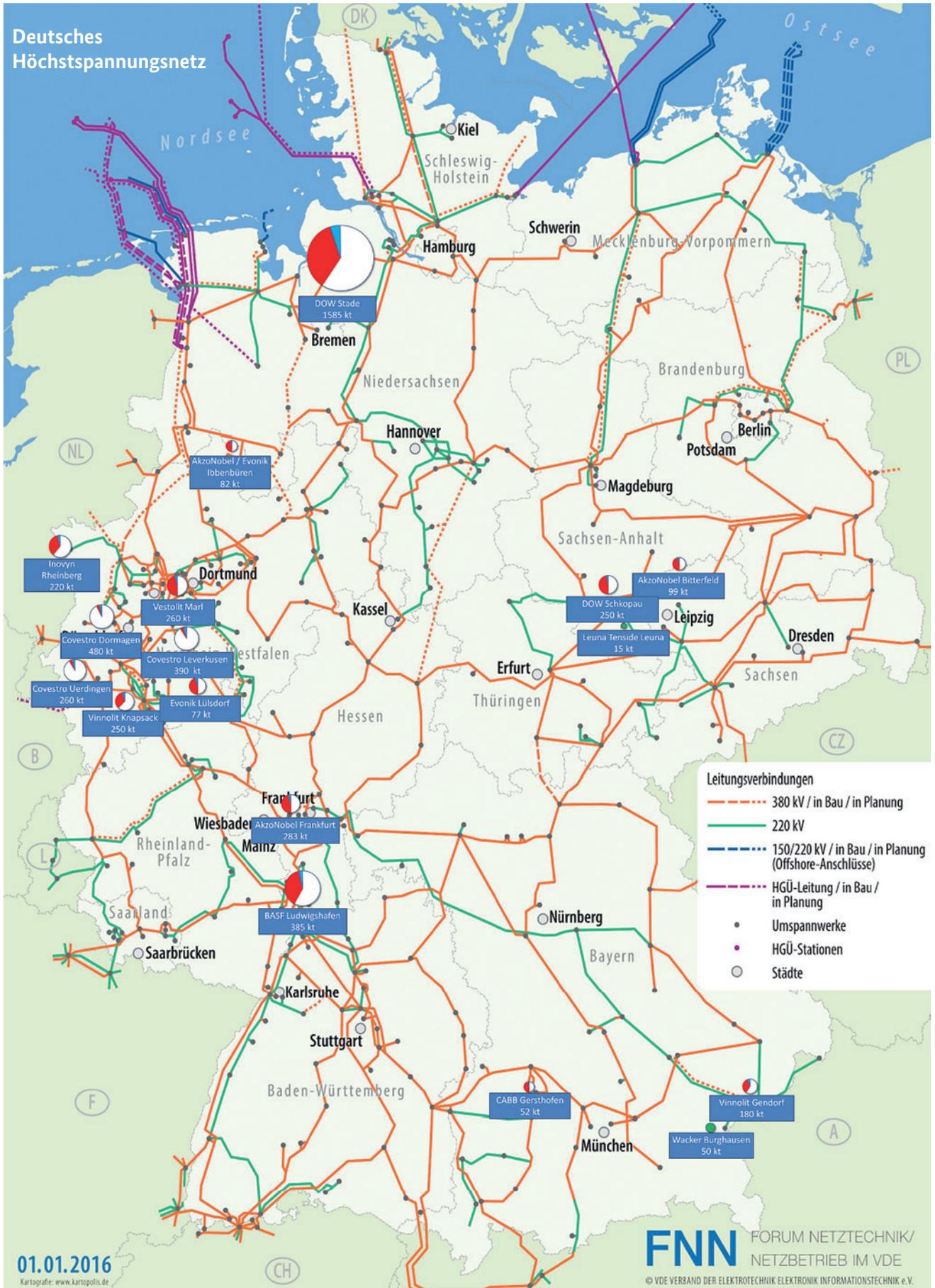


Abbildung 5.13: Standorte und technisches Teillastpotenzial für eine Auslastung von 95 % der Chlor-Alkali Elektrolyse in Deutschland, hinterlegt mit den aktuellen Stromnetzstrukturen [20]. Für die grün eingefärbten Standorte liegen keine Daten vor.

5.10 ZUSAMMENFASSUNG

Die Chlor-Alkali Elektrolyse stellt die Versorgung von Chlor und der Koppelprodukte für die Folgeprozesse an den Chemie Standorten sicher. Sie ist die Grundlage für die auf Chlor beruhenden Prozess- und Wertschöpfungsketten. Die Weiterverarbeitung ist sehr standortspezifisch. Die Flexibilität der Anlagen ist technisch nach unten (Lastreduktion) auf die minimale Teillast beschränkt und nach oben (Lasterhöhung) durch die maximale Last. Der Betrieb erfolgt mit sehr hoher Auslastung (>95 %), womit Lasterhöhungen als Flexibilitätspotenzial praktisch nicht vorhanden sind.

Eine Lastreduktion führt zu einem Produktionsverlust, während eine Lasterhöhung eine ausreichende Kapazität in den Folgeprozessen zur Weiterverarbeitung voraussetzt, da eine Chlorspeicherung nur in geringen Mengen erfolgt. Eine Ausnahme bildet die PVC-Produktion, in der mit EDC ein speicherbares und handelbares Zwischenprodukt entsteht, welches die Folgeprozesse (nach EDC) von der Chlor-Alkali Elektrolyse entkoppelt.

Denkbare Flexibilitätsperspektiven sind die Installation von Überkapazitäten, die Verknüpfung mit einer Batterie zu einem virtuellen Kraftwerk und die Nutzung schaltbarer Sauerstoffverzehrkathoden im Membran-Verfahren.

Die möglichen Flexibilitätspotenziale und -perspektiven sind mit nicht vernachlässigbaren Zusatzkosten für die Unternehmen verbunden, die durch die Flexibilitätsmaßnahmen mindestens abgedeckt werden müssen, um das Anbieten von Flexibilität aus Sicht der Unternehmen betriebswirtschaftlich zu ermöglichen. Die Kosten sind dabei sehr standortspezifisch und müssen die folgenden Wertschöpfungsketten berücksichtigen.

Die Priorität der Unternehmen liegt in der Herstellung und Belieferung der Kunden mit den jeweiligen Produkten. Auch eine attraktive Vergütung der Flexibilitätsmaßnahme darf nicht zu einer Gefährdung der Kundenbeziehung führen.

Der mögliche Beitrag der Chlor-Alkali Elektrolyse durch Anbieten von Flexibilität zur Stabilität des Stromnetzes wird durch die räumliche Verteilung der Standorte eingeschränkt. Daher sind die ausgewiesenen technischen Flexibilitätspotenziale und -perspektiven nur eine aggregierte Information. Eine umfassende Bewertung des Beitrages setzt eine räumlich aufgelöste Analyse der sich im Laufe der Zeit verändernden Flexibilitätsanforderungen voraus.

5.11 AUSBLICK

Die Chlor-Alkali Elektrolyse hat ein höheres Potenzial für die Bereitstellung von Flexibilitätsdienstleistungen als gegenwärtig genutzt wird. Das Anbieten von Flexibilität oder anderen energiewirtschaftlichen Dienstleistungen durch die Chlor-Alkali Elektrolyse ist jedoch immer der termin- und spezifikationsgerechten Belieferung der Kunden mit den Produkten nachgeordnet.

Neben den Möglichkeiten, die sich durch die Implementierung der hier beschriebenen Technologien und weiterer Innovationen auf tun, sind auch noch einige Herausforderungen zu adressieren:

- Das Anbieten von Flexibilität muss für die beteiligten Unternehmen wirtschaftlich sein.
- Das Primat der betrieblichen Erfordernisse vor energiewirtschaftlichen Dienstleistungen muss sichergestellt sein, z.B. über das Pooling von Flexibilitätsoptionen bei Aggregatoren.
- Das Verhalten und die Lebensdauer von Anlagen und Anlagenkomponenten unter der Bedingung häufiger Lastwechsel sind noch nicht ausreichend untersucht [21]. Dieser Aspekt sollte im Rahmen von F&E-Projekten unter direkter Beteiligung der Anlagenbetreiber und Anlagen- bzw. Komponentenhersteller adressiert werden.
- Der Einfluss von häufigen Lastwechseln auf Produktqualitäten ist noch nicht ausreichend bekannt. Ggfs. sind zusätzliche Investitionen für Aufreinigungs- und Abtrennungsprozesse erforderlich. Diese Fragestellungen können nur standortspezifisch beantwortet werden.
- Die (zunehmende) Notwendigkeit der Flexibilitätsbereitstellung ist in dem gegenwärtigen Regulierungswerk nur unzureichend abgebildet. Lediglich die noch recht junge AbLaV berücksichtigt dies in ausreichendem Maße indem durch die Bereitstellung von Flexibilität ausgelöste Minderungen der Vollbenutzungsstunden nicht berücksichtigt werden. Insbesondere §19 Abs. 2 der StromNEV [13] fördert zur Netzstabilisierung einen möglichst konstanten Betrieb der Anlagen, was in entsprechend neu zu formulierende Ausnahmeregelungen bei den verschiedenen Flexibilisierungsinstrumenten (siehe AbLaV) Berücksichtigung finden muss. Hohe Kosten für Lastspitzen werden durch aktives Lastspitzenmanagement vermieden. Ein zukünftig flexibleres System müsste einen anderen, systemdienlicheren Pfad eröffnen.
- Investitionen zur Bereitstellung von zusätzlichen Flexibilitätsperspektiven benötigen einen Rahmen, in dem sich die Investition betriebswirtschaftlich sinnvoll darstellen lässt.

Die Chlor-Alkali Elektrolyse wird aufgrund ihrer Bedeutung in der Grundstoffchemie auch weiterhin eine wichtige Rolle spielen. Als strombasierter Prozess wird sie auf die kommenden Veränderungen des Stromsystems reagieren müssen und bietet Möglichkeiten, sich konstruktiv, im Sinne einer Stabilisierung des Stromnetzes durch Bereitstellung von Flexibilität, einzubringen. Damit leistet sie einen Beitrag zur Sicherheit der zukünftigen Energieversorgung und zur Zukunft des Industriestandortes Deutschlands, auch für energieintensive Industrien.

5.12 ANHANG

5.12.1 GRUNDLAGEN DER BERECHNUNGEN

Die Berechnungen wurden auf Basis von vertraulichen Anlagendaten der Betreiber durchgeführt. Neben den anlagenspezifischen Daten wurden allgemeine Parameter verwendet. Um eine Transparenz der Vorgehensweise und der ermittelten Kosten sicherzustellen, wurden die Kosten ebenfalls für eine imaginäre Referenzanlage errechnet. Die allgemeinen Parameter und die Annahmen für die Referenzanlage sind in den folgenden Unterkapiteln dargestellt.

5.12.2 VERWENDETE PARAMETER

Tabelle 5.5 stellt die für die Modellierungen und Kostenabschätzungen verwendeten Parameter dar.

Tabelle 5.5: Übersicht über die verwendeten Parameter

Parameter	Wert	Einheit	Anmerkungen
Abrufdauer (Anforderungsprofil 1)	0,25	h	Schnelle Variation
Abrufdauer (Anforderungsprofil 2)	8	h	Tageszeitliche Variation
Abrufdauer (Anforderungsprofil 3)	72	h	Dunkle Flaute
Abrufhäufigkeit (Anforderungsprofil 1)	365	#	Schnelle Variation
Abrufhäufigkeit (Anforderungsprofil 2)	52	#	Tageszeitliche Variation
Abrufhäufigkeit (Anforderungsprofil 3)	12	#	Dunkle Flaute
Rampenzeit	0,25	h	Pro Rampe
Durchschnittliche Auslastung	95	%	Bezogen auf Gesamtproduktionskapazität
Wartung	336	h	2-wöchiges Wartungs- und Reparaturintervall
Verlauf des spezifischen elektrischen Energiebedarfs der Elektrolyse	b=0,20486 a=0,79514	Y=bx+a	[4]
Netzentgelte	>8.000 h = 10 % >7.500 h = 15 % >7.000 h = 20 % <7.000 h = 100 %	%	Auf Basis §19 Abs. 2 StromNEV, Annahme: 40.000 €/MWaw
Investitionskosten Kapazität	1.000	€/kW	
Investitionskosten SVK	200	€/kW	
Abschreibungszeitraum	5	a	
Zinssatz	10	%	
Stromkosten (Arbeitspreis)	40	€/MWh	
Chlorspeicher Gesamtkapazität	24 h Produktion	tCl ₂	Wenn Größe unbekannt
Chlorspeicher Flexibilität	6 h Flexibilität	tCl ₂	25 % wenn Größe bekannt
EDC-Speicher Gesamtkapazität	72	h	
EDC-Speicher Flexibilität	25	%	
Marktpreise			
Chlor (Cl ₂)	90	€/t	
Natronlauge (Trockengewicht)	350	€/t	
Wasserstoff (H ₂)	1.000	€/t	Entspricht Gaspreis bezogen auf den unteren Heizwert
Gesamtwert ECU	513	€/t Cl ₂	Pro produzierte Tonne Chlor
Ethylendichlorid (EDC)	410	€/t	
PVC	790	€/t	
Gesamtwert PVC	1.120	€/t Cl ₂	Pro produzierte Tonne Chlor
Steinsalz (NaCl)	40	€/t	
Ethylen	920	€/t	
Vinylchlorid	550	€/t	

5.12.3 REFERENZANLAGE CHLOR-ALKALI ELEKTROLYSE

Für die Beispielrechnungen in diesem Kapitel wird eine Referenzanlage für die Chlor-Alkali Elektrolyse zugrunde gelegt. Diese Anlage ist idealisiert und entspricht keiner realen Anlage. Ihr Zweck ist es, die Größenordnung und die Auswirkungen von Flexibilitätsoptionen und -perspektiven abzuschätzen. Die verwendeten Parameter zur Beschreibung der Referenzanlage sind in Tabelle 5.6 zusammengefasst.

Parameter	Größe	Einheit	Anmerkungen
Nominale Produktionskapazität	175,2	kt/a	Bei 8760 Volllaststunden
Reale Produktionskapazität	168,48	kt/a	Bei 8424 Volllaststunden
Installierte Leistung	50	MW	
Jährliche Betriebsstunden	8424	h	
Wartung und Reparatur	336	h	
Spezifischer Strombedarf	2,5	MWh/tCl ₂	Pro ECU
Stündliche Chlorproduktion unter Volllast	20	tCl ₂	Entspricht einer Strommenge von 50 MWh
Jährlicher Strombedarf unter Volllast	412,2	GWh	
Chlorspeicher	500	tCl ₂	Entspricht rund 24 h Volllast (1250 MWh)
Dynamischer Bereich des Chlorspeichers	250–500 (50–100 %)	tCl ₂	Aufgrund der Gewährleistung der Sicherheit der Folgeprozesse
Dynamischer Bereich für die Elektrolyse	25–50 (50–100 %)	MW	
Zeitraum konstanter Last gemäß §19.2 der Netzentgeltverordnung (StromNEV)	7.500	h	Reduziert Netzentgelte auf 15 %
EDC-Speicher			Falls benötigt

Tabelle 5.6: Parameter der Referenzanlage

5.12.4 DANKSAGUNG

Die Autoren dieses Kapitels möchten sich ausdrücklich bei folgenden Personen für die Diskussionen, Informationen und Rückmeldungen bedanken:

Jürgen C. Baune, Akzo Nobel Industrial Chemicals B.V.
Holger Brezski, Evonik Technology & Infrastructure GmbH
Christian Essers, Wacker Chemie AG
Holger Friedrich, BASF SE
Dirk Hoormann, thyssenkrupp, Uhde Chlorine Engineers GmbH
Klaus-Michael Mangold, DECHEMA Forschungsinstitut
Volkert Mehrwald, Dow Deutschland Anlagengesellschaft mbH
Karen Perrey, Covestro Deutschland AG
Markus Scheuren, BASF SE
Philipp Stahlhofen, CABB GmbH
Martin Trennhaus, Vestolit GmbH
Sebastian Vomberg, Vestolit GmbH
Rainer Weber, Covestro Deutschland AG
Claudia Weidlich, DECHEMA Forschungsinstitut
Michael Winhold, Vinnolit GmbH & Co. KG

5.13 LITERATURVERZEICHNIS

Andreas Schneider, Inovyn Deutschland GmbH
Alle Internetadressen gültig zum 20. Februar 2018.

- [1] T. Brinkmann, G. Giner Santonja, F. Schorcht, S. Roudier, L. Delgado, Sancho; European Commission; JRC Science and Policy Reports; Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Production of Chlor-alkali, ISBN 978-92-79-40945-5 (PDF), Luxembourg 2014. http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/BREF/CAK_BREF_102014.pdf
 Zusätzliche Quellen für Abbildung 1:
 Ullmann's, 'Chlorine', Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, 7th edition, electronic release, 2006.
 Kirk-Othmer, 'Chlorine', Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology, 2002.
- [2] Schmidt, V. M. Elektrochemische Verfahrenstechnik: Grundlagen, Reaktionstechnik, Prozeßoptimierung. 1. Aufl. Weinheim: Wiley-VCH, 2003. isbn: 978-3-527-29958-4.
- [3] Schmittinger, P., Florkiewicz, T., Curlin, L. C., Lüke, B., Scannell, R., Navin, T., Zelfel, E. und Bartsch, R. „Chlorine“. In: Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, Electronic Re-lease. Hrsg. von Bohnet, M., Bellussi, G., Bus, J., Cornils, B., Drauz, K., Greim, H., Herrmann, W. A., Jäckel, K.-P., Karst, U., Kleemann, A., Kreysa, G., Laird, T., Meier, W., Plass, L., Röper, M., Sawamoto, M., Scholtz, J., Schubert-Zsilavec, M., Sundmacher, K., Ulber, R., Yoda, N., Wietelmann, U. und Zass, E. Wiley-VCH, 2011. doi:10.1002/14356007.a06_399.pub3
- [4] D. Hoormann, thyssenkrupp Uhde Chlorine Engineers, persönliche Korrespondenz.
- [5] VDE Studie, Demand Side Integration, Lastverschiebungspotenziale in Deutschland, R. Apel, B.M. Buchholz, H.P. Domels, 2012.
- [6] Amtsblatt der Europäischen Union, Verordnung (EU) 2017/852 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 17. Mai 2017 über Quecksilber und zur Aufhebung der Verordnung (EG) Nr. 1102/2008 (Text von Bedeutung für den EWR.)
- [7] Minamata Convention on Mercury, United Nations Environment Programme (UNEP), Nairobi, beschlossen am 10.10.2013, in Kraft getreten am 16.8.2017.
<http://www.mercuryconvention.org/>
- [8] Eurochlor, Industry Review 2016-2017, Brüssel 2017.
- [9] EuroChlorWebseite:<http://www.eurochlor.org/the-chlorine-universe/the-chlor-alkali-industry-in-europe.aspx>

- [10] Euro Chlor: <http://www.eurochlor.org>
- [11] Vinnolit Webseite: https://www.vinnolit.com/vinnolit.nsf/id/DE_VCM-Process
- [12] Erneuerbare-Energien-Gesetz vom 21. Juli 2014 (BGBl. I S. 1066), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 17. Juli 2017 (BGBl. I S. 2532) geändert worden ist.
- [13] Stromnetzentgeltverordnung vom 25. Juli 2005 (BGBl. I S. 2225), die durch Artikel 4 des Gesetzes vom 17. Juli 2017 (BGBl. I S. 2503) geändert worden ist.
- [14] Verordnung zu abschaltbaren Lasten vom 16. August 2016 (BGBl. I S. 1984), die zuletzt durch Artikel 9 des Gesetzes vom 22. Dezember 2016 (BGBl. I S. 3106) geändert worden ist.
- [15] M. Scheuren, Energieversorgung BASF SE persönliche Korrespondenz
- [16] F. Holtrup „Potenzial für Demand Side Management der energieintensiven Industrie in Deutschland – Eine Kostenbetrachtung am Beispiel der Chlor-Alkali-Elektrolysen“, Welt Energie Rat Deutschland, Berlin 2015.
<http://www.weltenergie.de/wp-content/uploads/2014/03/2016-01-DSM-Papier-v8.pdf>
- [17] F. Ausfelder et al. „Energy Storage as Part of a Secure Energy Supply“ ChemBioEng. Rev. 2017 4(3) 144-210, DOI 10.1002/cben.201700004.
<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/cben.201700004/epdf>
- [18] Frankfurter Rundschau vom 15.09.2014: <http://www.fr.de/wirtschaft/batteriespeicher-in-schwerin-europas-groesster-batteriespeicher-a-563724>
WEMAG 10-MW-Batteriespeicherkraftwerk
<https://www.wemag.com/sites/default/files/20170714%20Faktenblatt%20WEMAG%20Batteriespeicher.pdf>
- [19] UniEnergy Technologies. <http://www.uetechologies.com/news/71-200mw-800mwh-energy-storage-station-to-be-built-with-rongke-power-s-vanadium-flow-battery>
- [20] Forum Netztechnik im VDE (FNN) 2016, VDE Verband der Elektrotechnik Informationstechnik e.V.
- [21] F. Klauke, T. Karsten, F. Holtrup, E. Esche, T. Morosuk, G. Tsatasronis, J.-U. Repke; Demand Response Potenziale in der chemischen Industrie; Chem. Ing. Tech. 2017 89 (9) 1133-1141, DOI: 10.1002/cite.201600073



KAPITEL 6

**FLEXIBILITÄTSPOTENZIALE UND -PERSPEKTIVEN
IN EINER ROHSTOFFSCHMELZANLAGE FÜR
FEUERFESTMATERIALIEN**

Christian Dannert, Hartmut Wuthnow,
Forschungsgemeinschaft Feuerfest e.V., Höhr-Grenzhausen

Olaf Krause,
Hochschule Koblenz, Höhr-Grenzhausen

Tomke Janßen, Karin Arnold,
Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH, Wuppertal

Ralph-Uwe Dietrich, Stefan Estelmann,
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Stuttgart

6.1 BEDEUTUNG DER ROHSTOFFSCHMELZANLAGE IN DER FEUERFESTINDUSTRIE

¹Die Feuerfestindustrie wird entsprechend der Klassifikation der Wirtschaftszeige (WZ 2008) unter dem Kode 23.2 geführt.

Die deutsche Feuerfestindustrie¹ als ein Teilbereich der Keramikindustrie produziert feuerfeste keramische Werkstoffe im Wert von etwa 1,5 Mrd. € im Jahr mit etwa 6.300 Beschäftigten [1] und beliefert damit im Wesentlichen die Industriebereiche (Nutzer-Industrien, s. Abbildung 6.1):

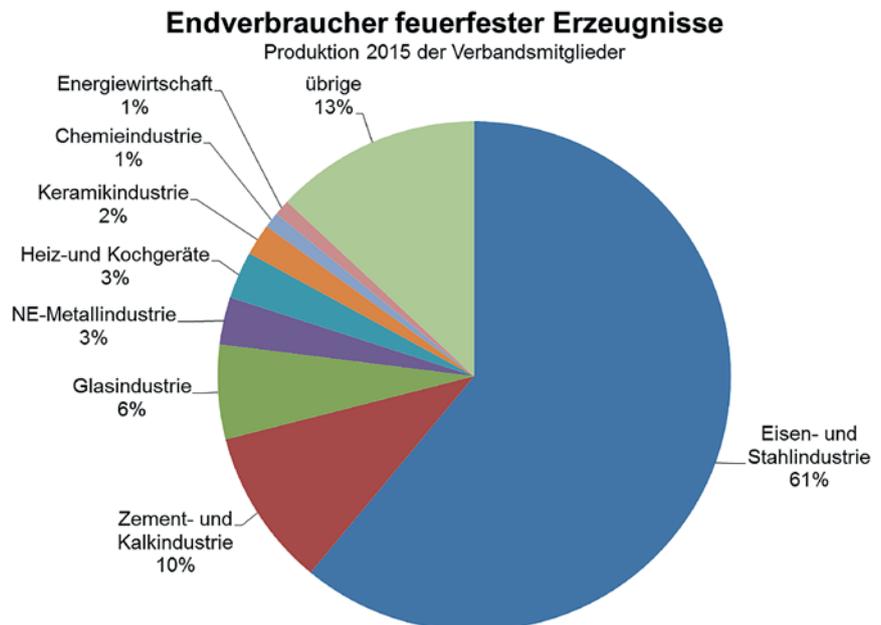
- Eisen- und Stahlerzeugung,
- Nichteisenmetallurgie,
- Zement, Kalk, Gips,
- Glas,
- Keramik,
- Energie,
- Umwelt und Chemie

Die von der Feuerfest-Industrie direkt belieferten Industriezweige wiederum erwirtschafteten im Jahr in Deutschland mit etwa 400.000 Beschäftigten einen Umsatz von etwa 230 Mrd. €.

Feuerfeste Keramikerzeugnisse sind in Form von geformten und gebrannten Steinen, ungeformten Produkten zur Herstellung von Feuerbetonen, Fertigbauteilen sowie Mörteln und Kittungen verfügbar [2].

Zu ihrer Produktion werden natürliche und synthetische Rohstoffe verwendet, die in einem ersten Herstellungsschritt mit Zusätzen versehen und gemischt werden (Masseaufbereitung). Geformte Produkte sowie Fertigbauteile werden anschließend gepresst oder in Formen gegossen (Formgebung) und getrocknet (Trocknung). Nach dem anschließenden Sinterbrand folgt ggf. noch eine Nachbearbeitung, dann die Qualitätskontrolle, die Verpackung und der Versand an die Endverbraucher [3].

Abbildung 6.1: Anteile der Nutzer-Industrien an feuerfesten Erzeugnissen in %



Quelle: VDFFI

Die Sinterung der gepressten und getrockneten Feuerfestprodukte erfolgt technologisch bedingt in gasbefeuchten Öfen. Daher beträgt der Anteil von Brenngas etwa 82,5 % an dem Energieverbrauch zur Feuerfest-Produktion (2015). Die Nutzung von Gasen ist beim Sinterprozess wegen der hohen Sintertemperaturen von bis zu 1.700 °C erforderlich und kann aktuell nicht elektrisch substituiert werden.

Eine Übersicht der relevanten Daten für die Feuerfestindustrie ist im Branchensteckbrief dargestellt (Abbildung 6.2).

Hochwertige Feuerfestprodukte werden zum großen Teil aus Schmelzrohstoffen hergestellt. Synthetische Schmelzrohstoffe sind vormals natürliche Rohstoffe, die in Rohstoffschmelzanlagen einmal aufgeschmolzen wurden und dabei besondere Reinheit und chemische Beständigkeit erwerben. Die vielfältigen Feuerfestprodukte, die aus Schmelzrohstoffen hergestellt werden, finden in mindestens 85 % der oben genannten Nutzer-Industrien Anwendung. Je nach Prozess wird hier auf unterschiedliche stoffliche Systeme der Schmelzrohstoffe zurückgegriffen, deren Natur sich nach den jeweiligen Prozessanforderungen richtet, um sowohl den thermischen Erfordernissen als auch der chemischen Beständigkeit gerecht zu werden.

Synthetische Schmelzrohstoffe sind im Folgenden aufgelistet:

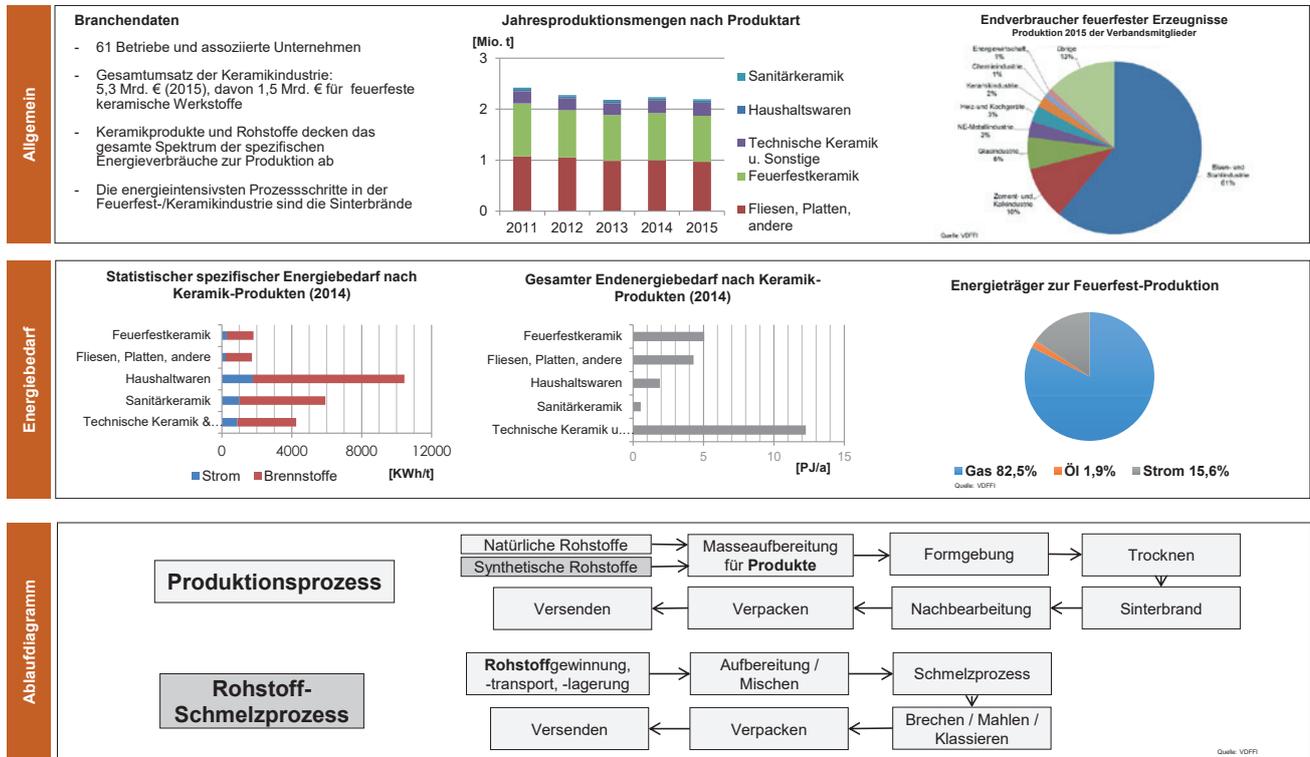
- Edelkorund (Al_2O_3),
- Normalkorund (Al_2O_3),
- Schmelzmullit ($\text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13}$),
- Schmelzmagnesia (MgO),
- Schmelzspinell (MgAl_2O_4),
- Quarzgut (SiO_2),
- Schmelzzirkonmullit ($\text{ZrSiO}_4 \cdot \text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13}$),
- Schmelzzirkonkorund ($\text{ZrSiO}_4 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$) und
- Schmelzpikrochromit (MgCr_2O_4).

Insbesondere Feuerfestprodukte, die in Thermoprozessanlagen bei sehr hohen Temperaturen eingesetzt werden und dort exzellente Temperatur- und Korrosionsbeständigkeiten und eine besonders lange Lebensdauer erreichen sollen, werden auf Basis synthetischer Schmelzrohstoffe von Unternehmen der Rohstoffveredlung hergestellt [4] [5].

Diese synthetischen Schmelzrohstoffe weisen hochwertige und reproduzierbare Eigenschaften auf wie hohe chemische Reinheit, hohe Dichte, geringe oder keine offene Porosität und eine definierte Kristallinität. Um diese besonderen Eigenschaften erfüllen zu können, werden die synthetischen Rohstoffe in **Rohstoffschmelzanlagen** aus natürlichen Rohstoffen erschmolzen. Dabei müssen die sehr hohen Schmelztemperaturen der Rohstoffe überschritten werden:

- | | |
|---------------|----------|
| • Mullit | 1.810 °C |
| • Korund | 2.050 °C |
| • Chromkorund | 2.060 °C |
| • Spinell | 2.135 °C |
| • Zirconia | 2.710 °C |
| • Magnesia | 2.820 °C |

Abbildung 6.2: Branchensteckbrief für die Feuerfest-Industrie



6.2 ROHSTOFFSCHMELZPROZESS – METHODIK DER DATENERHEBUNG

Die grundlegenden Angaben zum Prozess „Rohstoffschmelzanlage“ sind durch Recherchen in Publikationen, veröffentlichten Unternehmensdaten, Aggregate- und Anlagenspezifikationen und in den Verbandsstatistiken des Verbandes der Deutschen Feuerfest-Industrie e. V. erhoben worden.

Darauf aufbauend erfolgte die Identifizierung der Rohstoffschmelzanlage als eines Anlagentyps, der zu seinem Betrieb kontinuierlich beträchtliche Mengen an elektrischer Energie benötigt, um u. A. die Feuerfest-Industrie in verlässlicher Art und Weise mit Schmelzrohstoffen beliefern zu können.

Durch Telefoninterviews mit Anlagenbetreibern wurde vorab erörtert, ob ihrerseits die Bereitschaft bestünde, die Projektarbeiten mit Angaben zu dem jeweiligen Schmelzprozess zu unterstützen. Für diese Sondierungsarbeiten standen die Betriebsleitungen und das Energiemanagement als Gesprächspartner zur Verfügung.

Im Rahmen eines mehrtägigen Werksbesuches erfolgten dann durch die Forschungsgemeinschaft Feuerfest e. V. die Begehung einer Rohstoffschmelzanlage und der dazugehörigen Peripherie, die detaillierte Besprechung aller relevanten Themen und die Datenerhebung. Das ge-

schah unter Mitwirkung der Werksleitung, des Energiemanagements und der Qualitätssicherung.

Zurückhaltung wurde gewahrt, als es um Verbrauchsdaten, Preise, Investitionen, Strategien und F&E-Vorhaben ging. Solche Angaben gelten als betriebliche Daten, die nur betriebsintern verwertet werden.

6.3 TECHNISCHE BESCHREIBUNG DES SCHMELZPROZESSES UND DESSEN EINBETTUNG IN DEN GESAMTPROZESS

Die Herstellung von Schmelzkorund in einer Rohstoffschmelzanlage (Lichtbogenofen) ist im Steckbrief (Abbildung 6.3) beschrieben worden.

In diesem Prozess wird hochwertiger Schmelzkorund mit speziellen Eigenschaften erzeugt, der u. a. Eingang in besonders belastbare Feuerfestprodukte findet.

Der so hergestellte synthetische Rohstoff [7] [8] wird anschließend in Produktionsprozessen der Feuerfest-Industrie eingesetzt. Der betrachtete Schmelzprozess ist somit ein Vorprozess der Herstellung von Feuerfest-Produkten.

Abbildung 6.3: Steckbrief des Schmelzprozesses: Rohstoffschmelzanlage zur Herstellung von Schmelzkorund (4 MW Lichtbogenofen)

Prozess	Prozessablauf 		Schmelzanlage Typische Größenordnung in MW Technisches Potenzial Flexibler Anteil Stunden/Jahr Dauer in Min. Häufigkeit	Typischer Prozess 3,2– 3,7 1350 kWh / Tonne 2 % 5 Min Bis zu 6 mal täglich	Technische Abhängigkeiten <ul style="list-style-type: none"> - Energetisch optimierter Prozess - Festgelegter Energieeintrag pro Tonne Erzeugnis (Schmelzenthalpie) - Geringere Schmelzleistung führt zu Energieverlusten durch Kühlung - Ofen darf nicht auskühlen (Restschmelze immer vorhanden). - Ofen läuft 5 Jahre bis zu nächsten Überholung durch
	Energetische Erfordernisse und Energiebedarf Strom 29 GWh/a.		Aktuelle Energiekosten k. A.	Kurzzeitige Nachfragereduktion <ul style="list-style-type: none"> - Kurzzeitige Lastverschiebung über 15 Min. ist mit kurzfristiger Voranmeldung möglich. - Mittelfristige Lastverschiebung für 30-60 Min. ist möglich, wenn die Produktionsleistung in einem Zyklus kompensiert werden kann. - Kurzzeitige Abschaltung der Schmelzanlage für 5 Minuten ist möglich bei einem gesicherten Wiederanfahren. 	Nachfragereduktion über 3-12 Stunden mit täglicher Ankündigung und über 1-5 Tage mit 2-5 Tagen Vorlauf Diese Anforderungsprofile sind nicht möglich. Der Ofen müsste außer Betrieb genommen werden, Produktionsausfall tritt ein und das Wiederanfahren kann Auswirkungen auf die Produktqualität haben.
Potenziale und Kosten	Künftige Energiekosten Geknüpft an die Entwicklung der zukünftigen Netzentgeltspolitik.	Hochrechnung der energetischen Flexibilität: Es wäre eine kurzzeitige positive Laständerung auf 4,0 MW denkbar (+300 kW). Positive Laständerung nur mit Vorankündigung von 1 Stunde möglich.	Flexibilisierung der Produktionskapazität: <ul style="list-style-type: none"> - Rohstoffe und Zwischenprodukte können praktisch beliebig lange in Rohstoffbunkern oder Kühlfeldern mit ausreichender Kapazität zwischengelagert werden. - Die Kapitalbindung ist zu beachten. - Flexibilisierung des Schmelzprozesses nur in technisch engen Grenzen. 	Hemmnisse für Laständerungen <ul style="list-style-type: none"> - Negative Laständerungen sind nur im Rahmen kurzzeitiger Nachfragereduktionen möglich. - Energieeintrag pro Tonne Erzeugnis ist klar definiert. - Bei Lastverringern verlängert sich die Schmelzzeit. Leistungserhöhung nur kurzzeitig, um den Ofen nicht zu überhitzen. 	

Rohstoffschmelzanlagen werden, bedingt durch hohe Schmelztemperaturen, je nach Material zwischen 1.800 und bis zu 2.800 °C vollelektrisch betrieben. Schmelzkorund wird in einem kontinuierlichen Batchprozess in elektrisch betriebenen Lichtbogenöfen bei Temperaturen oberhalb von 2.050 °C hergestellt. Mit fossilen Brennstoffen betriebene Brenner erreichen nicht die benötigten hohen Schmelztemperaturen.

Die Produktion erfolgt ununterbrochen, der kontinuierliche Chargenprozess ist energetisch optimiert und wird nur einmal im Jahr für eine Revision unterbrochen.

Die Herstellung des Schmelzkorunds erfolgt nach folgendem Prozess:

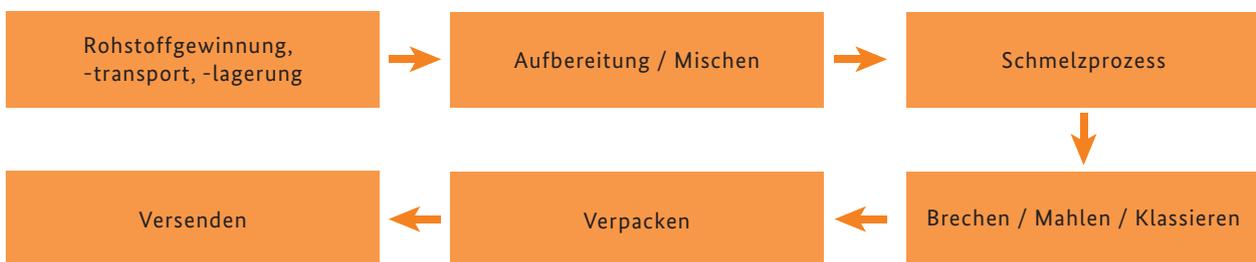


Abbildung 6.4: Prozesskette der Schmelzkorund-Herstellung

Dabei wird der angelieferte Rohstoff (Korund), der in Silos gelagert wird, chargenweise aufbereitet in den Lichtbogenöfen gefüllt. Anschließend wird der Lichtbogenofen durch das Absenken von zwei Elektroden „gezündet“ und der Schmelzprozess begonnen. Der Wärmeeintrag erfolgt in Form von Strahlung und Konvektion des Lichtbogens. Die elektrische Leistungsaufnahme wächst mit dem Schmelzfortschritt an, während die gemittelte elektrische Leistungsaufnahme, bezogen auf die Nennleistung, bei ca. 100 % über den gesamten Zeitraum des Schmelzprozesses liegt.

Pro Charge werden 10 Tonnen Korund (Al_2O_3) in einem Zyklus von 4 Stunden aufgeschmolzen. Der betrachtete Ofen hat eine installierte Leistung von ca. 3,5 MW und kann im Bereich von 3,2 bis 3,7 MW betrieben werden. Zum Schmelzen einer Tonne Korund ist eine Energiemenge von 1,35 MWh erforderlich.

Nach dem Abguss des flüssigen Produkts in Transport- und Abkühlbehälter innerhalb von etwa 5 Minuten wird der Ofen der Schmelzanlage wieder gefüllt und der Prozess fortgesetzt. Beim Abguss wird darauf geachtet, dass eine geringe Menge an Schmelze im Ofen verbleibt, um ihn nicht auskühlen zu lassen.

Die Schmelze erstarrt und kühlt in den Transport- und Abkühlbehältern ab, so dass die erstarrten Korundblöcke in ein Zwischenlager deponiert werden und die Abkühlbehälter nach 4 Stunden die nächste Produktcharge aufnehmen können.

Die erkalteten Korundblöcke werden zur Aufbereitung den nachgeschalteten Zerkleinerungsgängen zugeführt. Zuerst ist das Brechen in unterschiedliche Größen, danach die Mahlung und Feinmahlung und am Ende das Klassieren vorgesehen. Durch das Sieben wird sichergestellt, dass die Korngrößen exakt eingehalten werden. Zwischen diesen einzelnen

Aufbereitungsschritten sind Silokapazitäten eingerichtet worden, um den klassierten Schmelzkorund zwischenzulagern.

Mit zunehmender Mahlfeinheit nehmen Energieeinsatz und Mahlzeit zu. Während der grobe Brecher 3 Stunden am Tag betrieben wird, müssen der mittlere Brecher bereits 6 Volllaststunden am Tag und die Feinmahlung kontinuierlich betrieben werden.

Der letzte Produktionsschritt besteht aus der Verpackung des Schmelzkorund-Rohstoffes beispielsweise in Big Bags oder Säcke und der Auslieferung an die Feuerfestindustrie und weitere Abnehmer.

6.4 IDENTIFIKATION WESENTLICHER HEMMNISSE – METHODIK UND DATENGRUNDLAGE

Die Ermittlung der technischen und organisatorischen Restriktionen zur Flexibilisierung von Rohstoffschmelzanlagen wurde nach der in Kapitel 1.2 beschriebenen Methodik durchgeführt. Entsprechend des dort vorgestellten Analyserasters sind die verschiedenen zeitlich-organisatorischen Hemmnis-Ebenen und die technischen Restriktionen eingearbeitet worden. Anschließend werden die Flexibilisierungsmöglichkeiten für die drei vorgestellten Anforderungsprofile (siehe auch Kapitel 1.4) erörtert.

Verglichen mit anderen im Projektkontext behandelten Branchen wird die Branche der Rohstoffveredler in der Literatur nicht separat bezüglich Flexibilisierungspotenzialen und Hemmnissen behandelt². Als Grundlage für die folgenden Darstellungen dienen deshalb in erster Linie Experteninterviews, welche direkt mit den Unternehmen geführt wurden. Aufgrund einer geringen Anzahl an Unternehmen, die den Schmelzprozess in Deutschland betreiben, bestehen Vorbehalte bezüglich einer möglicher Zuordenbarkeit von identifizierten Hemmnissen zu einzelnen Standorten. Deshalb fanden die Expertengespräche zur Identifikation von Hemmnissen zwischen Vertretern des Forschungsinstituts der Feuerfestindustrie (FGF) und dem DLR bzw. dem Wuppertal Institut statt.

² Diverse Studien sprechen der übergeordneten Keramikindustrie Lastmanagementpotenziale zu, häufig werden diese jedoch nicht quantifiziert und wenn, nur aggregiert mit anderen Branchen (mit Glas oder auch mit Glas, Steinen und Erden) ausgewiesen. Zu diesen Studien zählen [9], [10], [11] und [12].

Die folgenden Darstellungen, die auf diesen Interviews beruhen, beinhalten die Identifikation der wesentlichen Prozesse und technischen Hemmnisse zur Flexibilisierung der Rohstoffschmelzanlage (DLR) und darüber hinaus Hemmnissen, die sich aus innerbetrieblichen Organisationsstrukturen und dem Marktumfeld ergeben (WI).

Die Untersuchung des technischen Flexibilitätspotenzials der Rohstoffschmelzanlage erfolgte unter der Bedingung, dass es keinen Ausfall in der Produktion von Schmelzkorund geben darf.

6.5 TECHNISCHES FLEXIBILITÄTSPOTENZIAL UND HEMMNISSE DER ROHSTOFFSCHMELZANLAGE

6.5.1 TECHNISCHE LIMITATIONEN IM HINBLICK AUF LASTFLEXIBILISIERUNG

Das Schmelzaggregat besteht aus einer wassergekühlten, tragenden Stahlhülle, auf der im Betrieb eine „arteigene Schicht“ aus Korund-Rohstoff aufsintert und den Stahlmantel vor dem schmelzflüssigen Korund schützt. Diese arteigene Schutzschicht hat einen großen Einfluss auf die Lebensdauer des Schmelzaggregates, indem sie es vor irreversibler Zerstörung bewahrt.

Eine langfristige Steigerung des Wärmeeintrages durch erhöhten Leistungsbezug würde zu einer Abnahme der Schutzschicht führen, und ein direkter Kontakt der Schmelze mit dem wassergekühlten Stahlgefäß würde zur Zerstörung des Aggregates führen. Im Gegenzug kann durch ein Abkühlen mittels verringertem oder gar ohne Leistungsbezug der Elektroden ein Anwachsen der Schutzschicht erfolgen. Eine Regulation der arteigenen Schutzschicht erfolgt in begrenztem Maße, wobei eine zeitliche Degradation unvermeidlich ist. Dauerhafte Aufwärm- und Abkühlungsprozesse führen zur Oszillation der Mächtigkeit der Schutzschicht während des Produktionsprozesses.

Somit ist die Intensität des Wärmeeintrags die limitierende Prozessgröße für Flexibilitätsmaßnahmen. Kurzzeitige Leistungserhöhungen über die 3,7 MW hinaus sind aus technischer Sicht zulässig. Ebenfalls ist die Leistungsreduktion unterhalb der genannten 3,2 MW möglich, sofern die technischen Voraussetzungen vorliegen und die flüssige Schmelze in der Rohstoffschmelzanlage nicht zu erstarren beginnt.

Weiterhin ist als technische Limitation zur Lastflexibilisierung bedeutsam, dass die Schmelze nicht im Schmelzbehälter erstarren darf. Ein zu starkes Auskühlen der Schmelze im Ofen darf durch eine Lastflexibilisierung nicht zugelassen werden.

6.5.2 EINBETTUNG IN DIE PROZESSKETTE/ VERNETZTE PRODUKTIONSPROZESSE

Grundsätzlich stellt das Schmelzen aus rein technischer Sicht einen Prozessschritt dar, bei dem sowohl zu den vor- als auch zu den nachgelagerten Prozessschritten eine Unterbrechung möglich wäre. Der Schmelzprozess ist nicht direkt über Stoff- oder Energieflüsse mit anderen Produktionsprozessen gekoppelt.

Vor dem Schmelzen findet die Aufbereitung und Mischung des Rohstoffes statt. Aus technischer Sicht kann das Vorprodukt in Lagern zwischengespeichert werden. An den Schmelzprozess angeschlossen findet das Brechen, Mahlen und Klassieren statt. Sowohl nach dem Schmelzen als

auch nach dem Brechen (bzw. anderen Zerkleinerungsprozessen) könnten die Zwischenprodukte entsprechend der logistischen Ressourcen und der Lagerkapazitäten zwischengespeichert werden.

Qualitätsverluste durch Lagerung ergeben sich im Fall des Schmelzkorunds nicht. Im Falle anderer synthetischer Schmelzrohstoffe, wie beispielsweise Magnesia, kann eine Lagerung des Produktes zu Qualitätsverlust führen. Im Falle des betrachteten Schmelzprozesses gibt es ausreichende Lagerkapazitäten und durchschnittliche Lagerfüllstände, um Flexibilisierungspotenziale über mehrere Stunden (bis zu Tagen) zu erschließen. Es könnte sich möglicherweise die mit der Lagerhaltung einhergehende Kapitalbindung hemmend auf die Flexibilisierungser-schließung auswirken.

Bezüglich möglicher Flexibilisierungen der Schmelzanlage mit Blick auf ihre Einbettung in den gesamten Produktionsprozess ist festzuhalten, dass bestehende Anlagen optimiert sind auf eine vordefinierte Tonnage sowie Tap-to-Tap Zeit, welche sich in die Werksstruktur einfügt. Der Produktionsprozess zeichnet sich insgesamt durch optimal aufeinander abgestimmte Prozessschritte aus, die entsprechend der kontinuierlichen und hohen Auslastung dimensioniert sind. Eine Flexibilisierung des Prozesses ist nur unter Einhaltung der definierten Randbedingungen zulässig, sofern Laständerungen durch entsprechende Ausgleichsmaßnahmen kompensiert werden und der Energieeintrag von 1,35 MWh/t Produkt gewährleistet ist.

Entlang der Prozesskette zählen neben dem Schmelzprozess auch das Zerkleinern des Schmelzkorunds und die Herstellung von Körnungen zu den stromintensiven Prozessen. Diese Prozessschritte würden grundsätzlich Flexibilisierungsmöglichkeiten bieten, da Teile der Brech- und Mahlwerke unterschiedlich lange pro Tag betrieben werden und nur die besonders fein mahlenden Aggregate rund um die Uhr zum Einsatz kommen. Entsprechend gäbe es für die gröberen Zerkleinerungsschritte aus technischer sowie aus Sicht des Produktionsablaufes ein vergleichsweise leicht zu erschließendes Potenzial, welches jedoch nur einen geringen Anteil am ansonsten besonders stromintensiven Rohstoffschmelzprozess hat.

6.6 ANFORDERUNGSPROFIL 1 - POTENZIALE UND HEMMNISSE

6.6.1 KURZFRISTIGE LASTVERSCHIEBUNG

Aus technischer und produktionsorganisatorischer Sicht sind kurzzeitige (ca. 15 Min.) negative wie positive Flexibilitätsmaßnahmen in der Rohstoffschmelzanlage im Leistungsbereich zwischen 3,2 bis 3,7 MW mit kurzfristiger Voranmeldung möglich, sofern die erforderliche Energiemenge von 1,35 MWh/t zum Schmelzen des Produktes eingebracht wird und die Länge des Zyklus von 4 Stunden weder verkürzt noch verlängert wird.

Eine Leistungserhöhung des Elektrolichtbogens über die 3,7 MW hinaus ist kurzzeitig, für 15 Minuten, auf 4 MW möglich mit einer Vorankündigungszeit von ca. 1 Stunde. Eine längerfristige Lasterhöhung führt zu Schäden am Schmelzgefäß der Rohstoffschmelzanlage und wird nicht vorgenommen.

Eine Lastreduktion ohne Vorzug bzw. Nachholung der Last während eines Zyklus von 4 Stunden ist nicht denkbar, ohne die innerbetriebliche Organisation und die Produktionsmenge des kontinuierlichen Prozesses zu gefährden. Bezüglich aller hier beschriebenen Formen der Laständerung muss zudem berücksichtigt werden, dass der Betriebsleiter (wie auch im Schmelzprozess im EAF im Stahlwerk) die Entscheidungshoheit über den Prozess und entsprechend auch den etwaigen Einsatz von Lastmanagement behalten muss. Eine automatische Ausübung einer Lasterhöhung oder -reduktion kommt deshalb nicht in Frage, da aufgrund der sich ändernden Prozessbedingungen nicht zu jedem Zeitpunkt des Schmelzzyklus eine Änderung der eingebrachten Wärmemenge realisiert werden kann, zum Beispiel während des Beginns eines Schmelzprozesses.

6.6.2 MITTELFRISTIGE LASTVERSCHIEBUNG

Mit entsprechender Vorankündigung von einem Tag kann eine positive wie negative Flexibilitätsmaßnahme für 30 bis 60 Minuten in den kontinuierlichen Chargenprozess eingeplant werden, sofern eine Leistungsveränderung nicht zu Beginn des Schmelzprozesses erfolgt. Die Leistungsänderung ist im Bereich zwischen 3,2 bis 3,7 MW zulässig, das Aggregat darf jedoch thermisch nicht überlastet und dadurch geschädigt werden. Die Produktionsleistung muss innerhalb der Dauer des Tap-to-Tap Zyklus von 4 Stunden ausgeglichen sein. Die somit erzielte kurzfristige Flexibilisierung von maximal 500 kW (250 bis 500 kWh) muss innerhalb eines Zyklus von 4 Stunden kompensiert werden.

6.6.3 VOLLSTÄNDIGER LASTABWURF

Sofern sich der Schmelzprozess im fortgeschrittenen Zustand befindet, ist theoretisch eine kurzzeitige Abschaltung der Rohstoffschmelzanlage für ca. 5 Minuten denkbar. Diese Flexibilitätsmaßnahme kann einmal pro Schmelzzyklus realisiert werden und führt auf Grund der zu gewährenden Nachholbarkeit innerhalb des gleichen Schmelzzyklus zu einer kurzfristigen Lastverschiebung von maximal 1,85 MWh pro Tag (5 min • 6 Zyklen • 3,5 MW).

Da es sich aus Sicht einer kontinuierlichen Betriebsführung beim Abschalten der Energiezufuhr um einen Störfall handelt, der Risiken beim Wiederauffahren birgt, ist aus betrieblich-organisatorischer Sicht diese Form der Lastflexibilisierung mit hohen Unsicherheiten behaftet und ihre Realisierung, zumindest zum gegenwärtigen Zeitpunkt, unwahrscheinlich. Der störanfällige Anfahrprozess erhöht das Ausfallrisiko der Anlage. Bei Ausfall des Ofens ist zur Reparatur eine Abkühlung von 2.000 °C

mit entsprechend langen Wartezeiten und hohen Produktionsausfällen nötig. Diese Form der Lastflexibilisierung ist zudem nicht nur mit Risiken, sondern auch mit einem erhöhten Arbeitsaufwand verbunden, da das Wiederanfahren nicht automatisch, sondern unter Aufsicht des Prozessverantwortlichen stattfinden muss. Auch die Gefahr einer Verunreinigung des Produktes beim Wiederanfahren wirkt sich hemmend auf die Realisierung des Potenzials aus. Durch häufigeres Zünden des Lichtbogens kann außerdem von einem erhöhten Verschleiß der Elektroden ausgegangen werden.

6.7 ANFORDERUNGSPROFILE 2 UND 3 – POTENZIALE UND HEMMNISSE

Wie Anforderungsprofil 2, die Anpassung der Last über mehrere Stunden, ist auch Anforderungsprofil 3, die Reduktion über mehrere Tage, in der bestehenden Produktionsstruktur nicht umsetzbar.

Im Betriebsablauf mit aktuell nahezu vollständiger Auslastung sind diese Lastreduktionen oder -erhöhungen aus technischer, organisatorischer und ökonomischer Sicht nicht denkbar. Wird die Schmelzzeit beispielsweise über die übliche Tap-to-Tap Zeit von vier Stunden verlängert, kann aufgrund der ansonsten hohen Auslastung der Rohstoffschmelzanlage die entgangene Produktion später nicht nachgeholt werden und die Ofenanlage wird aufgrund der hohen andauernden Betriebstemperaturen stärker in Mitleidenschaft gezogen/verschlissen. Blieben selbst die dadurch anfallenden hohen Opportunitätskosten zunächst unberücksichtigt, ist aufgrund des Marktumfeldes (langfristige, wertgeschätzte Kundenbeziehungen, Lieferverträge und fehlende Möglichkeit des Zukaufs eines identischen Produktes) eine Realisierung sehr unwahrscheinlich.

Auch die Möglichkeit der Synchronisation der Revisionszeiten von jährlich einer Woche und fünfjährlich drei Wochen mit Zeiten geringer erneuerbarer Stromeinspeisung (Dunkelflaute) ist nicht umsetzbar, da die Vorankündigungsdauer der Revisionen in der innerbetrieblichen Organisation mindestens zwei Monate beträgt.

Im Falle einer sich perspektivisch ändernden Auslastung wäre es auch denkbar, einen kontinuierlich betriebenen Ofen in einen Chargenofen zu wandeln, entsprechend der Anforderungsprofile 2 und 3 die Aufträge zu bündeln und die Öfen nach Bearbeitung der gebündelten Aufträge komplett auszuschalten. Dies scheint jedoch unter der prognostizierten Auslastung von ca. 100 % nicht von Bedeutung zu sein.

Über die betrachtete Rohstoffschmelzanlage hinaus sind in Bezug auf weitere Flexibilisierungspotenziale (entsprechend der Anforderungsprofile 2 und 3) auch unterschiedliche Einsatzfelder von Rohstoffschmelzanlagen berücksichtigt worden. In dem hier untersuchten Anwendungsbeispiel wird Schmelzkorund in einem kontinuierlichen Prozess geschmolzen. In Deutschland kommen für andere Spezialrohstoffe mit geringerer oder diskontinuierlicher Nachfrage auch Chargenproduktionen zum Einsatz. In solchen Öfen werden grundsätzlich Rohstoffe für

unterschiedliche Anwendungen und spezielle Einsatzfelder hergestellt und die Produktion für einen bestimmten Rohstoff jeweils gebündelt. Ein solcher Einsatz bietet ggf. die Möglichkeit, durch eine Verschiebung des gesamten Produktionsprozesses weitere Flexibilitätspotenziale zu heben.

6.8 MARKTUMFELD UND KUNDENBEZIEHUNGEN

6.8.1 KONJUNKTUR UND AUSLASTUNG DER BRANCHE

Die deutsche Feuerfestindustrie wird auch im internationalen Vergleich als „extrem wettbewerbsstark“ beschrieben [6]. Als Gründe dafür wird neben der technologischen Stärke auch die deutliche Steigerung der Arbeitsproduktivität nach der Jahrtausendwende benannt. Da ca. 60 % der feuerfesten Erzeugnisse in der Stahlindustrie verwendet werden, ist die konjunkturelle Entwicklung der Feuerfestindustrie stark von derjenigen der Stahlindustrie abhängig. Diese weist derzeit Überkapazitäten an Produktionseinheiten auf (vgl. Hemmnisse Stahlindustrie). Die daraus resultierende Nachfragereduktion hat sich teilweise auf die Feuerfestindustrie übertragen. Die zunehmende Erzeugung von Sonderstählen in der deutschen Stahlindustrie kann die Feuerfestindustrie aufgrund einer hohen Innovationsfähigkeit und damit verbundenen Anpassungsfähigkeit gut unterstützen.

Die Branche der Rohstoffveredler weist in Deutschland keine Überkapazitäten auf und der betrachtete Prozess „Rohstoffschmelzanlage“ ist derzeit als kontinuierlicher Chargenprozess in Deutschland zu beinahe 100 % ausgelastet. Auch kurzfristige Auslastungsschwankungen sind in diesem Produktionsprozess eher unüblich, da die Branche der Rohstoffveredler typischerweise über langfristige Lieferverträge und sehr stabile Kundenbeziehungen verfügt.

6.8.2 ZUKAUFMÖGLICHKEITEN UND LIEFERFRISTEN

Bezogen auf das Endprodukt Schmelzkorund gibt es grundsätzlich die Möglichkeit des Zukaufs. Aufgrund vorhandener Lagerkapazitäten und üblicher Lagerbestände können auch bei Produktionsausfall die Lieferverträge ohne Zukäufe eingehalten werden und kurzzeitige Flexibilisierungen, zur Erfüllung des Anforderungsprofil 1, könnten grundsätzlich mit den vorhandenen Lagerkapazitäten des Endproduktes sowie der Zwischenprodukte erfüllt werden. Im Falle eines Zukaufs wäre mit hoher Wahrscheinlichkeit kein exakt identisches Produkt erwerbbar, da sich je nach Produktionsstandort (und den unterschiedlichen Mahlwerken) die Körnung des Korunds unterscheidet. Feuerfeste Produkte reagieren extrem sensibel auf Unterschiede in der Produktqualität der Rohstoffe. Entsprechend können Unterschiede in der Körnung später zu Mängeln in der Anwendung der feuerfesten Produkte führen. Aus diesem Grund sind langjährige Kundenbeziehungen (auch für die Feuerfestproduzenten, also die Abnehmer der in der Rohstoffschmelzanlage hergestellten

Rohstoffe) sehr wertvoll und es ist unwahrscheinlich, dass diesem Umstand zum Trotz die Risiken eines Zukaufs zur Flexibilisierungserschließung in Kauf genommen würden.

6.9 INNERBETRIEBLICHE ORGANISATION

6.9.1 AUFTRAGS- UND SCHICHTPLANUNG

Aufgrund der langfristigen, engen Kundenbeziehungen sind die Auftragsplanung und damit auch die Auslastung der Rohstoffschmelzanlagen gut vorhersehbar. Die Produktionsplanung findet in den repräsentativen Unternehmen monatlich statt. Die Auslastung im Schmelzprozess ist aktuell annähernd 100 %; es gibt keine Stillstandzeiten außer den Revisionszeiten. Die Produktion erfolgt kontinuierlich 24 Stunden an sieben Tagen pro Woche in einem Dreischichtsystem. Auch die Schichtplanung erfolgt langfristig mit monatlicher Anpassung.

6.9.2 GEPLANTE REVISIONEN

Jährlich finden Revisionen mit Stillstandzeiten von 1–2 Wochen statt, in denen der Zustand der Rohstoffschmelzanlagen kontrolliert wird. Darüber hinaus finden umfangreiche Revisionen alle fünf Jahre mit einer Dauer von 3 Wochen statt. Hierbei werden die Schmelzanlagen komplett überprüft. Die Terminierung dieser Revisionszeiten bedarf einer langfristigen Planung; die Vorlaufzeit beträgt mindestens 2 Monate.

6.9.3 REGULATORISCHE HEMMNISSE

Die Stromkosten machen für die Hersteller von Schmelzkorund einen hohen Anteil an den laufenden Kosten aus³ [13]. Entsprechend relevant ist deshalb auch die Netzentgeltreduktion nach § 19 StromNEV [14] Für diese wird eine gewisse Anzahl an Vollbenutzungsstunden vorausgesetzt. Im Falle einer Lastflexibilisierung kann es sehr wahrscheinlich dazu kommen, dass die erforderlichen Vollbenutzungsstunden nicht erreicht werden und die Netzentgeltreduktion nicht mehr gewährt wird. Dies stellt für die betrachteten Unternehmen ein entscheidendes Hemmnis zur Erschließung von Flexibilität dar und wird in der Literatur bereits vielfach beschrieben, z.B. in [15].

³ Hersteller von Schmelzkorund erhalten Steuerentlastungen nach §9a und 9b StromStG

6.10 WECHSELWIRKUNGEN ZWISCHEN EFFIZIENZ UND FLEXIBILITÄT

In den Rohstoffschmelzanlagen laufen energetisch anspruchsvolle Hochtemperaturprozesse ab. Da elektrische Energie dabei einen deutlichen Kostenfaktor darstellt, sind die Anlagen energieoptimiert und werden nach dem aktuellen Stand der Technik so betrieben, dass in ihnen mit der größten Effizienz Schmelzprodukte erzeugt werden können.

Dabei müssen die technischen Anforderungen der Anlagen berücksichtigt werden, um sie nicht zu schädigen.

Alle Schmelzprozesse, in deren Verlauf nach einer Lastreduktion eine Lasterhöhung erforderlich wird, um die versäumte Produktion nachzuholen, sind keine energieeffizienten Prozesse mehr.

Prozesse, in denen die Schmelzzeit verlängert oder verkürzt wird, in denen es Probleme beim Zünden des Lichtbogens gibt oder zusätzliches Personal zur Unterstützung bei Flexibilitätsmaßnahmen gebraucht wird, können möglicherweise flexibel betrieben werden, sind jedoch nicht mehr auf Effizienz optimiert.

Bei allen Maßnahmen, wie Lastreduktionen und Lasterhöhungen durch beispielsweise kurzfristige Lastverschiebungen, kann nur in bestimmten prozessbedingten Grenzen gearbeitet werden. Diese limitieren damit die erschließbare Flexibilität.

Aufgrund der hohen Auslastung der Schmelzanlagen und der guten Wirtschaftslage bestehen momentan seitens der Hersteller von Schmelzrohstoffen keine Erfordernisse, die Flexibilität der Anlagen zu steigern.

6.11 FLEXIBILITÄTSPERSPEKTIVEN DER ROHSTOFFSCHMELZANLAGE

Die betrachtete Rohstoffschmelzanlage zur Herstellung von Schmelzkorund bietet bereits in der aktuellen Konzeption einige Perspektiven, besonders in der Betriebsinfrastruktur.

Sowohl für die Bevorratung von Rohstoffen zur Herstellung des Schmelzkorunds als auch für die Zwischenlagerung der erstarrten Korundschmelze stehen ausreichend große Lagermöglichkeiten zur Verfügung, um selbst bei Beschaffungsengpässen der Rohstoffe weiter produzieren zu können. Inwieweit sich hierbei möglicherweise eine Kapitalbindung bemerkbar macht, muss vom Betrieb beurteilt werden.

Bei der Aufbereitungs- und Weiterverarbeitungskette des Schmelzkorunds durch Brecher und Mahlwerke kann aufgrund der Auftragslage, der laufenden Produktion sowie des Füllstands der Zwischenlager noch ein gewisser Flexibilitätsspielraum durch einen angepassten Prozessbetrieb erschlossen werden.

Dem gegenüber sind einer weiteren energetischen Flexibilisierung des Schmelzprozesses selbst, technologisch bedingt, enge Grenzen gesetzt. Die hohen Reaktionstemperaturen im Ofen und die Wechselwirkungen zwischen dem Ofenaggregat und dem Schmelzgut erfordern große Aufmerksamkeit, wie es in den Anforderungsprofilen anlässlich der Betrachtung des technischen Flexibilitätspotenzials erörtert wurde.

Aufgrund enger Verflechtungen sind einige der Rohstoffveredler im Sinne einer „Rückwärtsintegration“ der Feuerfestindustrie am Produktionsstandort der Feuerfestproduzenten ansässig. In diesem Fall könnten sich gute Kommunikations- und Kooperationsstrukturen, basierend auf starken Unternehmensverflechtungen, teilweise in Form von Unternehmenseinheiten, langfristig begünstigend auf die Erschließung von Flexibilitätsperspektiven auswirken.

6.12 LITERATURVERZEICHNIS

- [1] Mitteilungen des Verbandes der Deutschen Feuerfest-Industrie e. V. an seine Mitglieder (2015). Höhr-Grenzhausen.
- [2] Deutsche Gesellschaft Feuerfest- und Schornsteinbau e. V. (2015): Feuerfestbau. Stoffe-Konstruktion-Ausführung. Vulkan-Verlag, Essen.
- [3] Routschka, G.; Wuthnow, H. (Hrsg.) (2011): Praxishandbuch Feuerfeste Werkstoffe. Vulkan-Verlag, Essen.
- [4] Schnabel, M.; Buhr, A.; Schmidtmeier, D. et al. (2015): Perceptions and Characteristics of Fused and Sintered Refractory Aggregates. Refractories Worldforum, 7(4)75–81.
- [5] Gelbmann, G.; Muehlhaeusser, J.; Nilica, R. (2015): Fused refractory raw materials - challenging aspects for their production. UNITECR 2015 - 14th Biennial Worldwide Congress, 14(1)1–4.
- [6] Voß, W. (2012): Innovationsprozesse in der keramischen Industrie – Möglichkeiten und Grenzen der Mitarbeiterbeteiligung. Hans-Böckler-Stiftung/IG Bergbau, Chemie, Energie, Hauptvorstand (Hrsg.). Hannover.
- [7] Li, Y.; Li, N. (2000): Sintering and microstructure of bauxite-based electro-melted corundum. Interceram, 49(3)174–177.
- [8] Fruhstorfer, J.; Möhmel, S.; Thalheim, M. et al. (2015): Microstructure and strength of fused high alumina materials with 2.5 wt% zirconia and 2.5 wt% titania additions for refractory applications. Ceramics International, 41(9A)10644–10653.
- [9] Buber, T.; Gruber, A.; Klobasa, M.; von Roon, S. (2013): Lastmanagement für Systemdienstleistungen und zur Reduktion der Spitzenlast. Vierteljahreshefte zur Wirtschaftsforschung 82(3)89–106.
- [10] Klobasa et al. (2013): Lastmanagement als Beitrag zur Deckung des Spitzenlastbedarfs in Süddeutschland. Auftragsstudie Endbericht. Berlin: Agora Energiewende.
- [11] Klobasa, M.; Erge, T.; Wille-Haussmann, B. (2009): Integration Windenergie in ein zukünftiges Energiesystem unterstützt durch Lastmanagement. Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung, Karlsruhe.
- [12] von Roon, S.; Gobmaier, T. (2010): Demand Response in der Industrie – Status und Potenziale in Deutschland. München: Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V. (FfE).
http://www.ffe.de/download/article/353/von_Roon_Gobmaier_FfE_Demand_Response.pdf. Abgerufen am 04.02.2015.
- [13] Stromsteuergesetz vom 24. März 1999 (BGBl. I S. 378; 2000 I S. 147), das zuletzt durch Artikel 3 u. 4 des Gesetzes vom 27. August 2017 (BGBl. I S. 3299) geändert worden ist.

- [14] Stromnetzentgeltverordnung vom 25. Juli 2005 (BGBl. I S. 2225), die zuletzt durch Artikel 4 des Gesetzes vom 17. Juli 2017 (BGBl. I S. 2503) geändert worden ist.

- [15] Langrock, T.; Achner, S.; Baumgart, B.; Jungbluth, C.; Marambio, C.; Michels, A.; Otto, A.; Weinhard, P. (2015): Regelleistungsbereitstellung mit regelbaren Lasten in einem Energieversorgungssystem mit wachsendem Anteil Erneuerbarer Energien. Im Auftrag des Umweltbundesamtes.



KAPITEL 7

VERGLEICH DER WIRTSCHAFTLICHEN POTENZIALE AUSGEWÄHLTER PROZESSE

Jörn Richstein, Karsten Neuhoff,
Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung e.V., Berlin



In diesem Abschnitt werden zwei Referenzprozesse genauer betrachtet um wesentliche regulatorische und praktische Hemmnisse quantitativ zu analysieren, die sich in ähnlicher Form auf andere Referenzprozesse übertragen lassen. Zum einen analysieren wir einen Referenzprozess mit hohen Auslastungsgraden (die Chlor-Alkali-Elektrolyse), an dem die Bedeutung von Auslastungsgraden, sowie regulatorische Markt-designfragen kritisch analysiert werden, und zum anderen ein Prozess mit geringeren Auslastungsgraden, aber wesentlichen technischen und praktischen Hemmnissen, welcher einer Flexibilisierung entgegen stehen (die Zementmahlung).

7.1 WIRTSCHAFTLICHER REFERENZPROZESS FÜR HOHE AUSLASTUNGSGRAD MIT SPEICHERN (CHLOR-ALKALI)

Als Prototyp für einen Referenzprozess mit hohen Auslastungsgraden und der prinzipiellen Option der Flexibilisierung wird hier der Chlor-Alkali Prozess herangezogen, welcher in Kapitel 5.8.3 ausführlich besprochen wird. Es ist hierbei anzumerken, dass der vorliegende Prozess einen relativ großen Speicher von ca. 10 Produktionstagen vorweist.

7.1.1 MODELLBESCHREIBUNG

Das Model ist als Kostenminimierung (Lineares Programm, LP) bezüglich der Strombeschaffung am Day-Ahead-Markt und Maximierung der Erlöse an Flexibilitätsmärkten formuliert, und beschreibt die Chlor-Alkali-Elektrolyse als kontinuierlichen, steuerbaren Produktionsprozess mit nachgelagertem Speicher (um die kontinuierliche Nachfrage nach EDC zu erfüllen). Das Modell beschreibt ausschließlich den Zusammenhang zwischen flexibler Stromnachfrage und der EDC-Produktion und Speicherung. (Kosten-)Effekte durch Veränderung in der Menge und Qualität der Ko- und Zwischenprodukte werden vernachlässigt.

Das Modell ist in drei wesentliche Bestandteile gegliedert: Variable Strombeschaffungskosten, fixe Kosten und Erlöse aus weiteren Flexibilitäts-Märkten (hier AbLaV [1] und Primärregelleistung).

Variablen	Beschreibung	Einheit
x_t	Strombedarf der Elektrolyse (stundenscharf)	[MW]
$r_{ABLA\bar{V}}$	Jahresmindestproduktionsleistung und vermarktete AbLaV-Reserve	[MW]
s	Kapazitätserweiterung des Downstream-Speichers	[ton _{EDC}]
l_t	Speicherlevel in Stunde t	[ton _{EDC}]
x_{max}	Jahreshöchstleistung	[MW]
$r_{Primär}$	Vermarktete Primärregelleistung	[MW]
Kalkulatorische Variablen		
C_{Total}	Totale Kosten	[Euro/Jahr]
C_{Var}	Variable Kosten	[Euro/Jahr]
C_{Fix}	Fixe Kosten	[Euro/Jahr]

Tabelle 7.1: Beschreibung der Variablen

Parameter	Beschreibung	Einheit	Wert (Basisszenario)
t	Stunde [1-8760]	h	
$R_{FlexMarkets}$	Erlöse aus Flexibilitätsmärkten (nicht Day-Ahead-Märkte)	[Euro/Jahr]	Ergebnis
$P_{ElHourly,t}$	Stündlicher Elektrizitätspreis ¹	[Euro/MWh]	Jahr 2015
N_{Var}	Variable Netzentgelte	[Euro/MWh]	0,2
Φ_{El}	Elektrizitätsintensivität des Prozesses	[MWh/ton _{EDC}]	2,1
N_{Fix}	Fixe Netzentgelte (für Maximalleistung)	[Euro/MW]	10000
$P_{ABLA\bar{V},Reserve}$	AbLaV Reserve Preis (SOL) ²	[Euro/MW]	26000
$P_{Primär,Reserve}$	Primärregelleistung-Leistungspreis	[Euro/MW]	180000
$r_{Primär,max}$	Max. Anteil der Prim.-Reserve an Kapazität ³	[%]	17,5 %
K	Installierte Prozesskapazität	[MW]	80
D_t	Nachfrage für Folgeprodukt	[ton _{EDC}]	37,62 (~79MW)
x_{min}	Minimale Produktionsstufe	[MW]	20 (25% von K+k)
\bar{L}	Oberes Speicherlimit	[ton _{EDC}]	10000
\underline{L}	Unteres Speicherlimit	[ton _{EDC}]	1000

Tabelle 7.2: Beschreibung der Parameter

¹ Von <https://open-power-system-data.org>
² Basierend auf Ausschreibungswerten von regelleistung.net, Wochenleistungspreise von 500 Euro/MW.

³ Annahme, dass technisch 3,5 MW präqualifiziert pro 2 Elektrolyseure a 10 MW präqualifiziert werden. Dies ist allerdings nur möglich solange auch alle weiteren Bedingungen erfüllt sind.

Tabelle 7.3: Beschreibung der Zielfunktion und Nebenbedingungen

Gleichung	Beschreibung
(1)	Zielfunktion (Erlöse werden abgezogen, da eine Minimierung)
(2)	Variable Kosten
(3)	Fixe Kosten
(4)	Erlöse aus anderen Märkten (AbLaV und Primärregelleistungsmarkt)
(5)	Beschreibung des Speicherzustands (Folgeperiode bestimmt sich aus bisherigem Speicherzustand sowie Exzess-/Unterproduktion)
(6)	Minimale und maximale Speichermenge
(7)	Speicherzustand am Jahresanfang und -Ende identisch (anderes ausgedrückt die Jahresproduktion muss der Jahresnachfrage entsprechen, der Speicher darf nicht „aufgezehrt“ werden).
(8)	Produktionsmenge muss größer als vermarktete AbLaV-Kapazität (oder mögliche Minimalproduktion x_{min}), aber kleiner als Elektrolysekapazität sein. Um Down-Regulation im Primärregelleistungsmarkt garantieren zu können, muss zwischen dem geplanten maximalen Day-Ahead Plan und der Elektrolysekapazität der Reserveabstand eingehalten werden.
(9)	Die vermarktete AbLaV-Menge muss größer als die Summe der gewählten Jahresmindestproduktion sein und der Menge der vermarkteten Primärregelleistung sein (sodass jederzeit nach unten reguliert werden kann).
(10)	Die Produktion muss geringer als die gewählte Jahreshöchstleistung sein. (Primärregelleistungsreserve wird ignoriert, da von Jahreshöchstlastberechnung ausgenommen).
(11)	Um Up-Regulation garantieren zu können, muss zwischen dem geplanten maximalen Day-Ahead Plan und der Elektrolysekapazität der Reserveabstand eingehalten werden.
(12)	Die Primärregelleistung kann nur einen maximalen Anteil der Gesamtleistung betragen (unter der Annahme, dass sonst die geforderten Rampen nicht erfüllt werden können).

Mathematische Ausformulierung der Zielfunktion und Nebenbedingungen (Entscheidungsvariablen sind fett markiert)

$$\min_{\{x_t | \forall t\}, l_t, k, s, r_{ABLAV}} C_{Total} = C_{Var} + C_{Fix} - R_{FlexMarkets} \tag{1}$$

u.d.N.

$$C_{Var} = \sum_t (P_{ElHourly,t} + N_{Var}) x_t \tag{2}$$

$$C_{Fix} = N_{Fix} x_{max} \tag{3}$$

$$R_{FlexMarkets} = P_{ABLAV,Reserve} r_{ABLAV} + P_{Primär,Reserve} r_{Primär} \tag{4}$$

$$l_t = l_{t-1} + \frac{x_t}{\Phi_{El}} - D_t, \forall t > 1 \tag{5}$$

$$\underline{l} \leq l_t \leq \bar{l}, \forall t \tag{6}$$

$$l_1 = l_{8760} \tag{7}$$

(8)

$$x_{Min} + r_{Primär} \leq r_{ABLAV} \tag{8}$$

$$x_t \leq x_{max} \tag{9}$$

$$x_{max} + r_{Primär} \leq K + k \tag{10}$$

$$r_{Primär} \leq K * r_{Primär,max} \tag{11}$$

$$\tag{12}$$

7.1.2 ANALYSEN

In diesem Teil werden zwei Fragestellungen analysiert. Zum einen die Frage, welche Auswirkungen der Auslastungsgrad auf die Flexibilitätsbereitstellung hat, und zum anderen, wie sich die Abwägung zwischen der Teilnahme an verschiedenen Flexibilitätsmärkten auf die Unternehmensentscheidungen auswirkt. Es wird bemerkt, dass in diesem Abschnitt ausschließlich Lastverschiebungen betrachtet werden, das heißt negative Produktionsanpassungen werden in jedem Fall nachgeholt. Des Weiteren wird die Kapazität des Prozesses, sowie des Speichers als exogen festgelegt betrachtet.

7.1.3 EINFLUSS VON AUSLASTUNGSGRAD AUF FLEXIBILITÄTSBEREITSTELLUNG

In diesem Abschnitt wird zur Illustration von Flexibilitätsbereitstellung vereinfachend ausschließlich die Flexibilitätsbereitstellung am Day-Ahead-Markt (für das Basisjahr 2015) in Abhängigkeit vom Auslastungsgrad betrachtet, d.h. eine Bereitstellung an Regelenenergiemärkten oder dem Markt für abschaltbare Lasten findet hier nicht statt, sondern wird separat im folgenden Abschnitt betrachtet.

Der Auslastungsgrad ist hier definiert als Anteil der Stunden eines Jahres, in der ein Prozess an seiner Prozessgrenze produzieren muss, um die (exogen) vorgegebene Jahresproduktion zu erfüllen. Ein Auslastungsgrad von geringer als 100 % kann z.B. durch eine temporäre ökonomisch bedingte geringere Auslastung vorliegen³, oder auch durch geplante Überkapazitäten entstehen (z.B. um Produktionsausfälle auffangen zu können, oder saisonale Unterschiede in der Nachfrage auszugleichen).

³ Hier wird als Referenz zur Vereinfachung eine Auslastung von 100 % bei 8.760 Stunden im Jahr angenommen – häufig ist diese jedoch auch bei Prozessen der Grundstoffindustrie niedriger, z.B. aufgrund von mehrwöchigen Revisionszeiten, welche hier nicht berücksichtigt wurden.

Abbildung 7.2 stellt die variablen Strombeschaffungskosten (d.h. die Kosten pro verbrauchter Megawattstunde) in Abhängigkeit vom Aus-

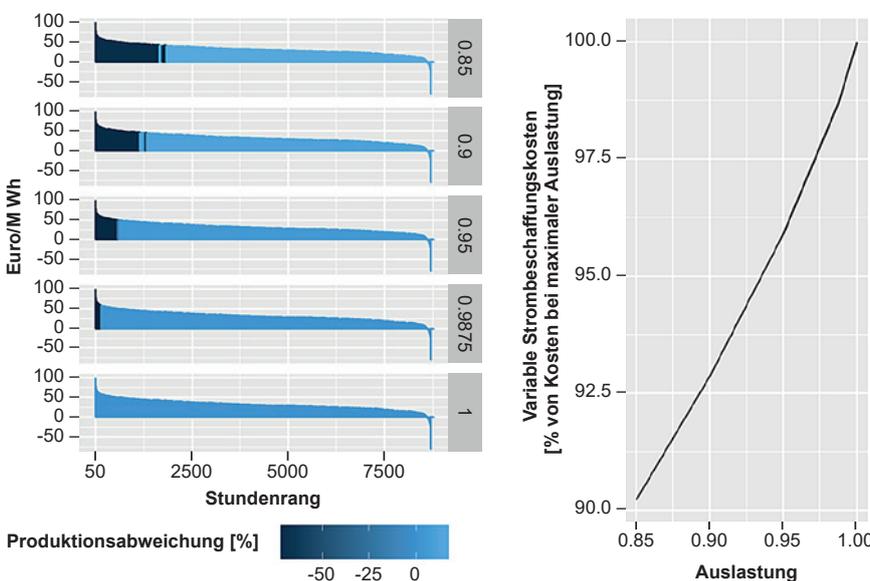
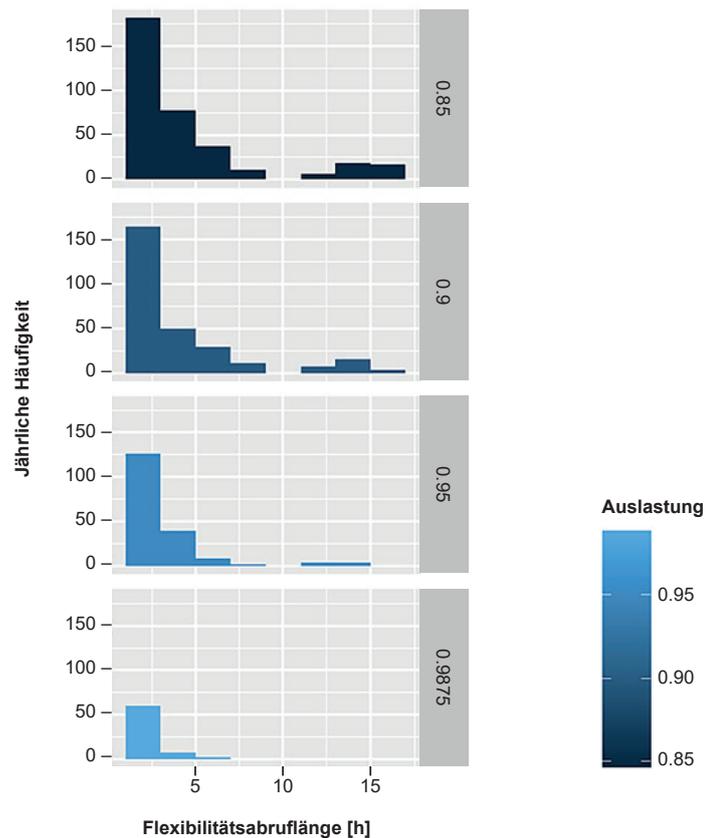


Abbildung 7.1 (links): Preisdauerlinie mit Produktionsanpassung in Abhängigkeit des Auslastungsgrades

Abbildung 7.2 (rechts): Variable Strombeschaffungskosten in Abhängigkeit des Auslastungsgrads. Diese machen nur einen Teil der gesamten Strombeschaffungskosten aus.

Abbildung 7.3: Flexibilitätsabruflänge in Abhängigkeit des Auslastungsgrades



lastungsgrad des Produktionsprozesses dar. Wie deutlich wird, sinken mit absinkender Auslastung die variablen Strombeschaffungskosten, allerdings in geringerem Maße mit abnehmender Auslastung, sodass bei einer Auslastung von 85 % ca. 92 % der üblichen variablen Strombeschaffungskosten anfallen (hier werden nur Großhandelskosten und variable Netzkosten betrachtet). Abbildung 7.1 erklärt das Sinken der Grenzerträge für geringere Auslastungen: Es sind für die Preisdauerlinie des Jahres 2015 die Produktionsabweichungen je nach Auslastungsgrad (in den Reihen der Abbildung) dargestellt (eine kontinuierliche Produktion zum selben Niveau hat einen Wert von 0 und dient als Benchmark für Anpassungen). Negative Produktionsabweichung sind als dunkler dargestellt, positive Abweichungen heller. Wie deutlich wird vermeidet die Produktion die teuersten Stunden des Jahres. Da relativ wenige Stunden überproportional teuer sind, bringen auch vergleichsweise kleine Abweichungen vom Auslastungsgrad 100 % relativ große Einsparungen.

Eine weitere Charakteristik von Nachfrageflexibilität wird ebenfalls in Abbildung 7.1, insbesondere bei einem Auslastungsgrad von 85 %, deutlich: Es können bei einem begrenzten Speicher nach Rang nicht alle teuersten Stunden des Jahres vermieden werden (die „helle Lücke“ deutet auf eine Produktion hin, obwohl günstigere Stunden über das Jahr verfügbar wären), da teilweise relativ lange Hochpreisperioden auftreten, welche die Kapazität des Speichers erschöpfen (der in dem hier betrachteten Prozess mit 10 Tagesproduktionen relativ hoch angesetzt ist). In zukünftigen Jahren könnte sich dieser Effekt durch das Auftreten längerer Hochpreisperioden („Dunkelflauten“) verstärken, welches das Sinken der Grenzerträge bei geringeren Auslastungsgraden verringern würde.

Abbildung 7.3 stellt die jährlichen (ununterbrochenen) negativen Flexibilitätsabrufmengen dar. Es wird deutlich, dass kurze Flexibilitätsabrufe deutlich häufiger auftreten als längere Perioden. Im Falle von einer 90 % Auslastung treten Abrufe von kürzer als 2 Stunden fast jeden zweiten Tag auf, während Abrufe von länger als 15 Stunden nur wenige Male im Jahr auftreten. Längere Abrufdauern nehmen mit geringeren Auslastungsgraden relativ gesehen stärker zu, da nur über hinreichend positive Flexibilität der Speicher nach einer längeren Abrufdauer hinreichend schnell gefüllt werden kann, um hohe Preisperioden auszugleichen.

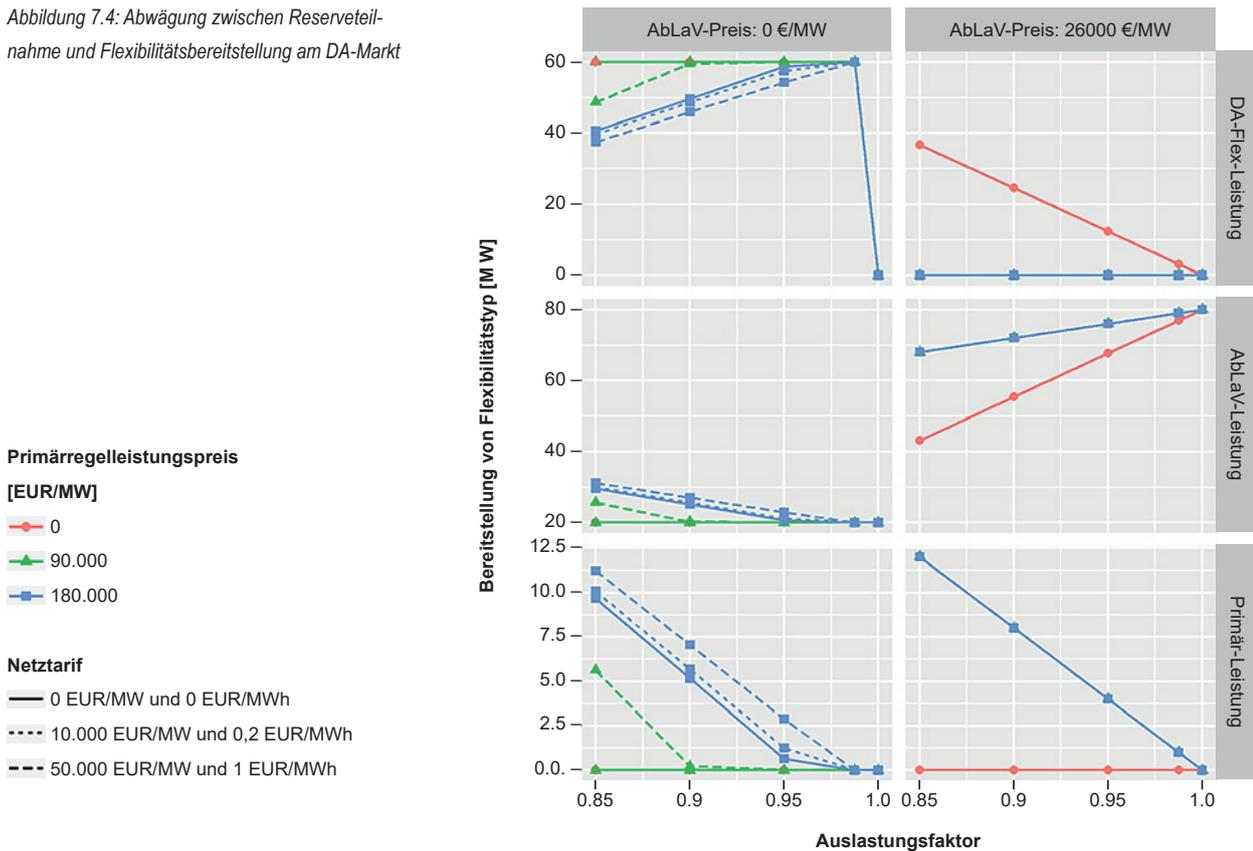
7.1.4 DIE ABWÄGUNG ZWISCHEN RESERVETEILNAHME UND FLEXIBLER BESCHAFFUNG AM MARKT

In einem zweiten Schritt soll die Abwägung zwischen der Bereitstellung von Flexibilität in verschiedenen Märkten stattfinden (Preise am Day-Ahead Markt, im Primärregelleistungsmarkt und AbLaV-Markt werden als exogene Parameter angenommen). Zu diesem Zweck wird ein einfacher Indikator für die Flexibilitätsbereitstellung am Day-Ahead-Markt definiert, welcher vergleichbar in Einheit und Bedeutung zu der bereitgestellten Leistung im Regenergiemarkt und in der Abschaltbare Lastung Verordnung (AbLaV) ist.

Zu diesem Zweck ist die DA-Flex-Leistung als die Differenz zwischen der jährlichen maximalen und minimalen Leistungsabfrage (in MW) am Day-Ahead-Markt definiert. Diese wird verglichen mit der vermarkteten AbLaV-Leistung (welche der Minimallast entspricht, da diese die vermarktete AbLaV-Leistung darstellt), sowie mit der vermarkteten Primärregelleistung. Abbildung 7.4 stellt die vermarkteten Leistungen an den verschiedenen Märkten unter zwei AbLaV-Preisszenarien und 3 Primärregelleistungspreisszenarien dar. Die aktuelle Marktsituation ist für eine realistische Auslastung von 98,75 % hervorgehoben. Unter aktuellen Bedingungen ist die profitabelste Variante die (geringe) verfügbare Flexibilität als Primärregelleistung und in der AbLaV-Reserve zu vermarkten und nicht in den Day-Ahead Markt einzubringen. Das bedeutet konkret die Anlage (bis auf Abweichungen durch Bereitstellung der Primärregelleistung) 1 MW unter der Maximalleistung laufen zu lassen, und diese 1 MW dann als Primärregelleistung zu vermarkten (da die Produktdefinition eine symmetrische Regelung nach oben und unten verlangt). Da die Verordnung zu abschaltbaren Lasten [2] explizit keine Abschaltleistung bei gleichzeitiger Erbringung von Primärregelleistung erfordert, kann die verbliebene Kapazität über den AbLaV-Markt angeboten werden. Bei dem aktuellen AbLaV-Preislevel von 26.000 EUR/MW setzt sich diese Symbiose zwischen Primärregelleistungsvermarktung und Erbringung von abschaltbarer Leistung über alle (untersuchten) Auslastungsgrade und positiven Primärregelleistungspreise hinweg durch. Nur bei einem Primärregelleistungspreis von null verringert sich die vermarktete Leistung von abschaltbaren Lasten und etwas Flexibilität wird im Day-Ahead-Markt verkauft.

Im Falle, dass kein AbLaV-Leistungspreis existiert (die Minimalleistung könnte theoretisch weiterhin aufgrund des Arbeitspreises vermarktet wer-

Abbildung 7.4: Abwägung zwischen Reserveteilnahme und Flexibilitätsbereitstellung am DA-Markt



den), zeigt das Modell, dass ein Gleichgewicht zwischen der Teilnahme an der Primärregelungsreserve und der flexiblen Beschaffung am Day-Ahead-Markt existiert. Es wird nicht sämtliche mögliche Flexibilität am Primärregelungsmarkt vermarktet, sondern auch in den Day-Ahead-Markt eingebracht. Da dort fallende Grenzerträge vorliegen (nach der Vermeidung der teuersten Stunden ist der Ertrag zusätzlicher Flexibilität geringer), stellt sich ein Entscheidungsgleichgewicht ein. Dieses wird durch die Leistungskomponente der Netzentgelte beeinflusst, da Lastspitzen durch Erbringung von Primärregelung nicht zur Ermittlung der Jahreshöchstlast verwendet werden [3], und da eine ähnliche Ausnahmeregelung für eine kurze Lasterhöhung im Day-Ahead-Markt nicht vorliegt, welche den effektiven Primärregelungspreis positiv beeinflusst.

7.2 WIRTSCHAFTLICHER REFERENZPROZESS FÜR SAISONALE AUSLASTUNGSGRAD MIT SPEICHERN (ZEMENT)

Als zweiter Referenzprozess zur wirtschaftlichen Betrachtung wird die Zementmahlung betrachtet, welche detailliert im Kapitel 4.2.2 beschrieben ist (der Prozess der vorgelagerten Rohmahlung wird in diesem Abschnitt nicht betrachtet). Im Gegensatz zu der Chlor-Alkali-Elektrolyse, zeichnet sich die Zementmahlung durch geringere Auslastungsgrade und damit diskontinuierlicher Fahrweise aus, welche jedoch starken saisonalen Schwankungen unterliegt (s. h. Kapitel 4.4.2). Auch unterliegt der Prozess durch seine technischen Parameter gewissen Einschränkungen, welche ebenfalls die Flexibilitätsbereitstellung einschränken könnten.

Des Weiteren werden Zementmühlen häufig im Nachtschichtbetrieb eingesetzt, und eine Erweiterung auf den ganztägigen Schichtbetrieb würde zusätzliche Fachkräfte benötigen (s. h. Kapitel 4.6.5).

In diesem Abschnitt wird das wirtschaftliche Potential zur Kostenreduktion der Strombeschaffung durch eine Flexibilisierung der Zementmahlung vor dem Hintergrund der saisonalen Schwankungen, der technischen sowie Nachtschichtbeschränkung, mithilfe eines numerischen Modelles analysiert. Darüber hinaus wird ebenfalls der Einfluss einer beschränkten Voraussicht, d.h. eines eingeschränkten Planungshorizontes von wenigen Tagen statt eines Jahres analysiert.

7.2.1 MODELLBESCHREIBUNG

Das Modell ist als Kostenminimierung⁴ der Strombeschaffungskosten der Zementmahlung (technisch angelehnt an das Modell 1 des VDZ, beschrieben im Kapitel 4.4) am Day-Ahead-Markt formuliert. Das heißt, dass nur der variable Teil des Strompreises, welcher durch den Strommarkt bestimmt ist, im Modell und in den dargestellten Kosten abgebildet ist. Der von den Unternehmen zu zahlende Strompreis beinhaltet jedoch weitere Komponenten, wie Netzentgelte, Umlagen und Steuern, welche je nach Unternehmen, Anschlussort und Ausnahmeregelungen⁵ abweichen können und typischerweise zeitlich nicht variabel sind. Obwohl diese Kostenbestandteile für die Unternehmen damit von großer Bedeutung sind, können sie für das Problem der Produktionsplanung ignoriert werden, da hier nur zeitlich variable Bestandteile des Strompreises betroffen sind, und die restlichen Strompreiskomponenten von der Produktion meist nicht betroffen sind⁶. Des Weiteren können durch Wechsel von Schichtplanungen, sowie durch Abnutzungserscheinungen durch die geänderte Fahrweise Kosten auftreten, die in diesem Modell nicht erfasst werden. Es zeigt primär die möglichen Einsparungen am vortägigen Großhandelsmarkt für Strom unter Berücksichtigung von technischen und praktischen Einschränkungen auf.

Das Modell beschreibt die Zementmahlung als diskreten, steuerbaren Produktionsprozess von 4 Mühlen mit nachgelagertem Speicher. Jede Mühle ist entweder komplett an, oder aus. Das Modell berücksichtigt dabei zusätzlich zwei weitere wesentliche technische Einschränkungen: Zum einen Minimumanzeiten von 4 Stunden kontinuierlichen Betriebes, welcher nicht unterbrochen werden darf (da ansonsten Auswirkungen auf die Produktqualität auftreten, s. h. Kapitel 4.6.2) und zum anderen Speicherbegrenzungen durch die Silos, in welchen der Zement zwischen Produktion und Lieferung gelagert wird. Der Einfluss der vorausgegangenen Rohmahlung, sowie möglicher Lagerbeschränkungen des Rohzementes werden hier aus Vereinfachungsgründen nicht berücksichtigt.

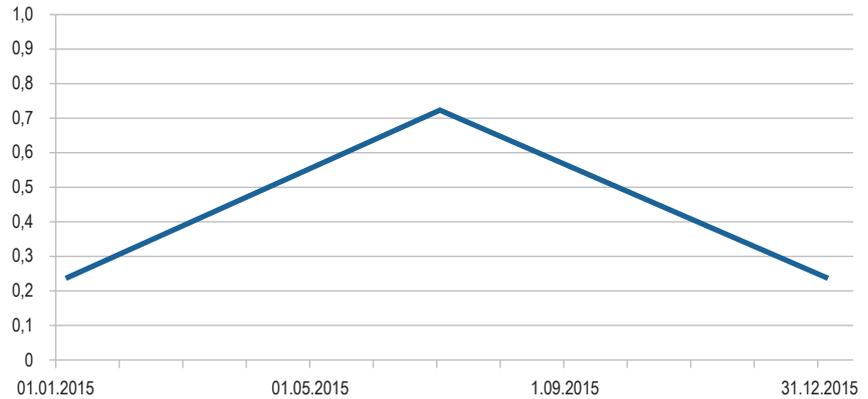
Das Modell minimiert die Strombeschaffungskosten über ein gesamtes Jahr, und kann ebenfalls als rollierendes Problem mit eingeschränktem Planungshorizont gelöst werden. Dies bedeutet, dass das Modell zur Lösung des Problems nur einen eingeschränkten Planungshorizont als Entscheidungsgrundlage hat, und so keine perfekte Voraussicht auf das gesamte Jahr vorliegt. Rollierend bedeutet, dass sich überschneidende

⁴ Als gemischt-ganzzahliges Minimierungsproblem, d.h. manche Variablen können kontinuierliche Lösungen annehmen, während für andere nur eine eingeschränkte Anzahl von diskreten Lösungen möglich ist, was nützlich ist um z.B. An- oder Auszustände eines Prozesses zu modellieren.

⁵ Z.B. durch die Befreiung von der EEG-Umlage für stromkostenintensive Unternehmen.

⁶ Mit Einschränkungen: Netzentgeltregelungen, sowie Ausnahmeregelungen können von Lastspitzen und Volllaststunden abhängigen. Wir nehmen an, dass diese Beschränkungen hier eingehalten werden, sodass sich diese Strompreisbestandteile in der Analyse nicht ändern.

Abbildung 7.5: Stilisierte saisonale Zementnachfrage



Optimierungshorizonte verwendet werden. So werden mit 3 Tagen Voraussicht Entscheidungen getroffen, wobei nur die ersten 2 Tage fix geplant werden, und der letzte Tag Teil einer neuen 3 Tages-Optimierung ist.

Es ist ebenfalls eine vereinfachte Nachtschicht-Beschränkung implementiert um einen stellvertretenden Referenzfall für die Flexibilisierung der Zementmahlung zu etablieren: Hier wird die tägliche Produktionsmenge soweit wie möglich auf Nachtstunden eingeschränkt. Präziser werden für jeden Tag die nötigen Volllaststunden ermittelt, um die Tagesnachfrage zu erfüllen (d.h. im Sommer sind es ca. 22 Volllaststunden und im Winter nur ca. 7). Die Nachtschicht einschränkung erlaubt dem Modell dann nur in den Volllaststunden symmetrisch um 2:00 Uhr nachts zu produzieren (also im Winter von 22:00 bis 5:30 Uhr, und im Sommer von 15:00 bis 13:00 Uhr des nächsten Tages).

Vereinfachend wird zudem eine kontinuierliche Zementnachfrage angenommen, welche über das Jahr von ca. 30 % der Mühlenkapazität im Winter, auf 90 % im Sommer variiert wird (ca. 59 % Gesamtauslastung). Dies ist an die genaueren Daten des Kapitels 4.2.2 angelehnt.

Im Folgenden werden die wesentlichen Modellparameter aufgelistet und die Modellbeschreibung formal präzisiert:

Tabelle 7.4: Beschreibung der Modellvariablen

Variablen	Beschreibung	Einheit
$u_{t,m}$	An-/Auszustand von Mühle m in Periode t	{0,1}
$v_{t,m}$	Startentscheidung von Mühle m in Periode t	{0,1}
$w_{t,m}$	Abschaltentscheidung von Mühle m in Periode t	{0,1}
l_t	Speicherlevel in Stunde t	[ton _{Zem}]
x_{max}	Jahreshöchstleistung	[MW]
Kalkulatorische Variablen		
C_{Total}	Totale Kosten	[Euro/Jahr]
C_{Var}	Variable Kosten	[Euro/Jahr]
C_{Fix}	Fixe Kosten	[Euro/Jahr]

Parameter	Beschreibung	Einheit	Wert (Basisszenario)
t	Stunde [1-8760]	h	
m	Mühle		
$P_{ElHourly,t}$	Stündlicher Elektrizitätspreis ¹	[Euro/MWh]	Jahr 2015
D_t	Zementnachfrage	[ton _{Zem}]	Stilisiert
φ_{El}	Elektrizitätsintensivität des Prozesses	[MWh/ton _{Zem}]	0,05
K_m	Mühlenkapazität	MW	2
\bar{L}	Oberes Speicherlimit	[ton _{Zem}]	3000 – 10000 (wird als Sensitivität variiert)
\underline{L}	Unteres Speicherlimit	[ton _{Zem}]	1000
τ_{Up}	Minimale Laufzeit	[h]	4
N_{Var}	Variable Netzentgelte	[Euro/MWh]	3,02
N_{Fix}	Fixe Netzentgelte (für Maximalleistung)	[Euro/MW]	50000

Tabelle 7.5: Beschreibung der Modellparameter

¹ Von <https://open-power-system-data.org/>

Gleichung	Beschreibung
(1)	Zielfunktion, welche sich aus variablen und fixen Kostenbestandteilen zusammensetzt. $\min C_{Total} = C_{Var} + C_{Fix}$
(2)	Variable Kosten, welche sich stündlich aus den variablen Preisen des Day-Ahead-Marktes, sowie den variablen Netzentgelten multipliziert mit dem Stromverbrauch der angeschalteten Mühlen zusammensetzt und über das Jahr (oder die rollierende Optimierungsperiode) summiert wird. $C_{Var} = \sum_t ((P_{ElHourly,t} + N_{Var}) \varphi_{El} \sum_m u_{t,m})$
(3)	Fixe Stromkosten (Leistungsbestandteil des Netzentgeltes). $C_{Fix} = N_{Fix} x_{max}$
(4)	Beschreibung des Speicherzustands (der Speicherzustand der Folgeperiode bestimmt sich aus dem bisherigem Speicherzustand, sowie Exzess-/Unterproduktion durch die Mühlen). $l_t = l_{t-1} + \frac{\sum_m Ku_{t,m}}{\varphi_{El}} - D_t, \forall t > 1$
(5)	Minimale und maximale Speichermenge: der Speicherzustand muss jederzeit größer-gleich als der Minimalspeicherzustand und kleiner-gleich der Silospeichergröße sein. $\underline{L} \leq l_t \leq \bar{L}, \forall t$
(6)	Nebenbedingung um minimale kontinuierliche Anzeiten zu erfüllen. Adaptiert von [1] $\sum_{i=t-\tau_{Up}+1}^t v_{i,m} \leq u_{t,m}, t \in [\tau_{Up}, 8760], \forall m$
(7)	Nebenbedingung um An- und Auschaltvorgänge an den An-/Auszustand der Mühlen zu koppeln. Adaptiert von [1] $u_{t,m} - u_{t-1,m} = v_{t,m} - w_{t,m}, \forall t, \forall m$
(8)	Die Produktion muss in allen Stunden geringer als die gewählte Jahreshöchstleistung sein. $\sum_m Ku_{t,m} \leq x_{max}, \forall t$

Tabelle 7.6: Mathematische Ausformulierung der Zielfunktion und Nebenbedingungen und deren Beschreibung

Die Nachtschicht-Begrenzung ist durch eine Festlegung der Variablen $u_{t,m} = 0$ für alle Stunden der Begrenzung implementiert (Beschreibung im Text oben).

7.2.2 ANALYSEN

QUANTIFIZIERUNG VON HEMMNISSEN (NACHTSCHICHT BESCHRÄNKUNG) AUF FLEXIBILITÄTSBEREITSTELLUNG

In diesem Abschnitt wird diskutiert, welche Auswirkungen praktische Hemmnisse auf die Bereitstellung von Flexibilität haben können. Abbildung 7.6 stellt die optimalen Produktionsentscheidungen über die Preisdauerlinie über ein Jahr hinweg dar (hellblau: Einsatz der Mühlen, dunkelblau: Mühlen ruhen). Auf der x-Achse sind die Stunden des Jahres absteigend sortiert nach den variablen Strompreisen am Großhandelsmarkt. Es lässt sich somit sehen, ob die Produktion in den günstigsten Stunden des Jahres stattfindet, oder aufgrund von technischen und praktischen Einschränkungen auch in teureren Stunden des Jahres produziert wird. Die genannten technischen Beschränkungen sind in allen Modellfällen erfüllt. Die Nachtschichtbeschränkung ist in der rechten Spalte aktiviert und in der linken Spalte nicht als Beschränkung enthalten. Zusätzlich sind für jede Kombination die Reduktion der Beschaffungskosten am vortägigen Großhandelsmarkt (kurz DA für Day-Ahead-Markt) angegeben (ausgehend von einem Basiswert von ca. 29 Euro/MWh). Diese machen aktuell ca. 40–70 % der Strombeschaffungskosten von Zementherstellern aus. Hinzu kommen weitere Komponenten wie Netzentgelte, Umlagen und Steuern, welche je nach Unternehmen, Anschlussort und Ausnahmeregelungen abweichen können, und unter Umständen zusammen mit den Marktpreisen in einem Vertrag gebündelt sind. Je nach Vertrag müssten mögliche Kosteneinsparungen zwischen Zementherstellern, Flexibilitätsdienstleistern und Energielieferanten geteilt werden.

Wie deutlich wird, schränkt die Nachtschichtbegrenzung die Möglichkeiten der Flexibilisierung erheblich ein, sodass auch mit größeren Speichern nur geringe Einsparungen von unter 0,5 % erreicht werden könnten. Ohne Nachtschichtbegrenzung könnten die Beschaffungskosten am Stromgroßhandelsmarkt deutlich stärker reduziert werden, um ca. 11,85 % im Falle eines kleineren Speichers von ca. 3.000 Tonnen (wovon nur 2.000 Tonnen genutzt werden können), bis zu 15,3 % im Falle eines 20.000 Tonnen Silos.

Die Preisdauerlinie mit Produktionszeiten zeigt, auf welche Weise die Einsparungen erreicht werden: Im Fall der Nachtschichtbegrenzung sind unabhängig von der Speichergröße die Produktionszeitpunkte gleichmäßiger über das Jahr hinweg verteilt, wobei bereits jetzt, aufgrund der Nachtschichtproduktionen, die größten Spreisspitzen vermieden werden, da diese typischerweise tagsüber auftreten (in Zukunft gilt diese Regel bei höheren Anteilen erneuerbarer Energien nicht mehr zwangsläufig). Im Falle einer flexiblen Fahrweise werden Kosten einerseits durch Vermeidung teurer Stunden, aber ebenfalls durch eine konsequente Ausnutzung von Niedrig- und Negativpreisperioden erreicht (s. h. das im Falle der flexiblen Fahrweise negative Preise fast vollständig ausgenutzt werden, während dies im Falle einer Nachtschichtbegrenzung nicht geschieht).

Im Rahmen des Berichts, werden die Längen der Abrufdauer als Charakterisierung von verschiedenen Abruftypen verwendet. Durch die Fokussierung auf den vortägigen Großhandelsmarkt, kann das Anfor-

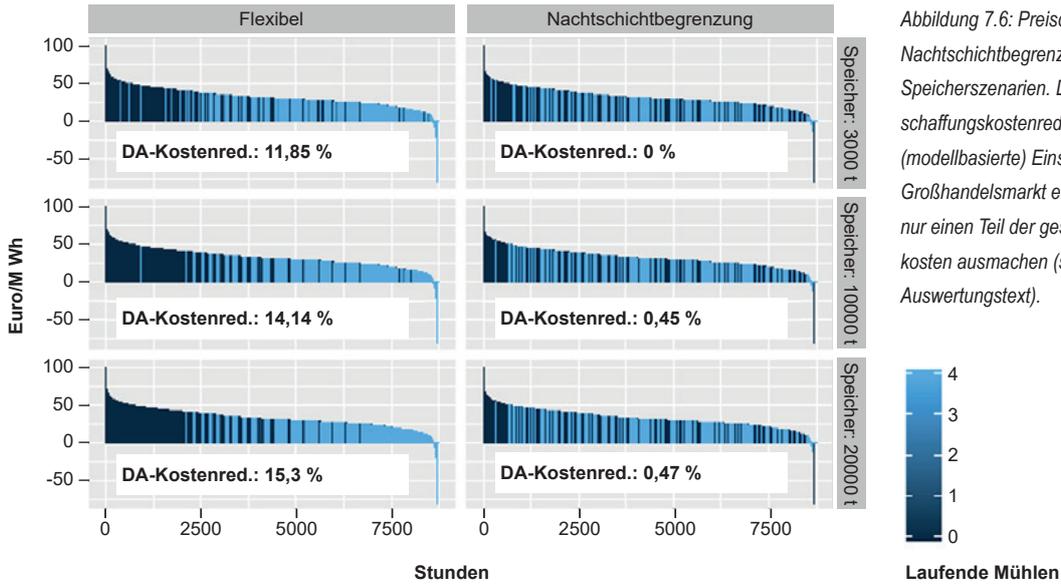


Abbildung 7.6: Preisdauerlinien mit und ohne Nachtschichtbegrenzung unter verschiedenen Speicherszenarien. Die angegebenen Strombeschaffungskostenreduktionen beziehen sich auf (modellbasierte) Einsparungen welche am vortägigen Großhandelsmarkt erreicht werden könnten, und nur einen Teil der gesamten Strombeschaffungskosten ausmachen (s.h. Modellbeschreibung und Auswertungstext).

derungsprofil 1 mit kurzen Abrufdauern von 15 Minuten im Rahmen dieses Abschnitts nicht untersucht werden. Dagegen können längere Abrufdauern von Anforderungsprofil 2 (mehrere Stunden) und Anforderungsprofil 3 (mehrere Tage) gut untersucht werden. Abbildung 7.7 stellt die Verteilung der kontinuierlichen Produktionsstillstände über das Jahr hinweg dar (Die Abbildung ist in dem Sinne zu interpretieren, dass ein ca. 62-stündiger Produktionsstillstand einmal im Jahr im flexiblen Szenario mit 10.000 t Speicher auftritt). Wie deutlich wird treten längere Stillstände nur im Rahmen einer komplett flexiblen Produktionsweise auf, während die Nachtschichtbegrenzung dazu führt, dass jeden Tag produziert werden muss. Bei aktuell üblichen Silogrößen von ca. 3.000 Tonnen werden hauptsächlich kürzere Flexibilitätsfenster von wenigen Stunden, die dem Anforderungsprofil 2 zuzuordnen sind, angeboten. Bei größeren Silokapazitäten und aktuellen Preisen steigen die Abruflängen vereinzelt auf mehrere Tage an, was die langfristige Perspektive der Zementmahlung verdeutlicht auch ohne Produktionsausfälle das Anforderungsprofil 3 bedienen zu können.

⁷ Der Durchschnitt wird über ein Jahr gebildet.

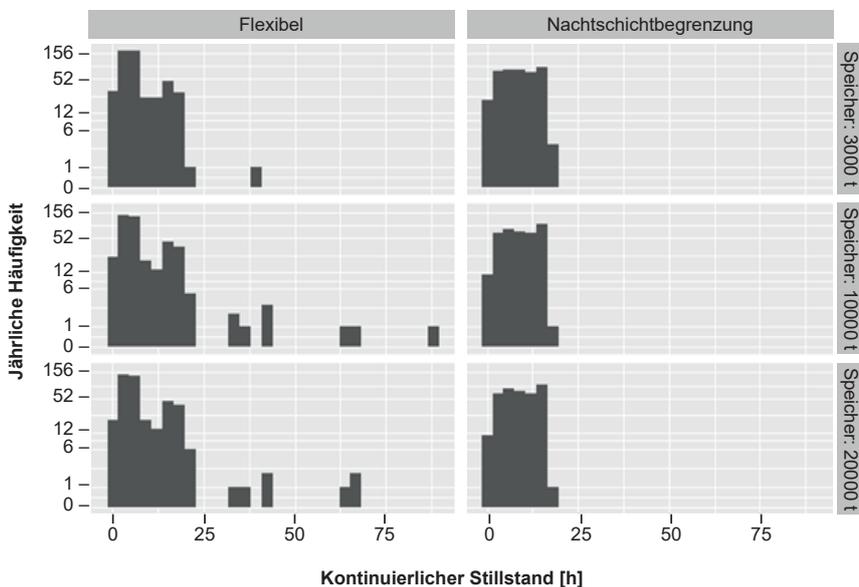


Abbildung 7.7: Kontinuierliche Stillstände in der Zementmahlung

Abbildung 7.8: Durchschnittliche tägliche Produktionszeitpunkte

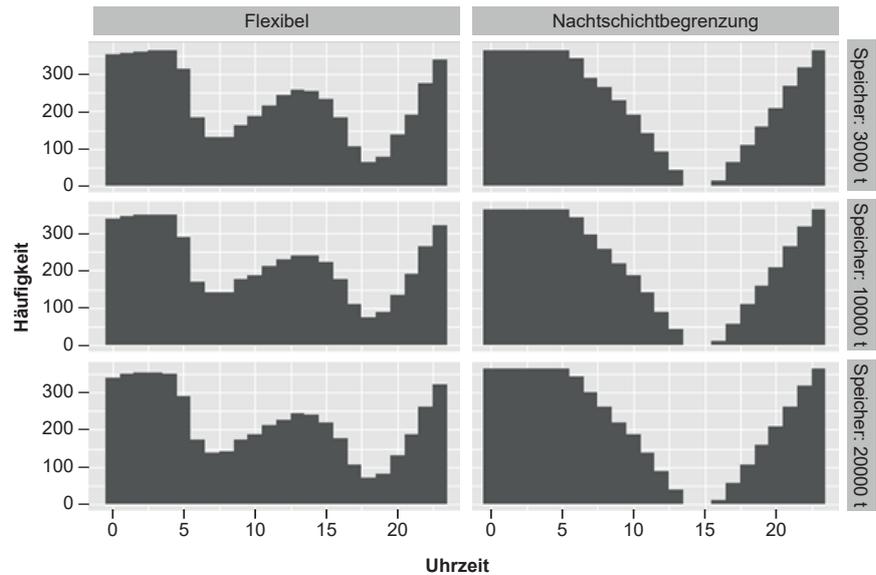


Abbildung 7.8 zeigt die durchschnittlichen⁷ täglichen Produktionszeitpunkte in den verschiedenen Szenarien. Während in der Nachtschichtbegrenzung hauptsächlich nachts, und nur in den Sommermonaten tagsüber produziert wird, ist in dem Szenario ohne Nachtschichtbegrenzung eine Produktion in der Mittagszeit üblich, welche sich durch die niedrigen Mittagspreise in den Sommermonaten durch PV-Produktion erklären lässt.

EINFLUSS DES PLANUNGSHORIZONTES

Da in der Realität im Gegensatz zu Modellen keine vollständige Information vorliegt, und mit Unsicherheit zu rechnen ist, stellen die oben ermittelten Werte eine obere Abschätzung der möglichen Kostenreduktionen am Stromgroßhandelsmarkt dar. Aus diesem Grund wurde ebenfalls eine Sensitivitätsanalyse bezüglich des Planungshorizontes, bzw. der Voraussicht durchgeführt. Hierbei wurde, wie in der Modellbeschreibung dargestellt, ein rollierendes Modell benutzt. Hierbei ist der Planungshorizont die Information, die dem Modell zur Verfügung steht. Hierbei wird nur für 75 % des Planungshorizont fixe Entscheidungen getroffen, während die restlichen Informationen zwar verwendet werden, jedoch erst in der folgenden Optimierungsperiode Fahrpläne erstellt werden.

Abbildung 7.9 stellt die Einsparmöglichkeiten am vortägigen Stromgroßhandelsmarkt (welcher nur einen Teil der gesamten Strombeschaffungskosten ausmacht, s.h. Modellbeschreibung) in Abhängigkeit der Speichergröße und des Planungshorizontes dar (die bisher dargestellten Ergebnisse beziehen sich auf den jährlichen Planungshorizont). Wie deutlich wird, nimmt das Potential zur Kostenreduktion am Stromgroßhandelsmarkt mit kürzeren Planungshorizonten ab. Die Unterschiede sind jedoch bei einer kleineren Speichergröße von 3.000 Tonnen deutlich markanter, und zeichnen sich insbesondere zwischen einer Reduktion des Planungshorizontes von 7 auf 5 Tage ab, welches die möglichen Einsparungen am Stromgroßhandelsmarkt von ca. 9,4 % auf ca. 3,8 % reduziert. Diese starke Reduktion des Einsparpotentials tritt bei größeren Speichern in einem nur kleineren Umfang auf (bei einem Speicher von 20.000 Tonnen reduzieren sich die möglichen Kostenreduktionen am Stromgroßhandelsmarkt lediglich von ca. 15,3 % auf 11,6 %).

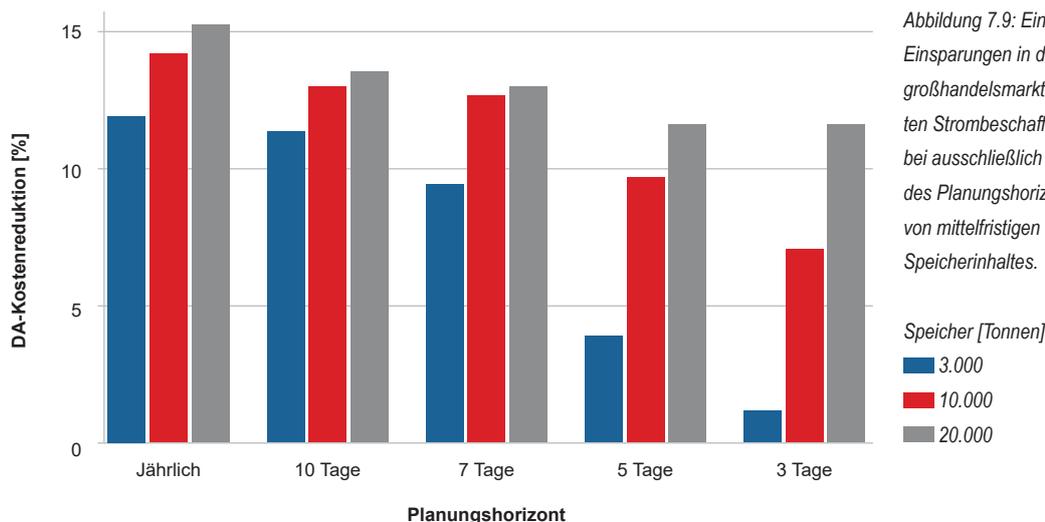


Abbildung 7.9: Einfluss des Planungshorizontes auf Einsparungen in der Strombeschaffung am Stromgroßhandelsmarkt (welche nur einen Teil der gesamten Strombeschaffungskosten betreffen, s.h. Text), bei ausschließlich kurzfristiger Optimierung innerhalb des Planungshorizontes und Nichtberücksichtigung von mittelfristigen Opportunitätskosten des Speicherinhaltes.

Es ist jedoch zu bemerken, dass die vorliegende Sensitivitätsanalyse die Realität unzureichend widerspiegelt, da innerhalb des Planungshorizontes perfekte Information, jedoch außerhalb des Planungshorizontes keinerlei Informationen, und auch keine Opportunitätskosten für zukünftige Planungsperioden angenommen werden. Damit reagiert das Modell selbst auf kleinste Preisunterschiede innerhalb von z.B. 3 Tagen und nutzt den Speicher soweit wie möglich aus, um Einsparungen zu realisieren. In der Realität liegen jedoch (ungewisse) Informationen außerhalb des Planungshorizontes vor. So können die Preisunterschiede innerhalb eines begrenzten Planungshorizontes mit typischen Preisunterschieden verglichen werden, und so ein größerer Anteil des Speichers vorgehalten werden, wenn die aktuellen Preisunterschiede relativ klein sind, oder aus wöchentlichen und saisonalen Mustern Erwartungen abgeleitet werden können.

Das Ergebnis zeigt die Wichtigkeit von hinreichend dimensionierten Speichern und mittelfristig guten Prognosen, welche die Flexibilitätsbereitstellung erleichtern.

7.3 LITERATURVERZEICHNIS

- [1] G. Morales-España, J. M. Latorre and A. Ramos, Tight and Compact MILP Formulation of Start-Up and Shut-Down Ramping in Unit Commitment, in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 28, no. 2, pp. 1288–1296, May 2013. doi: 10.1109/TPWRS.2012.2222938
- [2] Verordnung zu abschaltbaren Lasten vom 16. August 2016 (BGBl. I S. 1984), die zuletzt durch Artikel 9 des Gesetzes vom 22. Dezember 2016 (BGBl. I S. 3106) geändert worden ist, § 7 (1)
- [3] Bericht der Bundesnetzagentur zur Netzentgeltsystematik Elektrizität, Stand Dezember 2015



KAPITEL 8

BRANCHENÜBERGREIFENDE AUSWERTUNG

Christa Dufter, Anna Gruber, Andrej Guminski, Serafin von Roon,
Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH, München

Karin Arnold, Georg Holtz,
Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH, Wuppertal

Jörn Richstein, Karsten Neuhoff,
Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung e.V., Berlin

Clara Orthofer,
Technische Universität München, Lehrstuhl für Energiewirtschaft
und Anwendungstechnik, München

Dieses Kapitel fasst die zentralen Ergebnisse der branchenspezifischen Betrachtungen aus den branchenspezifischen Kapitel 2 bis Kapitel 6 zusammen und vergleicht diese branchenübergreifend.

Die Grundstoffindustrien produzieren innerhalb spezifischer Rahmenbedingungen, die Auswirkungen auf die Flexibilisierungsmöglichkeiten der ausgewählten Prozesse haben. Diese lassen sich branchenübergreifend wie folgt zusammenfassen:

- **Hohe Auslastung und bestehende Lieferverpflichtungen:** Die Prozesse der Grundstoffindustrien sind auf eine hohe Auslastung hin optimiert, und die Nachfrage nach ihren Produkten ist derzeit i. d. R. gegeben. Längere/häufigere Stillstände würden daher zu Verletzungen von Lieferverpflichtungen oder entgangenen Aufträgen führen.
- **Technische Prozessführung:** Einige Prozesse stehen aufgrund technischer Gegebenheiten nicht kontinuierlich für Lastflexibilisierungen zur Verfügung. Z. B. kann bei Hochtemperaturschmelzprozessen in vielen Fällen nicht in den Prozess eingegriffen werden, ohne das Schmelzaggregat und die Produktqualität zu gefährden.
- **Optimierte Prozesse:** Die ausgewählten Prozesse sind auf Energie- und Ressourcen(kosten)-Effizienz optimiert und werden i. d. R. im optimalen Betriebspunkt betrieben. Eine Abweichung aus dem optimalen Betriebspunkt zur Bereitstellung von Flexibilität führt automatisch zu einem Trade-off bzgl. der Effizienz. Die Zusammenhänge sind in vielen Fällen allerdings noch nicht quantifiziert. Hier besteht noch zusätzlicher Forschungs- und Entwicklungsbedarf.
- **Einbettung in Produktionsketten:** Die ausgewählten Prozesse sind teilweise eng in Produktionsketten eingebettet, so dass eine Flexibilisierung Auswirkungen auf die gesamte Produktionskette hätte. Speicher können dies z. T. nur in sehr begrenztem Umfang kompensieren (z. B. Chlor); in manchen Fällen ist das Produkt des Prozesses nicht speicherbar (z. B. flüssiger Stahl).
- **Personalplanung:** In einigen Industrien, die im Batch-Verfahren produzieren, könnte eine Flexibilisierung prinzipiell u. a. durch die Verschiebung der Produktion über mehrere Stunden bis Tage geschehen. Die Personalplanung benötigt für solch eine Verschiebung jedoch i. d. R. einen ausreichenden zeitlichen Vorlauf. Zudem entstehen ggf. zusätzliche Kosten (z. B. Bereitschaftsdienst, Personalaufstockung).

Die unter diesen Rahmenbedingungen identifizierten technischen Potenziale werden in Kapitel 8.1 genauer charakterisiert, und in Kapitel 8.2 an den in Kapitel 1.4 definierten Anforderungsprofilen gespiegelt. Ein großer Teil dieser Potenziale wird bisher nicht gehoben. Die Hemmnisse zur Hebung dieser verbleibenden Potenziale werden daher in Kapitel 8.3 betrachtet. Die Wirtschaftlichkeit von Flexibilität stellt dabei in vielen Fällen ein zentrales Hemmnis dar. Daher werden die in Kapitel 7 gewonnenen diesbezüglichen Erkenntnisse in Kapitel 8.4 zusammengefasst. Die Referenzprozesse per se sind jedoch nicht unveränderlich, sondern Gegenstand kontinuierlicher Optimierungs- und Entwicklungsprozesse. Die Ergebnisse der Analyse der flexibilitätsrelevanten Innovationsprozesse sind in Kapitel 8.5 zusammengefasst.

8.1 VERGLEICH DER TECHNISCHEN FLEXIBILITÄTSPOTENZIALE DER AUSGEWÄHLTEN PROZESSE

Im Folgenden werden die ausgewählten Prozesse hinsichtlich ihrer technischen Flexibilitätspotenziale und den entsprechenden Abrufdauern und -häufigkeiten verglichen. Die Potenziale beziehen sich hierbei auf die flexibilisierbare Last der aktuell installierten Anlagen unter heutigen Rahmenbedingungen. Ergänzend werden in Kapitel 8.4 zukünftige Potenziale – sogenannte Flexibilitätsperspektiven – behandelt (siehe den Abschnitt „Klare Abgrenzung der Betrachtungszeiträume“ in 1.1.1.3 für detaillierte Erläuterungen zu diesen Begriffen).

ELEKTROLICHTBOGENOFEN

Die folgenden Ausführungen beziehen sich auf ein voll ausgelastetes Werk mit Stranggussanlage. Elektrolichtbogenöfen verfügen über eine vergleichsweise hohe installierte Leistung. Die Schaffung eines Flexibilitätspotenzials durch eine Variation der Lichtbogenleistung während eines Schmelzzyklus ist nicht möglich, da die Leistung des Elektrolichtbogens (-ofen) in Abhängigkeit vom Schmelzprozess insbesondere am Ende eines Produktionszyklus immer im Bereich von 70–100 % variiert und der Arbeitspunkt des Elektrolichtbogenofens nicht beliebig gewählt werden kann. Der Elektrolichtbogenofen bietet daher ausschließlich ein Flexibilitätspotenzial zur Lastreduktion durch Unterbrechen des Prozesses, d.h. Ausschalten des Lichtbogens. Eine Unterbrechung/Ausschalten des Lichtbogens ist nur in der Aufschmelzphase möglich und darf nicht zum Ende der Chargenzeit erfolgen. Ein Flexibilitätspotenzial für Lastreduktion ergibt sich auch während der planmäßigen Unterbrechung des Prozesses beim Chargieren von Stahlschrott durch Verlängerung der Ausschaltzeiten und kurzzeitiger Verschiebung der Zykluszeit. Eine Lasterhöhung durch Verkürzung der Unterbrechungen ist allerdings nicht möglich.

Abrufe können für wenige Minuten innerhalb eines Zeitfensters erfolgen, das aus der geringfügig höheren Kapazität des Elektrolichtbogenofens gegenüber der nachgeschalteten Stranggussanlage resultiert. Im untersuchten Fall umfasst dieses Zeitfenster zwanzig Minuten bei störungsfreiem Betrieb je Acht-Stunden-Schicht. Das Zeitfenster ist primär als Puffer für Störzeiten gedacht und steht entsprechend nicht immer oder nur teilweise zur Verfügung. Längere Abrufe über dieses Zeitfenster hinaus sind hingegen nicht möglich. Da die Flexibilität nur während der Aufschmelzphase oder einer Unterbrechungen beim Chargieren abgerufen werden kann, ist die Verfügbarkeit der Flexibilität abhängig vom Ablauf des Schmelzprozesses und somit nur bedingt planbar. Prinzipiell können also mehrere Abrufe pro Tag erfolgen.

Zusätzliche Flexibilität besteht ggf. in nicht vollständig ausgelasteten Werken durch entsprechende Verschiebung der Produktionszeiten. Eine weitere Option ist die Erhöhung der Lichtbogenleistung, welche momentan noch in einem Forschungsprojekt untersucht wird.

BEHÄLTERGLASHERSTELLUNG – SCHMELZWANNE MIT ELEKTRISCHER ZUSATZHEIZUNG

Die (Behälter-)Glasherstellung ist ein über Jahre kontinuierlich laufender Prozess, der bei Einhaltung der Produktqualität keine Unterbrechung

der Prozesskette erlaubt. Insbesondere die schmelzführenden Teile (Glas-schmelzwanne und Zuführung der Schmelze zur Formgebung [Feeder]) verlangen eine möglichst konstante Energiezufuhr, um die Qualität der Glasprodukte sicher zu stellen, um die Entstehung von Glasfehlern zu minimieren und um die vorzeitige Schädigung der Anlagenteile zu verhindern.

Die Beheizung der Glasschmelzwannen erfolgt in der Regel mit Erdgas. Bei vielen Behälterglaswannen ist jedoch eine elektrische Zusatzheizung mit wenigen MW installierter Leistung vorhanden, durch die 5 % bis 15 % der zum Schmelzen benötigten Energie eingebracht werden. Die Leistungsaufnahme dieser Zusatzheizung kann um bis zu ca. 33 % der Anschlussleistung variiert werden. Eine beliebige Variation (vor allem ein einfaches An- und Ausschalten) ist praktisch nicht möglich, da der erforderliche elektrische Energieeintrag beim Schmelzen, bedingt durch Glasart und Glasfarbe sowie zur Erreichung eines höheren Durchsatzes, nur in gewissen Maße variabel ist.

Ab einer Abrufdauer von etwa fünf Minuten muss die Reduktion (Erhöhung) der Leistungsaufnahme der elektrischen Zusatzheizung durch eine entsprechende Erhöhung (Reduktion) des fossilen Energieeintrags ausgeglichen werden, um den maximalen Spielraum für Temperaturschwankungen der relevanten Prozesstemperaturen von ± 5 K einzuhalten. Abrufdauern sind in der Regel nur für weniger als eine Stunde möglich. Längere Abrufe wären prinzipiell durch Produktwechsel denkbar. Allerdings müssen in diesem Fall die Lieferverpflichtungen eine entsprechende Produktionsumstellung zulassen.

ROH- UND ZEMENTMAHLUNG

Die Flexibilitätspotenziale der Roh- und Zementmahlung werden für Werke mit und ohne eigene Klinkerproduktion (integrierte Werke bzw. Mahlwerke) separat ermittelt. Erstere verfügen über Roh- und Zementmahlung, letztere nur über Zementmahlung. Ein Teillastbetrieb ist in keinem der beiden Fälle möglich. Daher entspricht die flexible Leistung der installierten elektrischen Leistung der Mühlenantriebe, welche in Summe typischerweise weniger als 15 MW beträgt. Charakteristisch für die Zementindustrie ist die starke Saisonalität der Produktion, welche sich auch in der Verfügbarkeit von Flexibilität niederschlägt. Die größte Flexibilität ergibt sich bei mittlerer Auslastung, wenn innerhalb eines Tages einerseits Produktionszeiten geplant sind und andererseits geplante Stillstandzeiten existieren, in die die Produktion verschoben werden kann.

Positives Flexibilitätspotenzial entspricht einer Lastreduktion durch Abschalten der Mühlen. Dies ist für die Roh- und Zementmahlung sowohl kurzzeitig, als auch u. U. bis zu zwölf Stunden möglich. Im Vergleich zu den anderen untersuchten Prozessen können hier also längere Abrufdauern realisiert werden. Voraussetzung ist hierbei die saisonabhängige Möglichkeit zum Nachholen ausgefallener Produktion. Unter Berücksichtigung der Abrufdauer, Mindestbetriebsdauern von etwa vier Stunden und möglicher betriebsbedingter Sperrzeiten könnten Abrufe auch mehrmals täglich erfolgen. Die Zementmahlung könnte durch Anschalten der Mühlen theoretisch auch für die Bereitstellung von negativem Flexibilitätspotenzial genutzt werden. Allerdings sind hierfür ein entsprechender zeitlicher Vorlauf und aus Gründen der Qualitätssicherung des Produkts eine Betriebszeit von mindestens vier Stunden notwendig. Im Falle der Rohmahlung ist eine Lasterhöhung in der Regel nicht möglich.

CHLOR-ALKALI-ELEKTROLYSE

Ähnlich zu Elektrolichtbogenöfen sind auch Anlagen der Chlor-Alkali-Elektrolyse durch vergleichsweise hohe Anschlussleistungen gekennzeichnet. Eine Besonderheit der Chlor-Alkali-Elektrolyse ist ihre starke Einbindung in den Chemiapark. Aufgrund der unterschiedlichen Folgeprozesse können sich die Flexibilitätspotenziale zwischen den einzelnen Standorten daher deutlich unterscheiden. Darüber hinaus ist Chlor aufgrund gesetzlicher Vorgaben nur in begrenzten Mengen speicherbar. Eine weitere Besonderheit der Chlor-Alkali-Elektrolyse ist die erforderliche Mindestlast von ca. 50 % bezogen auf die installierte Leistung, um einen stabilen Betrieb der Anlage zu gewährleisten. Innerhalb des Intervalls zwischen Mindestlast und installierter Leistung ist prinzipiell jeder Betriebspunkt möglich. Allerdings sind die Rückkopplungen auf die Folgeprozesse zu berücksichtigen.

Die folgenden Auswertungen beziehen sich auf die Flexibilisierung durch Teillastbetrieb und die flexible Nutzung des Chlorspeichers. Aufgrund der hohen Auslastung der Anlagen von über 95 % ist eine Lasterhöhung in der Regel nicht möglich. Positives Leistungspotenzial kann hingegen für kurze Abrufdauern von rund 15 Minuten bereitgestellt werden. Trotz der hohen Anschlussleistung fällt die flexibilisierbare Leistung vergleichsweise gering aus. Dies ist ebenfalls auf die hohe Auslastung zurückzuführen, welche die Möglichkeiten für den Produktionsausgleich nach einer Lastreduktion deutlich einschränkt.

Darüber hinaus wird das Flexibilitätspotenzial maßgeblich durch die Verfügbarkeit speicherbarer Zwischenprodukte bestimmt. Im Falle der PVC-Produktion kann der EDC-Speicher zur Flexibilisierung der Chlor-Alkali-Elektrolyse genutzt werden. So können im Vergleich zu Prozessketten ohne speicherbare Zwischenprodukte sowohl höhere Leistungspotenziale für die Lastreduktion als auch Abrufdauern von bis zu mehreren Tagen erreicht werden. Eine Lasterhöhung ist jedoch auch in diesem Fall aufgrund der hohen Auslastung nicht möglich.

ROHSTOFFSCHMELZANLAGE

Rohstoffschmelzanlagen verfügen über eine recht niedrige Anschlussleistung von wenigen MW. Dementsprechend fällt auch die flexibilisierbare Leistung gering aus. Positives Flexibilitätspotenzial kann durch Teillastbetrieb von bis zu einer Stunde bereitgestellt werden. Für bis zu fünf Minuten ist sogar eine komplette Abschaltung der Anlage möglich. Dies kann bis zu sechs Mal täglich erfolgen. Durch eine Erhöhung der Leistungsaufnahme kann negatives Potenzial für bis zu 15 Minuten abgerufen werden. Länger dauernde Lasterhöhungen sind hingegen nicht möglich.

VERGLEICH DER TECHNISCHEN FLEXIBILITÄTSPOTENZIALE DER AUSGEWÄHLTEN PROZESSE

Tabelle 8.1 fasst die Ergebnisse der ausgewählten Prozesse zusammen. Für die flexible Leistung sind je nach Datenverfügbarkeit der Durchschnitt bzw. Median sowie der Bereich zwischen Minima und Maxima bezogen auf das Flexibilitätspotenzial einzelner Anlagen angegeben. Zusätzlich wird das auf Deutschland skalierte Flexibilitätspotenzial bestimmt. Hierfür wird von den Branchenvertretern je Prozess eine typische durchschnittliche Verfügbarkeit der Anlagen angenommen.

Der Vergleich der technischen Flexibilitätspotenziale zeigt, dass Lasterhöhungen generell nur in einzelnen Fällen durchgeführt werden können. Neben prozessspezifischen Restriktionen ist dies hauptsächlich auf die hohe Auslastung der Prozesse zurückzuführen. Elektrolichtbogenöfen und Chlor-Alkali-Elektrolysen sind durch hohe flexible Leistungen, dafür aber auch durch vergleichsweise kurze Abrufdauern gekennzeichnet. Eine Ausnahme bildet nur die PVC-Produktion, bei der durch Speicherung des EDC-Zwischenproduktes prinzipiell Abrufdauern über mehrere Tage möglich sind. Die Anschlussleistungen und damit auch die entsprechenden flexiblen Anteile von Anlagen der Roh- und Zementmahlung sind deutlich geringer. Dafür können hier jedoch sehr lange Abrufe von bis zu zwölf Stunden realisiert werden. Für Rohstoffschmelzanlagen Glasschmelzwannen sind vergleichsweise niedrige flexible Leistungen und mittlere Abrufdauern charakteristisch. Eine Flexibilisierung durch Teillastbetrieb ist nur im Falle der Chlor-Alkali-Elektrolyse, der Glasschmelzwanne und der Rohstoffschmelzanlage möglich.

Tabelle 8.1: Vergleich der technischen Flexibilitätspotenziale (positiv: Lastreduktion, negativ: Lasterhöhung) der ausgewählten Prozesse.

¹ Durchschnitt

² Median

³ Maximalwert für ein integriertes Werk entspricht der Summe aus Roh- und Zementmahlung

	Elektrolichtbogenofen	Glasschmelzwanne mit elektrischer Zusatzheizung	Roh- und Zementmahlung	Chlor-Alkali-Elektrolyse	Rohstoffschmelzanlage	
Randbedingungen	Stranggussanlage in ausgelastetem Werk	Kontinuierlicher Betrieb über bis zu mehr als 15 Jahre	Mahlwerk und integriertes Werk	Teillastbetrieb, Chlorspeicher, EDC-Speicher	Voll ausgelastete Anlage	
Teillastbetrieb	Nein	EZH: Ja	Nein	Ja	Ja	
Technisches Flexibilitätspotenzial	Durchschnitt¹/ Median²		eine große Mühle flexibel betrieben: Positiv: ca. 3 MW Negativ: ca. 3 MW	Positiv: 13 MW ² Negativ: 1 MW ²	Positiv: 0,3 MW Negativ: 0,2 MW	
	Bereich (Min – Max)		Positiv: 0-11 MW ³ Negativ: 0-8 MW ³	Positiv: 0-77 MW Negativ: 0-4 MW	Positiv: 0-4 MW Negativ: 0-0,5 MW	
	Potenzial für Deutschland (Anzahl Werke/ Anlagen Verfügbarkeit)	Positiv: 766 MW Negativ: – (26 52 %)	Positiv: 25 MW Negativ: 25 MW (≈60 ≤75 %)	je Werk eine große Mühle flexibel betrieben: Positiv: 172 MW Negativ: 172 MW (55 saisonabhängig)	Positiv: 421 MW Negativ: 15 MW (21 95 %)	Positiv: 23 MW Negativ: 3 MW (13 45 %)
	Abrufdauer	Wenige Minuten	Minuten	Bis zu 12 h abhängig von Betriebssituation und Produktvorrat ggf. länger möglich	Teillast: 15 Min. EDC-Speicher: bis zu mehreren Tagen	Positiv: 5-60 Min. Negativ: 15 Min.
	Abrufhäufigkeit	Mehrmals täglich	Je nach Abrufdauer, ggf. mehrmals täglich	Ggf. mehrmals täglich möglich	Mehrmals täglich	Mehrmals täglich
	Besonderheiten des Prozesses	Verfügbarkeit von Flexibilität nur bedingt planbar	Änderung der elektrischen Leistung muss durch Eintrag des fossilen Energieträgers substituiert werden	Starke Saisonalität; Mindestbetriebszeit von 4 h	Starke Einbindung in Prozessketten, Flexibilität abhängig von der Speicherbarkeit der Zwischenprodukte	Produktion in einem kontinuierlichen Chargenprozess

8.2 ERFÜLLBARKEIT DER ANFORDERUNGSPROFILE

Tabelle 8.2 gibt, basierend auf den Analysen in den Kapiteln 2 bis Kapitel 6, einen Überblick über die grundlegende Erfüllbarkeit der in Kapitel 1.4 definierten Anforderungsprofile durch die ausgewählten Prozesse der Grundstoffindustrien in ihrer derzeitigen Ausprägung. Es wird ersichtlich, dass diese zu großen Teilen nur zu bestimmten Zeiten (z. B. nur in bestimmten Phasen im Prozessverlauf) und nur für bestimmte Anforderungsprofile zur Bereitstellung von Flexibilität für den Strommarkt geeignet sind.

Tabelle 8.2: Grundlegende Erfüllbarkeit der Anforderungsprofile in Abstimmung mit dem Betriebsleiter bei aktueller hoher Auslastung, bestehenden Lieferverpflichtungen und ohne Investitionsmaßnahmen.

Branche	Prozess (Art der Prozesskette)	Anforderungsprofil 1 - Kurzfristige Anpassung der Last - Abrufdauer: 15 min - Vorankündigungszeit: wenige Minuten	Anforderungsprofil 2 - Verschieben der Last über mehrere Stunden - Abrufdauer: 3–12 h - Vorankündigungszeit: 1 Tag	Anforderungsprofil 3 - Reduktion der Last über mehrere Tage - Abrufdauer: 1–5 Tage - Vorankündigungszeit: 2–5 Tage
Stahl	Elektrolichtbogenofen (nur Strangguss)	(✓) _{pos}	✗	✗
	Elektrolichtbogenofen (Strang- und Blockguss)	✗	✗	✗
Glas	Schmelzwanne mit elektrischer Zusatzheizung	(✓) _{pos u. neg}	✗	✗
Zement	Zementmühlen	(✓) _{pos}	(✓) _{pos u. neg}	(✓) _{pos} ^S
	Rohmühle	(✓) _{pos} ^S	(✓) _{pos} ^S	✗
Chemie	Chlor-Alkali-Elektrolyse (ohne speicherbare Zwischenprodukte)	✓ _{pos}	✗	✗
	Chlor-Alkali-Elektrolyse (EDC-Produktion)	✓ _{pos}	✓ _{pos}	(✓) _{pos}
Feuerfest	Rohstoffschmelzanlage	(✓) _{pos u. neg}	✗	✗

✓ Erfüllbar

(✓) Abhängig von den spezifischen Anforderungen der Prozesskette nur zu bestimmten Zeiten erfüllbar

✗ Nicht erfüllbar

S Nur an wenigen Standorten erfüllbar

pos/neg Vorwiegende Art der verfügbaren Leistung, positiv: Lastminderung, negativ: Lasterhöhung. Bei hohen Auslastungen meistens asymmetrische Leistungsverfügbarkeit, da hohe, kurze Lastminderungen durch lange, geringe Lasterhöhungen ausgeglichen werden müssen.

8.3 HEMMNISSE ZUR HEBUNG DER TECHNISCHEN FLEXIBILITÄTSPOTENZIALE

Die Hemmnisanalyse in den Kapiteln 2 bis Kapitel 6 fokussiert (entsprechend den Vorgaben aus dem zugrunde liegenden Forschungsprojekt) auf prinzipielle Einschränkungen zur Erfüllung der Anforderungsprofile. Diese Einschränkungen wurden bei der Ausweisung der technischen Potenziale in Tabelle 8.1 berücksichtigt. Darüber hinaus bestehen Hemmnisse, die aus dem aktuellen regulatorischen Rahmen und Strommarktdesign erwachsen. Im Verlauf der Analyse wurden ebenfalls einige Hemmnisse letzterer Art erkennbar, die der Hebung prinzipiell verfügbarer technischer Potenziale derzeit noch entgegenstehen. Diese sind in Tabelle 8.3 aufgeführt.

Tabelle 8.3: Hemmnisse zur Hebung grundlegend verfügbarer technischer Flexibilitätspotenziale

Branche	Prozess (Prozesskette)	Art der Flexibilität	Wesentliche Hemmnisse zur Hebung des Potenzials
Stahl	Elektrolichtbogenofen (Strangguss)	Anforderungsprofil 1 (Regelenergie)	Präqualifizierungsbedingungen ¹ ; Wirtschaftlichkeit (erhöhter Wärmeverlust)
Glas	Schmelzwanne mit elektrischer Zusatzheizung	Anforderungsprofil 1 (Regelenergie)	technisch/organisatorisch: Prozesskette darf nicht unterbrochen werden
Zement	Zementmühlen	Anforderungsprofil 1 (Regelenergie)	Präqualifizierungsbedingungen ¹ ; Organisatorischer Aufwand; Wirtschaftlichkeit (verminderte Effizienz, ggf. erhöhter Verschleiß)
		Anforderungsprofil 2 (Verschieben über mehrere Stunden)	Organisatorischer Aufwand, insbesondere Personalplanung; Wirtschaftlichkeit (Personalkosten)
		Anforderungsprofil 3 (Lastreduktion über mehrere Tage)	Personal- und Produktionsplanung; Wirtschaftlichkeit (Anpassung von Betriebsabläufen, Personalkosten)
	Rohmühle	Anforderungsprofil 1 (Regelenergie)	Organisatorischer Aufwand; Wirtschaftlichkeit (verringerte thermische Energieeffizienz, ggf. erhöhter Verschleiß)
Chemie	Chlor-Alkali-Elektrolyse (ohne speicherbare Zwischenprodukte)	Anforderungsprofil 1 (Regelenergie)	Strompreisdesign (Leistungspreis); Netzentgeltordnung (StromNEV §19.2); Organisatorischer Aufwand (Folgeprozesse)
	Chlor-Alkali-Elektrolyse (mit Zwischenprodukt EDC)	Anforderungsprofil 2 (Lastreduktion über mehrere Stunden)	Wirtschaftlichkeit derzeit nicht gegeben
		Anforderungsprofil 3 (Lastreduktion über mehrere Tage)	Wirtschaftlichkeit derzeit nicht gegeben
Feuerfest	Rohstoffschmelzanlage	Anforderungsprofil 1 (Regelenergie)	Netzentgeltordnung (StromNEV §19.2); Wirtschaftlichkeit (verminderte Effizienz)

¹ Um wie in Anforderungsprofil 1 vorgesehen Regelenergie anbieten zu können, muss eine Anlage gewisse Kriterien erfüllen und zum Nachweis ein Präqualifizierungsverfahren durchlaufen werden (vgl. <https://www.regelleistung.net/ext/static/prequalification>). U. a. muss die Regelenergie über den gesamten Ausschreibungszeitraum (Werktag, bzw. Woche) verfügbar sein, und es muss sowohl positive als auch negative Regelenergie zur Verfügung gestellt werden.

Zusammenfassend kann festgestellt werden dass die derzeitigen Präqualifizierungsbedingungen für Regelernergie in vielen Fällen von den ausgewählten Prozessen nicht erfüllt werden können. Dies gilt insbesondere für die Bedingung der Arbeitsverfügbarkeit von als Minutenreserve angebotener Flexibilität zu 100 % der Angebotszeit sowie das gleichzeitige Vorhalten von positiver und negativer Regelernergie. Dies legt eine Vermarktung der Flexibilität über Aggregatoren nahe.

Des Weiteren ist bei den derzeit durch Flexibilisierung zu erwirtschaftenden Einnahmen eine Wirtschaftlichkeit nicht gegeben, bzw. ein möglicher geringer Gewinn ist mit Unsicherheiten behaftet und würde einen hohen organisatorischen Aufwand erfordern. Notwendig wäre z.B. das Durchlaufen des Verfahrens zur Präqualifizierung für Regelernergie, eine verstärkte innerbetriebliche Abstimmung des ausgewählten Prozesses mit anderen Stromverbrauchern zur Vermeidung von Leistungsspitzen aus Gründen der Netzentgelt-Minimierung, sowie allgemein die Berücksichtigung eines weiteren Steuerungsparameters beim betrieblichen Management. Längere Lastreduktionen führen zu Produktionsverlust und damit einem Verlust an Wertschöpfung und Erlösen.

8.4 WIRTSCHAFTLICHKEIT VON FLEXIBILITÄT

Die wirtschaftliche Analyse beschränkte sich auf aktuelle Flexibilitätspotentiale und berücksichtigt weder Investitionsentscheidungen in neue Kapazitäten oder Speicher, noch Produktionsausfälle.

Wie beschrieben, ist die Grundstoffindustrie prinzipiell durch hohe Auslastungsgrade gekennzeichnet, was bei längerfristig existierenden Lieferverpflichtungen die Möglichkeit zur Flexibilitätserbringung einschränkt, da bei geringeren Auslastungsgraden die anzubietende Flexibilität steigt (dies gilt nur bis zu einem Auslastungsgrad von 50 % im zulässigen Teillastbereich, da so die Flexibilität in beide Richtungen variiert werden kann). Aus wirtschaftlicher Sicht ist allerdings auch zu berücksichtigen ob die Flexibilität in jenen Stunden erbracht werden kann, in welchen sie benötigt wird. Bei geringeren Auslastungsgraden ist bei einer festen Fahrweise der Produktion die Wahrscheinlichkeit geringer in jenen wenigen Stunden des Jahres zu produzieren in denen die Flexibilität am meisten benötigt wird, und damit auch die erzielbaren Erlöse für die Flexibilitätserbringung am höchsten ist. Dies ist insbesondere zum jetzigen Zeitpunkt der Fall, da häufig eine heuristische Ausrichtung an Tag-/Nacht- sowie Arbeitstag-/Wochenendpreisunterschieden vorliegt welche bereits wesentliche Preisspitzen vermeidet. Diese Heuristik wird jedoch in Zukunft eventuell nicht mehr im selben Maße gelten, da in einem durch erneuerbare Energien dominierten Energiesystem ein deutlich größerer Einfluss von zufällig variierenden Witterungsbedingungen auf Elektrizitätspreise erwartet wird.

Bei einer flexiblen und optimierten Fahrweise, sinken bei geringeren Auslastungsgraden und optimierter Fahrweise die spezifischen Strombeschaffungskosten (pro MWh). Die größten Einsparungen treten bei den ersten Prozentpunkten unter Volllast auf. Mit weiter sinkenden Auslastungen, treten zwar weitere Einsparungen auf, diese fallen jedoch zunehmend kleiner aus. Der Grund ist das, nach technischer Möglichkeit, zuerst jene

Stunden mit den höchsten Elektrizitätspreisen vermieden werden, und die folgenden Stunden weniger Einsparmöglichkeiten bieten.

Dabei ist prinzipiell selbst bei sehr hohen Auslastungsgraden (eingeschränkt durch technische und praktische Hemmnisse) die kurzzeitige Erbringung von einem hohen positiven Leistungspotential (durch Lastreduktion) möglich, solange ein existierender Speicher hinreichend lange wieder aufgebaut werden kann. Mit sinkendem Auslastungsgrad (oder Investition in Überkapazität) und steigenden Speichern steigt auch die Möglichkeit über längere Zeithorizonte – bis hin zum Anforderungsprofil 3 – Flexibilität anzubieten. Dies ist zum Beispiel für die Zementmahlung der Fall.

Bei Teilnahme an Reservemärkten und anderen Systemdienstleistungsprodukten und damit Anforderungsprofil 1 kann eine Konkurrenzsituation zu anderen Anforderungsprofilen auftreten, da bei Reserven ein Leistungsbereich vorgehalten werden muss, welcher nicht für andere Flexibilitätsbereitstellungen verwendet werden kann. Ein gutes Marktdesign würde eine Ko-optimierung zwischen verschiedenen Märkten zulassen. Dies wird im aktuellen Marktdesign dadurch angenähert, dass kürzere Reservezeiträume definiert werden und so je nach Opportunitätskosten an einem oder dem anderen Markt teilgenommen werden kann.

Effiziente Preissignale, welche Opportunitätskosten zwischen der Erbringung von Flexibilität in verschiedenen Anforderungsprofilen (und Märkten) abbilden, können darüber hinaus dadurch verzerrt werden, dass spezifische Ausnahmeregelungen bezüglich des Leistungspreises oder zwischen Systemdienstleistungsmärkten² existieren, aber nicht (im selben Maße) für die Erbringung von Flexibilität am Day-Ahead oder Intraday-Markt.

² So muss bei gleichzeitiger Teilnahme am Markt für ABLAV und Regelleistungsmärkten keine Abschaltungsleistung erbracht werden, solange Reserveleistung angefordert wird.

Ein eingeschränkter Planungshorizont kann zu einer Verringerung der Kostenreduktion führen. Der Effekt ist umso stärker je kürzer der Planungshorizont ist, und je kleiner der Speicher. Bei größeren Speichern ist der Effekt nicht zu beobachten und bei Planungshorizonten von einer Woche oder mehr fällt er sehr klein aus. Dies deutet auf die Bedeutung von guten Prognosen, der Abschätzung von mittelfristigen Opportunitätskosten am Strommarkt sowie der Bedeutung von Speichern auf die wirtschaftliche Erschließung von Flexibilitätspotentialen hin.

8.5 VERGLEICH DER TECHNISCHEN FLEXIBILITÄTSPERSPEKTIVEN

Die technisch aber auch die wirtschaftlich erschließbaren Flexibilitätspotentiale der ausgewählten Prozesse sind keine statischen Größen. Sie sind, ganz im Gegenteil, einem nicht stetigen, oft sogar disruptiven Entwicklungsprozess unterworfen. Dieser wird einerseits durch technologischen Fortschritt, andererseits durch wirtschaftliche Entwicklungen beeinflusst. Während die mittelfristige Perspektive der Flexibilitätspotentiale hauptsächlich durch konjunkturelle Auslastungsschwankungen bedingt ist, welche bei geringen Auslastungen Flexibilitätspotentiale ermöglichen, wird die langfristige Zukunftsaussicht maßgeblich durch investitionsbedingte Produktions- und Speichererweiterungen sowie technologischen Fortschritt beeinflusst, welche die Erfüllbarkeit verschiedener Anforderungsprofile je nach Prozess erhöhen kann. Da die Zusammenhänge zwischen

der Kapazitätsauslastung und dem erschließbaren sowie technischen Flexibilitätspotential bereits in den vorhergehenden Kapiteln 8.1 und 8.4 erörtert wurde, wird im folgenden Kapitel auf die derzeit in diesem Kontext relevantesten Flexibilitätsperspektiven durch technologische Innovationen in den ausgewählten Prozesse eingegangen.

Trotz ihrer Produkt- und Prozessdiversität sind die Branchen der Grundstoffindustrie durch ihre traditionell geringe Gewinnmarge und den kontinuierlich wachsenden Kostendruck geeint. Einerseits zwingt die, der Grundstoffindustrie inhärente, straffe Kostenstruktur die Industrie dazu, ihre Prozesse dementsprechend anhand der Parameter Effizienz und Kostengestaltung zu optimieren. Andererseits muss die Industrie ihre Prozesse entsprechend den Forderungen europäischer und nationaler Umweltauflagen hinsichtlich Energieeffizienz und CO₂-Emissionen ständig anpassen und adaptieren. Diese Situation spiegelt sich in der Schwerpunktlegung der Forschungsbestrebungen der Branchen wieder: erforscht werden vorrangig Innovationen zur Effizienzsteigerung und Dekarbonisierung während Forschung zur Flexibilisierung von Prozessen derzeit noch wenig Beachtung findet.

Aufgrund der daraus resultierenden geringen Anzahl an publizierten Flexibilitätinnovationen und den nur spärlichen zur Verfügung stehenden wissenschaftlichen Publikationen zu der meist als Firmengeheimnis gehaltenen Forschung, wurde die Analyse auf alle die Flexibilität beeinflussenden Innovationen erweitert, auch wenn die Flexibilität nicht im Fokus dieser technischen Innovationen steht. Dabei wurden in einem ersten Schritt die relevanten Innovationen je ausgewähltem Prozess beleuchtet, entsprechend ihres Einflusses auf die Lastflexibilität bewertet und in den Marktkontext gesetzt. Daran anschließend wurden die für die Entwicklung der Lastflexibilität bedeutendsten Innovationen entsprechend ihres Zusammenspiels mit der Stromwirtschaft bewertet und die Perspektiven der einzelnen Prozesse beleuchtet. Abschließend wurden die so entwickelten Perspektiven je Branche einander gegenübergestellt und miteinander verglichen.

Die prozessspezifische Untersuchung der Innovationen belegt die Diversität der im Rahmen dieses Projekts betrachteten Branchen: die Art und Anzahl der momentan erforschten Prozessinnovationen je Prozess unterscheiden sich stark. Vorrangigstes Unterscheidungsmerkmal der Innovationen der ausgewählten Prozesse ist der momentane sowie der angestrebte Elektrifizierungsgrad der einzelnen Prozesse. Während einige Prozesse, wie die Elektrostahlerzeugung und die Chlor-Alkali-Elektrolyse, bereits beinahe vollelektrisch betrieben werden, verwenden andere Prozesse, wie die Rohstoffschmelzanlage der Feuerfestindustrie aber auch die Schmelzwannen der Behälterglasindustrie heute nur wenig Strom.

In Tabelle 8.4 sind die im Rahmen dieser Untersuchung als für die Stromlastflexibilität relevant eingestuften Innovationen je Branche aufgeführt.

Bei dem Elektrolichtbogenofen lassen sich Weiterentwicklungen von Lastmanagementsystemen realisieren, die ggf. eine zusätzliche horizontale Vernetzung mit anderen Teilbetrieben der Prozesskette ermöglichen. Als derzeit zwar noch in Forschung befindliche aber im Kontext der Stromlastflexibilität möglicherweise interessanteste technologische Innovation der Stahlerzeugung im Elektrolichtbogenofen wurde der Contiarc Ofen iden-

tifiziert. Für die Chlor-Alkali-Elektrolyse konkurrieren drei verschiedene relevante Innovationsansätze welche im Folgenden beleuchtet werden, wovon jedoch lediglich eine derzeit technologisch als auch wirtschaftlich darstellbar ist. Gutbett- und Vertikalwalzmühlen wurden im Rahmen der Studie als zukunftssträtigste Innovationen für Zementmühlen identifiziert.

Da der Stromverbrauch, sowohl für die Gemengeaufbereitung als auch bei der Behälterglasformgebung und den nachfolgenden Prozessschritten (Qualitätsprüfung und Verpackung) in ihrer derzeitigen Betriebsform gering und nicht flexibel ist, konnten für diese Prozesse abseits der Umstellung auf elektrische Prozessführung der Schmelze keine, für die Stromlastflexibilität relevanten, Innovationen identifiziert werden.

Tabelle 8.4: Für die Stromlastflexibilität relevante Innovationen der ausgewählten Prozesse

Industriezweig	Prozess	Flexibilitätsrelevante Innovationen
Stahl	Elektrolightbogenofen	intelligente Lastmanagement- und Prognosesysteme Contiarc Ofen
Chemie	Chlor-Alkali-Elektrolyse	Doppelmembran (FX-50B) Präkathodendiaphragmas schaltbare Sauerstoffreduktion
Zement	Roh-/Zementmahlung	separate Feinstmahlung, zusätzliche Mahl- und/oder Silokapazitäten
Glas	Behälterglasherstellung	Elektrifizierung elektrische Booster
Feuerfest	Rohstoffschmelzanlage	Innovative Regelungstechnik Elektrifizierung

ELEKTROLICHTBOGENOFEN

Beim Elektrolightbogenofen sind Weiterentwicklungen der Last- und Prognosesysteme denkbar, die eine weitere Verbesserung der Vorhersage, Planung und Steuerung des Energiebedarfs unterstützen. Dabei ist auch die horizontale Vernetzung der Einzelbetriebe in der Prozesskette der Elektrostahlherstellung zu berücksichtigen. Ein technologischer Fortschritt in der Anwendung von Elektrolightbogenöfen wurde durch die Entwicklung des Contiarc Ofens erzielt. Die Funktionsweise basiert auf einem mit Gleichstrom betriebenen kontinuierlich laufenden Lichtbogenofen. Die Elektroden sind dabei durchgehend in der Schmelze eingetaucht. Dadurch kann die Produktivität sowie die Energieeffizienz gesteigert werden. Dies ist jedoch für Werke in Deutschland keine wirtschaftlich verfügbare Technologieperspektive, sondern lediglich eine mögliche Technologie für Neubau-Vorhaben.

BEHÄLTERGLASHERSTELLUNG

Bei der Glasherstellung spielt die Schmelzwanne eine zentrale Rolle in der Produktion und im Energieverbrauch. Zur Beheizung der Schmelzwannen wird traditionell auf fossile Energieträger, vor allem Erdgas, zurückgegriffen. Lediglich in kleinen und hochspezialisierten Anlagen mit einem Durchsatz von 25–50 t/d werden die Wannen in Deutschland heute elektrisch betrieben. In der EU werden trotz des höheren Wirkungsgrades elektrischer Wannen nur 43 der 628 bestehenden Schmelzwannen elektrisch betrieben. Viele Wannenbetreiber greifen aber auf elektrisches Boos-

ting (EZH) zur (teilweise zeitlich begrenzten) Anpassung des Durchsatzes zurück. [1] Im Zuge der Flexibilitätssteigerung dieser Industrie sollte der Energieträgerwechsel zu Strom, soweit technologisch möglich, jedoch gefördert werden. Lichtbogenöfen für Spezialgläser mit höherer Produktivität existieren (3 Anlagen mit bis zu 180 t/d), deren Einsatz findet allerdings nur geringe Verbreitung (Gründe sind u.a. der hohe spezifische Energieverbrauch und die Kosten für elektrische Energie).

ROH- UND ZEMENTMAHLUNG

Für die Herstellung von Klinker ist das Mahlen der Rohmaterialien und für die Herstellung von Zement insbesondere das Mahlen des Klinkers und der weiteren Zementhauptbestandteile notwendig. Die Rohmahlung erfolgt oft in Gutbett-Walzenmühlen. Das in Deutschland verbreitetste Verfahren für die Zementmahlung sind Kugelmühlen. Der spezifische elektrische Energieeinsatz liegt in der gesamten Prozesskette bei ca. 110 kWh_{el}/t Zement, wovon rund 65 % (vgl. VDZ Branchensteckbrief Zement 2016; Kapitel 4.1) auf die Zerkleinerung in Mühlen entfallen. Eine mögliche Innovation zur Steigerung der Flexibilität in der Zementmahlung wäre ein separates Feinmahlen von Fraktionen der Zementhauptbestandteile. Weitere Untersuchungen zu dieser Technologie und ihre praktische Demonstration in einer Pilotanlage sind für die Fortführung des Projektes vorgeschlagen.

CHLOR-ALKALI-ELEKTROLYSE

In der Forschung zur Weiterentwicklung der Chlor-Alkali-Elektrolyse mittels Membranverfahren waren in der jüngsten Vergangenheit drei technologische Neuerungen von besonderem Interesse. Einerseits wurde versucht, mittels der Einführung einer Doppelmembran den Elektrolyseprozess bei geringeren Natriumhydroxidkonzentrationen zu ermöglichen, um so die energieintensive Nachkonzentration durch Abdampfen der Natronlauge zu umgehen. Die industrielle Implementierung dieser neuen Technologie wurde aber wieder aufgegeben. Dies lag einerseits an technischen Problemen, andererseits erweis sich die Nutzung der Doppelmembran nur unter einem vorteilhaften Verhältnis zwischen Strom und Dampfkosten als ökonomisch sinnvoll, da der Vorteil des reduzierten Dampfbedarfs durch den erhöhten Strombedarf der elektrisch weniger effizienten Elektrolyse in der Doppelmembran aufgehoben wird [2]. Ebenfalls aus technischen Gründen aufgegeben wurden Forschungen zum Einsatz von Prækathodendia-phragmas zur Spannungsabsenkung, da die Funktionalität an asbestfreien Membranen nicht nachgewiesen werden konnte [3].

Einen technologischen Sprung welcher auch auf die Spannungsabsenkung abzielt, stellt die schaltbare Sauerstoffverzehrkathode dar (vgl. Kapitel 5.4.3). Durch ein Umschalten zwischen dem „normalen“ Modus und dem Sauerstoffverzehrmodus wird ein Flexibilitätspotenzial erschlossen. Die Ansprechzeit wird aktuell durch die notwendigen Spülvorgänge limitiert, um die Entstehung explosionsfähiger Gemische auszuschließen.

ROHSTOFFSCHMELZANLAGE

Von besonderem Interesse im Kontext der Stromlastflexibilisierung der Feuerfestindustrie sind die vollelektrisch betriebenen Rohstoffschmelzanlagen. Nur in ihnen ist die Realisierung von Hochtemperaturschmelzprozessen möglich. Daher muss der technische Fortschritt der Anlagenhersteller bei allen relevanten Innovationen die Ziele hoher Energieeffizienz und der noch möglichen Energieflexibilisierung im Focus haben. Da die Elektroschmelzanlagen heute aber nur einen geringen Bestandteil der Zulie-

ferindustrie für die Feuerfestindustrie darstellen, sind diesbezüglich keine detaillierten Informationen und Erfahrungen publiziert.

ZUSAMMENFASSUNG ZU DEN FLEXIBILITÄTSPERSPEKTIVEN DER REFERENZPROZESSE

Grundsätzlich können die ausgewählten Innovationen in zwei Kategorien eingeteilt werden: 1. Steigerung der Energieeffizienz und 2. Elektrifizierung. Die Gegenüberstellung der ausgewählten Innovationen der einzelnen Branchen weist darauf hin, dass für Prozesse, welche bereits heute zu einem hohen Grad elektrisiert sind, Innovationen zur Steigerung der Energieeffizienz den größten Einfluss auf die Flexibilitätspotentiale der Branche haben. Denn, werden die elektrisch betriebenen Prozesse effizienter so sinkt in der Regel der Strombedarf und damit sowohl das theoretische als auch das technische Flexibilitätspotential. Dies gilt sowohl für die identifizierten Maßnahmen der Elektrostahlherstellung als auch für den Einsatz der effizienteren Gutbett- und Vertikalwalzmühlen der Zementindustrie. Trotzdem können auch hauptsächlich elektrisch betriebene Prozesse, wie die Chlor-Alkali-Elektrolyse, Gegenstand von Innovationen der ersten und zweiten Kategorie gleichermaßen sein. So führt der Einsatz von Doppelmembranen zu einer Steigerung der Energieeffizienz des Gesamtprozesses, während der Strombedarf durch die steigende Elektrifizierung erhöht wird. In Prozessen von geringem Elektrifizierungsgrad, wie der Behälterglasschmelzwanne, werden lediglich Innovationen zur Erhöhung des Elektrifizierungsgrades bzw. zur vollen Elektrifizierung der Prozesse einen Einfluss auf die Stromlastflexibilität haben, welche aber heute aufgrund der Kostendifferenz zwischen fossilen Brennstoffen und elektrischem Strom nur wenig Beachtung finden. Außerdem gilt zu beachten, dass, ausgehend vom heutigen Energiebedarf der ausgewählten Prozesse, ein vollelektrischer Betrieb dergleichen zu einer signifikanten Erhöhung des deutschen Stromverbrauchs führen würde, welcher wiederum den Flexibilitätsbedarf weiter erhöhen würde. Es müssen daher einerseits Forschungsanreize geschaffen werden, welche neben Effizienzsteigerung und Elektrifizierung auch auf gesteigerte Flexibilität beim Verbrauch von Strom aber auch anderen Brennstoffen abzielen.

8.6 LITERATURVERZEICHNIS

- [1] B.M. Scalet, S. Roudier, M. Garcia Muñoz, L. Delgado Sancho, A.Q. Sissa, Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Manufacture of Glass – Industrial Emissions Directive 2010/75/EU: Integrated Pollution Prevention and Control. Luxemburg, EU Publications Office, 2013

- [2] T. Brinkmann, G. G. Santonja, F. Schorcht, S. Roudier, L. D. Sancho, Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Production of Chlor-Alkali – Industrial Emissions Directive 2010/75/EU: Integrated Pollution Prevention and Control. Luxemburg, EU Publications Office, 2014

- [3] Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC) Reference Document on Best Available Techniques for the Production of Chlor-alkali – Industrial Emissions Directive 2010/75/EU. Sevilla, European Commission JRC Institute for Prospective Technological Studies, 2014



KAPITEL 9

REGIONALE VERTEILUNG DER UNTERSUCHTEN PROZESSE

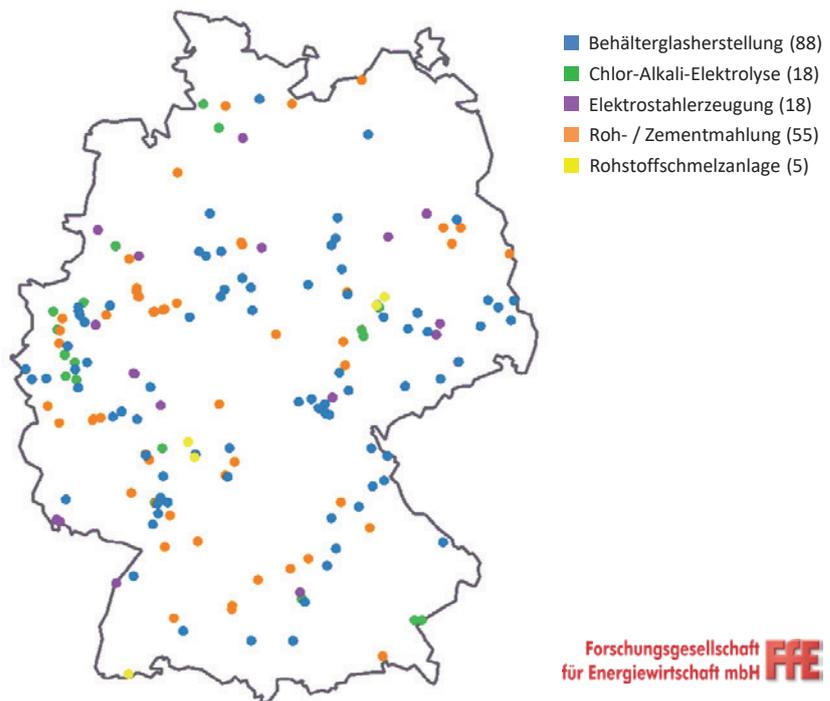
Christa Dufter, Serafin von Roon,
Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH, München



Um die vorhandenen Flexibilitätspotenziale der untersuchten Prozesse markt- und netzdienlich einzusetzen, ist deren räumliche Position mit entscheidend. Diese ist in Abbildung 9.1 dargestellt. Generell verteilen sich die entsprechenden Standorte relativ gleichmäßig über ganz Deutschland. Bei genauerer Betrachtung zeigt sich zusätzlich folgendes: Im Norden befinden sich kaum Standorte. Im Ruhrgebiet ist hingegen eine deutliche Konzentration zu erkennen. Prinzipiell bietet die Verteilung über ganz Deutschland jedoch gute Voraussetzungen für den Einsatz von Lastflexibilisierung.

Eine Auswertung nach Branchen zeigt gewisse Unterschiede in der Verteilung der Produktionsstätten auf. Standorte der Behälterglasherstellung und Elektrostahlerzeugung sind relativ gleichmäßig über ganz Deutschland verteilt. Gleiches gilt für die Roh- und Zementmahlung, allerdings ist hier zusätzlich eine Konzentration in Nordrhein-Westfalen zu erkennen. Bei den Standorten der Chlor-Alkali-Elektrolyse zeigt sich eine deutliche Konzentration in der Gegend des Ruhrgebiets. Bei den Standorten der Rohstoffschmelzanlage ist keine eindeutige Verteilung zu erkennen.

Abbildung 9.1: Standorte der untersuchten Referenzprozesse in Deutschland



Für eine vereinfachende energiewirtschaftliche Bewertung der Standortverteilung, werden zusätzlich die verorteten untersuchten Prozesse in Beziehung zur Residuallast gesetzt. Abbildung 9.2, Abbildung 9.3 und Abbildung 9.4 zeigen verschiedene Darstellungen der Residuallast auf Basis des konservativen Szenarios des FfE-Projekts „Merit Order

Netz-Ausbau 2030 (MONA 2030)“ [1]. Die Residuallast bezeichnet die Differenz zwischen Last und möglicher Stromerzeugung aus dargebotsabhängigen Energieträgern wie Wind und Sonne. Übersteigt die Last die Erzeugung aus Erneuerbaren Energien, so spricht man von positiver Residuallast. Negative Residuallast bezeichnet entsprechend eine Situation, in der mehr Strom aus Erneuerbaren Energien erzeugt wird als verbraucht wird.

In Abbildung 9.2 ist die Jahressumme der Residuallast dargestellt. In den rot eingefärbten Gebieten ist die Summe der Last im Jahresverlauf deutlich höher als die erneuerbare Erzeugung. Diese Gebiete befinden sich v.a. im Westen Deutschlands, wo sich auch viele Standorte der untersuchten Prozesse befinden. Auch in den grünen Gebieten ist die Jahressumme der Residuallast positiv, d.h. auch hier übersteigt die Jahressumme der Last die Einspeisung aus Erneuerbaren, allerdings hier nur geringfügig. Die Küstenregion ist aufgrund der Offshore-Windparks durch hohe Überschüsse Erneuerbarer gekennzeichnet. Da sich hier jedoch kaum Standorte der untersuchten Prozesse befinden, wird ihr Beitrag zur Integration der Windenergie in dieser Region eher gering sein.

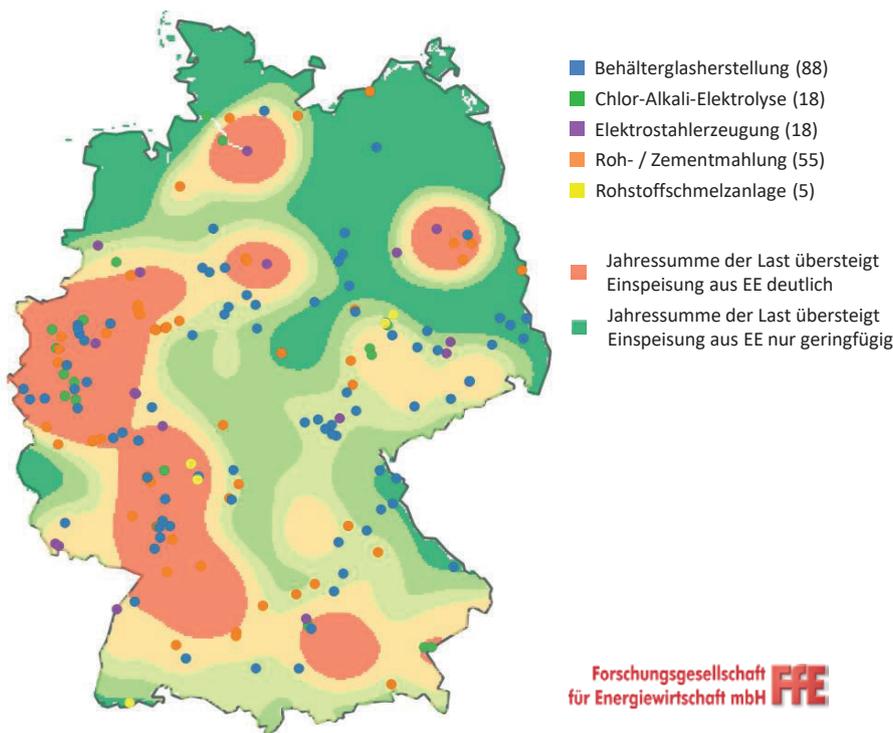


Abbildung 9.2: Standorte der untersuchten Referenzprozesse in Deutschland und Jahressumme der Residuallast auf Basis des konservativen Szenarios aus MONA 2030 [1]

Abbildung 9.3: Standorte der untersuchten Referenzprozesse in Deutschland und maximale Residuallast auf Basis des konservativen Szenarios aus MONA 2030 [1]

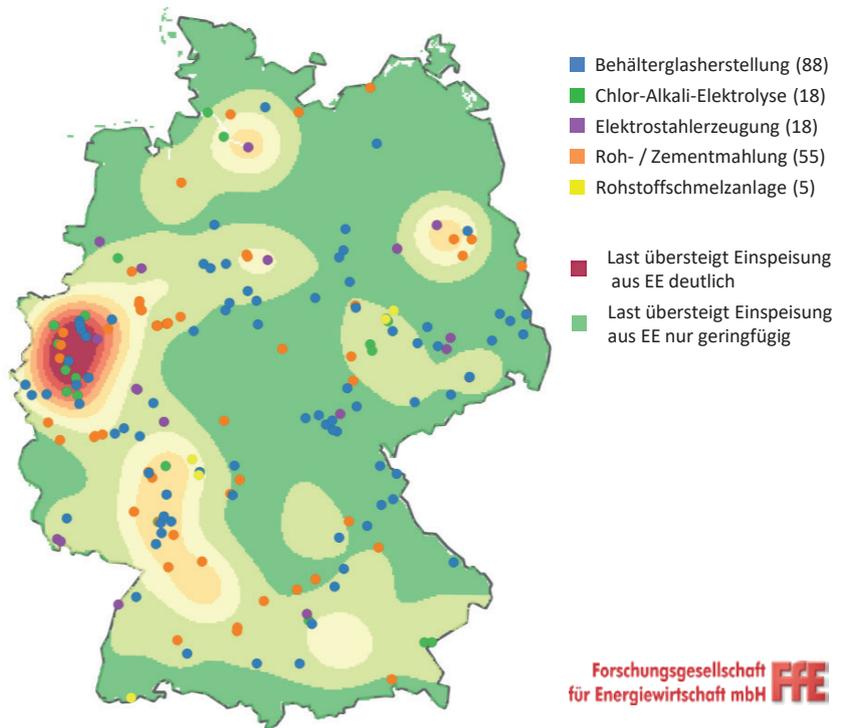
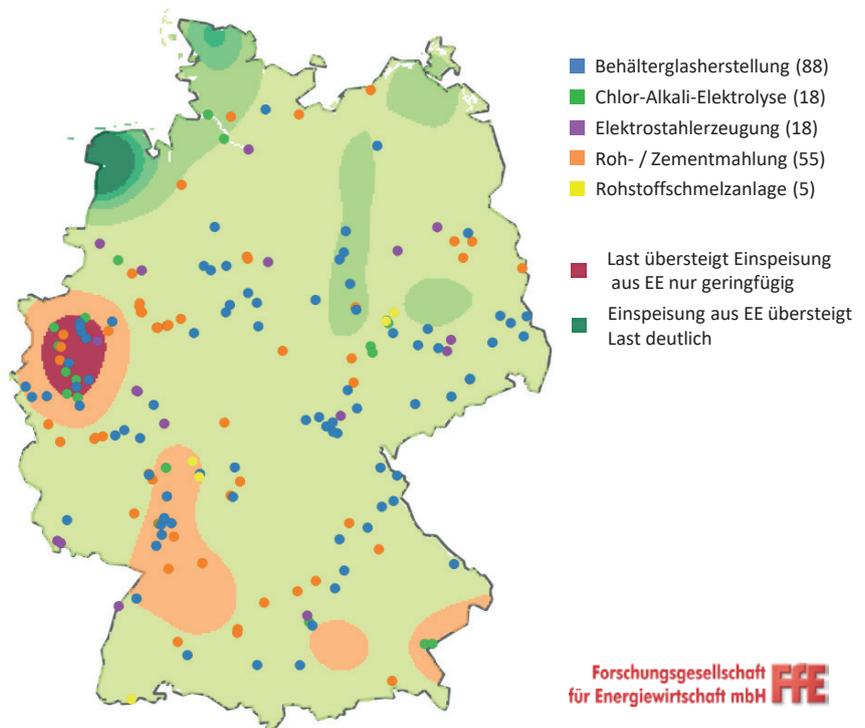


Abbildung 9.4: Standorte der untersuchten Referenzprozesse in Deutschland und minimale Residuallast auf Basis des konservativen Szenarios aus MONA 2030 [1]



In Abbildung 9.3 und Abbildung 9.4 sind diejenigen Stunden in 2030 dargestellt, welche jeweils die maximale und minimale Residuallast aufweisen.

Im Ruhrgebiet könnte die Situation in Stunden mit extrem hoher positiver Residuallast durch Lastreduktion entschärft werden. Allerdings ist zu berücksichtigen, dass die Last bezogen auf die Jahressumme die erneuerbare Erzeugung deutlich übersteigt (siehe Abbildung 9.2). Es gilt also zu vermeiden, dass kritische Situationen durch den zeitlich versetzten Ausgleich der Produktion und einer damit einhergehenden Lasterhöhung zusätzlich verschärft werden.

Standorte in Gebieten mit sehr niedriger minimaler Residuallast (mittelgrün bis dunkelgrün in Abbildung 9.4), können in kritischen Stunden einen Beitrag durch Lasterhöhung leisten. Allerdings sind diese Gebiete teilweise durch deutliche Überschüsse an erneuerbarer Einspeisung im Jahresverlauf gekennzeichnet. So könnte es auch hier durch den zeitlich folgenden Produktionsausgleich durch Lastreduktion zu möglichen kritischen Netzsituationen kommen, die nur noch durch Abregelung erneuerbarer Energien Anlagen gelöst werden können.

Diese Einschätzungen haben jedoch nur indikativen Charakter. Um belastbare Aussagen über die Möglichkeiten zur Integration der untersuchten Flexibilitätspotenziale treffen zu können, sind entsprechende Netzsimulationen erforderlich.

9.1 LITERATURVERZEICHNIS

- [1] Regett, Anika; Zeiselmaier, Andreas; Wachinger, Kristin; Heller, Christoph: Merit Order Netz-Ausbau 2030 - Teilbericht 1: Szenario-Analyse. München: Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V., 2017



KAPITEL 10

FAZIT UND AUSBLICK

Florian Ausfelder,
DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V.,
Frankfurt am Main

Antje Seitz,
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Stuttgart

Serafin von Roon,
Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH, München

10.1 ZIELSETZUNG DER ARBEITEN

Die Grundstoffindustrien sind mit ihren stoffumwandelnden Prozessen sehr energieintensiv. Sie benötigen rund 75 % des gesamten industriellen Energiebedarfs in Deutschland. Ihre Prozesse sind seit Jahrzehnten auf energetische und Rohstoffeffizienz hin ausgerichtet und der Energieeinsatz, in der Regel über Brennstoffe, erfolgt sehr prozessspezifisch, so dass Verallgemeinerungen über die gesamte Grundstoffindustrie oder auch nur über Branchen in der Regel nicht zulässig sind. Die untersuchten Prozesse der einzelnen Branchen zeichnen sich durch ihre Bedeutung in der Branche aus, einen relativ hohen Anteil elektrischer Energie im Prozess zu verbrauchen und/oder sie sind ausreichend repräsentativ für die Branche.

10.2 METHODISCHE VORGEHENSWEISE

Für eine strukturierte Untersuchung der Prozesse mit ihren unterschiedlichen Attributen ist eine eindeutige Begriffsdefinition für die Beschreibung der Flexibilitätsoptionen unabdingbar. In den methodischen Kapiteln wurde daher die Grundlage für eine konsistente Beschreibung der Prozesse und ihrer möglichen Wechselwirkungen in Bezug auf Flexibilität gelegt. Dies umfasst sowohl eine eindeutige Definition der Potenzialbegriffe, als auch eine Rahmensetzung. In diesem Kontext wurden exemplarische Anforderungsprofile aus zu erwartenden (Netz-)Situationen abgeleitet, in denen ein entsprechendes Flexibilitätsangebot netzdienlich unterstützt werden kann.

Neben den technischen Möglichkeiten oder Grenzen, die die betrachteten Prozesse aufweisen, wurden auch über technische Aspekte hinausgehende Hemmnisse untersucht, insbesondere regulatorische, betriebswirtschaftliche und organisatorische Hemmnisse, die eine Implementierung von Flexibilitätsoptionen beeinflussen. Diese Hemmnisse spielen eine dominante Rolle bei der Frage, welche der technisch möglichen Flexibilisierungsoptionen praktisch umsetzbar wären.

Diese Anforderungsprofile, die Definitionen und die Hemmnis-Analyse bildeten die Grundlage für ausgiebige Gespräche und Diskussionen mit industriellen Anwendern und Experten. Diese Gespräche fanden teilweise vor Ort in den Betrieben und an den Anlagen oder im Rahmen von persönlichen Treffen und Telefonaten statt. Parallel dazu wurden die wissenschaftlich-technischen Netzwerke der Forschungseinrichtungen der Verbände eingebunden, um die Diskussionsergebnisse zu verifizieren und die Aussagen für die jeweilige Branche zu validieren.

10.3 BRANCHENÜBERGREIFENDE ERGEBNISSE

Die Prozesse der Grundstoffindustrie weisen trotz ihrer unterschiedlichen Branchen viele Gemeinsamkeiten auf:

1. Für die Unternehmen hat die möglichst kostengünstige **Einhaltung von Lieferverpflichtungen gegenüber den Kunden** mit dem Produkt zu den entsprechenden Spezifikationen in der vereinbarten Menge und zum vereinbarten Zeitpunkt **immer Priorität vor** energiewirtschaftlichen Maßnahmen, wie dem **Anbieten von Flexibilität**.
2. So werden die Prozesse auf eine möglichst effiziente Betriebsweise am optimalen Betriebspunkt ausgelegt und gemäß der Produktnachfrage betrieben. Das Abweichen von diesem optimalen Betriebspunkt, bzw. der maximalen Auslastung z.B. durch das Anbieten von Flexibilität, führt in der Regel zu einem Verlust an Effizienz im Prozess. Es gibt für die untersuchten Prozesse der Grundstoffindustrie daher eine **gegenläufige Wechselwirkung zwischen energetischer Effizienz und Flexibilität**.
3. In den Grundstoffindustrien ist die Produktqualität im Sinne der Spezifikationen des Produktes eine direkte Funktion der Prozessierung, so dass **Änderungen der Prozessbedingungen zu Veränderungen der Produktqualität** führen. Den Einfluss von häufigen, schnellen Laständerungen innerhalb der betrachteten Prozesse auf die Produktqualität gilt es weiter zu untersuchen. In der Grundstoffindustrie muss jedoch davon ausgegangen werden, dass Kundenanforderungen, geltende technische Standards, vertragliche Gewährleistungen und die Nachhaltigkeit der Produktnutzung in der Regel keine Minderung der Produktqualität zulassen.
4. Die **Wechselwirkungen zwischen häufigen, schnellen Laständerungen und deren Auswirkung auf die Anlagen und ihre kritischen Komponenten** in Bezug auf ihre Eigenschaften und Lebensdauern sind bisher **nicht ausreichend untersucht**.
5. Die Prozesse der Grundstoffindustrie sind eingebunden in Prozessketten, die als Vorketten die Rohstoffe zur Verfügung stellen, und nachgelagerter Prozesse, die das Produkt weiterverarbeiten. Die standortspezifische relative Dimensionierung dieser Verfahrensschritte zueinander begrenzt die Möglichkeiten der Flexibilisierung einzelner Verfahrensschritte. **Die Möglichkeiten zur Flexibilisierung sind sehr stark von den standortspezifischen Prozessketten und den Möglichkeiten zur Produktspeicherung innerhalb der Prozesskette** abhängig.
6. Die Anlagen der betrachteten Prozesse sind sehr kapitalintensiv und werden daher unter möglichst hoher Auslastung betrieben. Daher sind die **Potenziale zur Lasterhöhung bei hoher Produktnachfrage**, wenn überhaupt vorhanden, **sehr gering**, während die **Potenziale für eine Lastreduktion ohne entsprechenden Ausgleich**, speziell für längere Abrufdauern, **in der Regel mit Produktionsausfall** einhergehen, was in den Kosten für Flexibilitätsangebote berücksichtigt werden muss.
7. Möglichkeiten zur flexiblen Produktion und einer Lastreduktion auf Anforderung ergeben sich bei einzelnen Prozessen, deren Auslegung und Kapazität z.B. saisonbedingt nur eine mittlere Auslastung aufweist. Hierbei kann **durch eine Lastverschiebung sichergestellt werden, dass ausgefallene Produktion innerhalb kürzerer Zeit nachgeholt werden kann**.
8. Die aktuellen Regelungen im Strommarkt führen auch zu Sonderformen der Netznutzung z.B. mit einer möglichst konstanten Abnahme

elektrischer Energie für die Prozesse aus dem Stromnetz oder auch einer reduzierten Abnahme von Strom in definierten Hochlastzeiten. Die Unternehmen betreiben ein aktives Management zur Lastspitzenvermeidung. Insbesondere der mögliche **Verlust der Berechtigung oder des Umfangs individueller Netzentgelte nach §19 Abs. 2 (StromNEV) stellt für die Unternehmen eine erhebliche Hürde** für das Anbieten von Flexibilität dar.

9. Die Unternehmen der Grundstoffindustrie bestehen auf einem **Primat der betrieblichen Erfordernisse** gegenüber dem externen Aufruf von Flexibilitätsoptionen. Die Möglichkeit, die Anfrage zur Bereitstellung einer Flexibilitätsoption aus betrieblicher Notwendigkeit heraus ablehnen zu können, wird als essentiell angesehen und sollte im Mechanismus der Flexibilitätsbereitstellung berücksichtigt sein.
10. Ein wichtiges ökonomisches Hemmnis stellen große Ungewissheiten bei der Entwicklung am Strommarkt dar. Um Flexibilität im Stromeinsatz zu ermöglichen, sind in der Regel **langfristig zu amortisierende Investitionen** nötig. Entsprechend muss eine **ausreichende Planungssicherheit** bestehen, dass diese Investitionen ökonomisch langfristig tragfähig sind.
11. Zusammenfassend sind die **technischen Limitierungen der Prozesse** in der Regel **nicht die entscheidenden begrenzenden Randbedingungen für das Anbieten von Flexibilität**, sondern sie limitieren die Bereitschaft und die Möglichkeiten für das Anbieten von Flexibilitätsoptionen.

10.4 BRANCHENSPEZIFISCHE ERGEBNISSE

Neben den oben dargestellten übergreifenden Aspekten haben die Prozesse der einzelnen Branchen ihre individuellen Besonderheiten und Ausgestaltungen, die innerhalb jeder einzelnen Branche zu Besonderheiten und speziellen Rahmenbedingen führen. Diese gilt es in der Diskussion um Flexibilität zu beachten. Im Folgenden werden die speziellen Aspekte der einzelnen Branchen und ihrer Prozesse dargestellt.

10.4.1 EISEN- UND STAHLHERSTELLUNG (ELEKTROLICHTBOGENOFEN)

In der Stahlindustrie wurde der Elektrolichtbogenofen als stromintensiver Referenzprozess auf mögliche Flexibilisierungen untersucht. Der Elektrolichtbogenofen ist Teil einer Prozesskette zur Erzeugung von Flüssigstahl, die auf Herstellung von Strangguss oder Blockguss ausgerichtet ist. Der Elektrolichtbogenofen kann ausschließlich eine Lastreduktion zur Verfügung stellen, die durch das Ausschalten des Ofens oder durch Verlängerung einer Betriebsunterbrechung erzielt wird. Eine Lasterhöhung ist entsprechend den untersuchten Anforderungsprofilen technisch nicht mit dem Elektrolichtbogenofen realisierbar.

Die Flexibilität des Elektrolichtbogenofens ist technisch wesentlich von seiner Einbindung in die Prozesskette und von der Produktionsstruktur des jeweiligen Standortes abhängig. Flexibilität ist dann verfügbar, wenn Reserven in der Kapazität und Leistung der Teilanlagen vorhanden sind. Meist werden die Stahlwerke aber mit sehr hoher Auslastung betrieben.

Ein Produktionsausfall ist dann i.d.R. nicht mehr nachholbar. Auch die Dauer von Betriebsunterbrechungen wird aus Gründen der Energieeffizienz der Hochtemperaturprozesse minimiert. Zusätzlich ist die Auftragsabwicklung im Stahlwerk auf differenzierte Produkte mit unterschiedlicher Qualität und Abmessung ausgerichtet. Eine Lagerhaltung wird vermieden, um individuelle Kundenanforderungen kurzfristig erfüllen zu können. Dies führt insgesamt zu Hemmnissen in der Bereitstellung von Flexibilität. Die Bereitstellung von elektrischer Energie ist im Elektrostahlwerk ein wichtiger Kostenfaktor, bei dem die Stromarbeitskosten und die Netzkosten gleichermaßen optimiert werden müssen. Viele Werke praktizieren bereits heute flexible, atypische Sonderformen der Netznutzung mit planbaren Anforderungskriterien. Eine zusätzliche Bereitstellung von beliebig abrufbarer flexibler Regelenergie erfordert eine Anpassung der Regelwerke für die Netznutzung.

10.4.2 GLASHERSTELLUNG (ELEKTRISCHE ZUSATZHEIZUNG IN DER BEHÄLTERGLASPRODUKTION)

Zur Beschreibung der Glasindustrie wurde die Behälterglasproduktion im ersten Schritt zur Charakterisierung der Flexibilität hinsichtlich des Einsatzes elektrischer Energie herangezogen. Ein wesentliches Kennzeichen der Glasherstellung ist es, dass der Herstellungsprozess kontinuierlich, ohne Unterbrechung der Energiezufuhr, über Jahre (je nach Glasart zwischen 5 und 18 Jahre) hinweg betrieben wird. Die in sich verzahnte Prozesskette der Glasherstellung bei den heute genutzten Technologien führt dazu, dass bei einer Einflussnahme auf einzelne bzw. Veränderung einzelner Prozessschritte, die Gefahr besteht, den Gesamtprozess und die Produktqualität negativ zu beeinflussen.

Das Schmelzaggregat wird bei der Mehrzahl der Anlagen mit Erdgas als dem wichtigsten Energieträger betrieben. Rund 75 % der Behälterglaswanen besitzen außerdem eine elektrische Zusatzheizung, die bei technologischem Bedarf (hohe Absorption von Wärmestrahlung durch die Schmelze; hoher Durchsatz) üblicherweise 5 bis 15 % des zum Schmelzen benötigten Energieeintrages übernehmen kann. Der Anteil der elektrischen Zusatzheizung kann in gewissem Maße variiert werden und wird von einigen Glasherstellern auch heute schon für Maßnahmen im Rahmen des Lastmanagements zur Verfügung gestellt. In den meisten Fällen besteht die Flexibilität nicht darin, die Leistung völlig herauszunehmen oder einfach zuzuschalten, sondern darin, die genutzte elektrische Energie (um bis zu 1/3) zu vermindern oder ggf. vom aktuellen Niveau auf die installierte Leistung zu erhöhen. Die Änderung der elektrischen Energiezufuhr muss zeitnah (innerhalb weniger Minuten) durch Anpassung der Energiemenge der fossilen Brennstoffe kompensiert werden, so dass der (Gesamt-) Energieeintrag in die Schmelze und damit die Temperaturen sowie die Viskosität der Schmelze konstant bleibt bzw. sich nur geringfügig ändern.

Im weiteren Projektverlauf soll die Herstellung von Flachglas mit dem Floatprozess als formgebenden Schritt ebenfalls untersucht und entsprechende Hemmnisse und Flexibilisierungspotentiale ermittelt werden.

Die Flexibilisierungsmöglichkeiten durch veränderte Auslegung der Schmelzaggregate hinsichtlich EZH-Anteil und die möglichen Grenzen der Hybridisierung der Schmelzanlage bis hin zur vollelektrischen Schmelze sind ebenfalls Gegenstand der nachfolgenden Arbeiten und Untersuchungen im weiteren Verlaufs des Projekts.

Das Satellitenprojekt „DisConMelt“ mit der Kopernikus-Fördernummer S3A bis D läßt bei erfolgreicher Umsetzung bei einem Zeithorizont von ca. 10 Jahren eine erhöhte Flexibilisierung auch für das Anforderungsprofil 2 in einigen Bereichen der Glasherstellung erkennen.

10.4.3 ZEMENTHERSTELLUNG (ROH- UND ZEMENTMAHLUNG)

Die Zementunternehmen in Deutschland sind durch die vorausschauende Planung von Stromeinsätzen (Stromfahrpläne) ein klassischer Anbieter von Flexibilität im Strommarkt. Hierbei werden Zementmühlen nach Möglichkeit vorwiegend im Niedertarif (NT) in der Nacht betrieben und Stillstandszeiten im Hochtarif (HT) am Tag angesiedelt (Demand Side Management). Weiterhin werden Lastspitzen durch genaue zeitliche Planung und Steuerung der Einsatzzeiten von Maschinen mit großer Last vermieden.

Die Zementherstellung weist mit ihrem größten elektrischen Energieeinsatz in der Materialzerkleinerung ein hohes technisches Potenzial für eine flexible Laststeuerung durch zeitliche Verschiebung der Produktion auf. Speicherkapazitäten in Silos vor und nach der Zementmahlung und Rohmahlung können in gewissem Umfang eine Entkopplung und Flexibilisierung dieser Teilprozesse erreichen. Besonders die Zementmahlung eignet sich hierfür. Voraussetzung ist die Möglichkeit zum Nachholen ausgefallener Produktion. Bei einem flexiblen Betrieb sind ausreichend lange zusammenhängende Produktionszeiträume von i.d.R. mehr als 4 Stunden erforderlich, um negative Auswirkungen auf die Produktqualität zu vermeiden. Eine sehr kurzzeitige Erhöhung der Last ist deshalb nicht möglich.

Der Zementabsatz und die Zementproduktion unterliegen einer starken Saisonalität. Das größte Flexibilitätspotenzial ergibt sich in der Nebensaison bei mäßiger Auslastung der Zementmahlanlagen. Bei starker Auslastung sind die technischen Potenziale zur Flexibilität i.d.R. nicht verfügbar oder stark eingeschränkt. Hintergrund sind die starke Produktnachfrage und Auslastung der Kapazität und fehlende Zeiten und Kapazitäten zum Nachholen ausgefallener Produktion. Eine langfristige Lastverschiebung für längere Stromknappheitsperioden könnte meist nur durch Anpassung der Produktions- oder Silokapazitäten ermöglicht werden. Die Kosten für eine Vergrößerung oder den Neubau scheinen aus heutiger Perspektive allerdings nicht rentabel. Ein nicht geplanter Personaleinsatz bzw. die zusätzliche Bereitschaft von Personal stellen eine besondere Herausforderung dar. Der personelle und arbeitsorganisatorische Mehraufwand für die Bereitschaft müsste durch die Vergütung für die zusätzliche Flexibilität wirtschaftlich kompensiert werden.

Die bisherigen Ergebnisse zur Einschätzung der Flexibilitätspotenziale werden im weiteren Projektverlauf in Zusammenarbeit mit einem Zementunternehmen anhand von Anlagendaten und Betriebsverläufen genauer

untersucht werden. Als Perspektive zur Flexibilisierung bietet eine separate Feinstmahlung ein großes Potenzial zur Nutzung von zeitlich begrenzten Stromüberschüssen in der Zementindustrie. Für die besonders energieintensive Herstellung der Feinstfraktion des Zements sind nur relative geringe Speichervolumina erforderlich. Weitere Untersuchungen am praktischen Beispiel sind nötig und die Demonstration der Technologie in einer Pilotanlage, um die tatsächlichen Flexibilitätsgewinne sowie die Auswirkungen auf den Prozess und die Produkte praxisrelevant bewerten zu können.

10.4.4 HERSTELLUNG CHEMISCHER GRUNDSTOFFE (CHLOR-ALKALI ELEKTROLYSE)

Die Chlor-Alkali Elektrolyse ist der stromintensivste Prozess der chemischen Industrie. Von den drei gängigen Verfahren ist das Membran-Verfahren am besten zur Flexibilisierung geeignet. Den Möglichkeiten zur Flexibilisierung sind je nach Verfahren technische und je nach Einbindung in die Standortstruktur und die Prozesskette strukturelle Grenzen gesetzt. Aufgrund der hohen durchschnittlichen Auslastung der Anlagen, steht fast ausschließlich die Lastreduktion ohne Ausgleich als Flexibilitätsmaßnahme zur Verfügung, die allerdings mit einem Produktionsverlust einhergeht. Die Kosten dieses Produktionsverlustes sind entlang der standortspezifischen Wertschöpfungskette zu bewerten. Die Möglichkeiten, Chlorspeicher als Puffer zu nutzen sind aufgrund ihrer originär sicherheitstechnischen Auslegung begrenzt. Eine Besonderheit ist die Polyvinylchlorid (PVC)-Produktion, die über Ethylendichlorid (EDC) als speicher- und handelbares Zwischenprodukt verläuft. Dabei können kürzere Lastreduktionen durch Speicher aufgefangen und eine leichte Erhöhung der Produktionsmenge aufgeholt werden, sowie längere Ausfallzeiten der PVC-Produktion durch Zukauf von EDC vermieden werden. Als Flexibilitätsperspektiven wurden der Aufbau von Überkapazitäten, der Einsatz von Batterien im Kontext eines virtuellen Kraftwerkes und die Nutzung von Sauerstoffverzehrkathoden untersucht. Diese Perspektiven ermöglichen das zusätzliche Anbieten von Lasterhöhungen. Die Wirtschaftlichkeit dieser Perspektiven, bzw. die sich daraus ableitenden Kosten für das Flexibilitätsangebot werden von den jeweiligen Investitionskosten dominiert. Um die Flexibilisierungspotenziale und -perspektiven ausschöpfen zu können, ist sicherzustellen, dass die beteiligten Unternehmen für die Bereitstellung von Flexibilität im Regulierungsrahmen dadurch keine Nachteile erleiden.

10.4.5 HERSTELLUNG VON FEUERFEST-MATERIALIEN (ROHSTOFFSCHMELZANLAGE)

Die Unternehmen der deutschen Feuerfest-Industrie produzieren vielfältige keramische Feuerfestwerkstoffe, die in allen Bereichen der modernen Industriegesellschaft (Stahl, Zement, Chemie, Energie...) in Thermoprozessanlagen gebraucht werden. Zur Realisierung der energetisch günstigen Hochtemperaturprozesse in diesen Anlagen werden oftmals Schmelzrohstoffe zur Herstellung der keramischen Feuerfestwerkstoffe benötigt, die in Schmelzanlagen unter ausschließlicher Verwendung von elektrischer Energie hergestellt werden.

Als stromintensivster Prozess ist ein kontinuierlicher Batchprozess zur Herstellung von Schmelzkorund bei Temperaturen $>2050\text{ °C}$ betrachtet worden. Er ist energetisch optimiert und ganzjährig voll ausgelastet und wird lediglich durch eine kurze jährliche Revision unterbrochen.

Den Möglichkeiten zur Flexibilisierung sind vor allem technische Grenzen gesetzt, um den ablaufenden Hochtemperaturprozess nicht zu unterbrechen und das besondere Design des Schmelzaggregates nicht zu gefährden. Die beste Flexibilitätsmaßnahme stellt die kurzzeitige Lastreduktion mit einer Nachfragereduktion für 15 Minuten bzw. einem gänzlichen Ausschalten für 5 Minuten dar. Weitere Lastreduktionen sind nicht möglich, da sie zu einem nicht aufholbaren Produktionsausfall führen würden.

Eine Lastreduktion bis auf null mit entsprechendem Ausfall der Produktion kann auch nicht durch Zukauf des Produktes von anderen Herstellern ausgeglichen werden, da Rohstoffkörnungen nicht 1:1 austauschbar sind und Feuerfestprodukte sehr sensibel auf solche Veränderungen reagieren können.

Starke Lasterhöhungen, mit denen ein früherer oder späterer Produktionsausfall ausgeglichen oder in Produktspeicher produziert werden könnte, kommen wegen der Gefahr der thermischen Überlastung und Beschädigung der Schmelzanlage nicht in Frage.

Eine Standortstruktur mit ausreichenden Lagermöglichkeiten für die benötigten Ausgangsrohstoffe, die Zwischenprodukte und die Endprodukte bietet ein großes Flexibilitätspotenzial bei der Aufbereitung und Verarbeitung der Schmelzprodukte sowie effektive Abläufe in der Logistik des Schmelzbetriebes.

10.5 AUSWERTUNG UND ERGEBNISSE

Der Vergleich der technischen Flexibilitätspotenziale zeigt, dass Lasterhöhungen generell nur in einzelnen Fällen durchgeführt werden können. Neben prozessspezifischen Restriktionen ist dies hauptsächlich auf die hohe Auslastung der Prozesse zurückzuführen. Elektrolichtbogenöfen und Chlor-Alkali-Elektrolysen sind durch hohe flexible Leistungen, dafür aber auch durch vergleichsweise kurze Abrufdauern gekennzeichnet. Eine Ausnahme bildet nur die PVC-Produktion, bei der durch Speicherung des EDC-Zwischenproduktes prinzipiell Abrufdauern über mehrere Tage möglich sind. Die Anschlussleistungen und damit auch die entsprechenden flexiblen Anteile von Anlagen der Roh- und Zementmahlung sind deutlich geringer. Dafür können hier jedoch sehr lange Abrufe von bis zu zwölf Stunden realisiert werden. Für Rohstoffschmelzanlagen und Glasschmelzwannen sind vergleichsweise niedrige flexible Leistungen und mittlere Abrufdauern charakteristisch. Eine Flexibilisierung durch Teillastbetrieb ist nur im Falle der Chlor-Alkali-Elektrolyse, der Glasschmelzwanne und der Rohstoffschmelzanlage möglich.

Um die vorhandenen Flexibilitätspotenziale der untersuchten Referenzprozesse markt- und netzdienlich einzusetzen, ist deren räumliche Position mit entscheidend. Generell verteilen sich die Standorte der untersuchten

Prozesse relativ gleichmäßig über ganz Deutschland, wobei eine deutliche Konzentration im Ruhrgebiet auffällt. Bei der Auswertung nach Branchen ist zusätzlich Folgendes zu erkennen. Während sich Standorte der Behälterglasherstellung, Elektrostahlerzeugung und Roh- und Zementmahlung weitestgehend gleichmäßig über ganz Deutschland verteilen, befinden sich Standorte der Chlor-Alkali-Elektrolyse vorrangig im Ruhrgebiet. Für die Standorte der Rohstoffschmelzanlage ist keine eindeutige Verteilung zu erkennen.

Für eine vereinfachende energiewirtschaftliche Bewertung werden die Standorte der untersuchten Prozesse zusätzlich in Beziehung zur Residuallast – der Differenz zwischen Last und volatiler Stromerzeugung aus Wind und PV – gesetzt. Im Westen Deutschlands, wo sich auch viele Standorte der untersuchten Prozesse befinden, ist die Last im Jahresverlauf deutlich höher als die erneuerbare Erzeugung. Besonders im Ruhrgebiet könnte die Situation demnach in Stunden mit extrem hoher positiver Residuallast durch entsprechende Abrufe von Lastreduktion entschärft werden. Allerdings gilt es zu vermeiden, dass durch den zeitlich versetzten Ausgleich der Produktion und einer damit einhergehenden Lasterhöhung kritische Situationen in anderen Stunden verschärft werden. Die Küstenregion ist aufgrund der Offshore-Windparks durch hohe Überschüsse Erneuerbarer gekennzeichnet. Da sich hier nur wenige Standorte der analysierten Prozesse befinden, ist ihr Beitrag zur Integration der Windenergie in dieser Region als gering anzusehen.

10.6 WAS HEISST DAS AKTUELL FÜR DIE GRUNDSTOFFINDUSTRIE

Die Analyse der ausgewählten Prozesse hat teilweise vorher noch nicht bekannte Flexibilitätpotenziale in den Prozessen identifiziert. Darüber hinaus wurden Erkenntnisse gesammelt, welche Flexibilitätperspektiven in Zukunft erschlossen werden und unter welchen Voraussetzungen ihre Umsetzung geschehen kann. Selbst die Potenziale, die bereits aktuell verfügbar sind, werden nicht in vollem Umfang ausgeschöpft, weil hierzu weder die Notwendigkeit noch die entsprechenden Anreize gegeben sind. Die zunehmende Umstellung der Stromerzeugung auf fluktuierende Quellen wie Wind und Fotovoltaik wird zunehmen und damit auch die Notwendigkeit für Flexibilitätsmaßnahmen. Zu welchem Zeitpunkt und in welchem Umfang dabei der Beitrag der Flexibilisierungsmaßnahmen der Industrie zum Zuge kommt, ist umstritten.

Aus Sicht der betroffenen Unternehmen bietet sich daher im Moment eine Bestandsanalyse ihrer Prozesse in Bezug auf mögliche Flexibilitätpotenziale an, da die standortspezifischen Gegebenheiten in einer übergreifenden Analyse nicht ausreichend berücksichtigt werden können. Für mögliche zukünftige Flexibilitätperspektiven sind gegebenenfalls Investitionen und die Weiterentwicklung der Regularien notwendig, um diese anbieten zu können. Die Bestandsaufnahme sollte auch spezifisch die Hemmnisse und die Möglichkeiten, diese zu überwinden, innerhalb des Unternehmens erfassen.

10.7 HEMMNISSE FÜR DIE UMSETZUNG VON FLEXIBILITÄT

Das Anbieten von Flexibilitätsmaßnahmen ist aktuell keine zwingende Notwendigkeit für die Unternehmen der Grundstoffindustrie. Erste, gemischte Erfahrungen konnten durch die Teilnahme an Regelenergiemärkten gesammelt werden. Dabei stellt sich die Situation für jedes Unternehmen und jeden Betrieb sehr individuell dar. Im Folgenden werden daher die wesentlichen Aspekte erörtert, die nach Auskunft der Unternehmen für eine breitere Bereitstellung von Flexibilität zu beachten sind.

10.7.1 TECHNISCH

Die Verfahren der Grundstoffindustrie sind in der Regel auf den kontinuierlichen Betrieb an bestimmten Betriebspunkten ausgelegt und nicht auf einen fluktuierenden Betrieb. Die Prozesse selber können in der Regel in bestimmten Grenzen auf eine fluktuierende Versorgung elektrischer Energie reagieren. Durch die enge Einbindung in vor- und nachgelagerte Prozessketten gibt es nur in Ausnahmefällen die Möglichkeit, den Prozess isoliert zu betrachten, so dass die Auswirkungen auf die gesamte Prozesskette berücksichtigt werden müssen. Vor- und nachgelagerte (Vor-) Produktspeicher können die für das Anbieten von Flexibilität nötige Entkopplung des betrachteten Prozesses von der Prozesskette ermöglichen. Ansonsten droht für den Fall einer Lastreduktion ohne Ausgleich ein Produktionsausfall. Das Potenzial für eine Lasterhöhung ist abhängig vom Prozess selbst und dessen Auslastung und wird ggfs. von der Produktionskapazität der Folgeprozesse limitiert.

10.7.2 REGULATORISCH

Die Energiewende strebt nicht nur einen Wandel in der technischen Struktur des Energiesystems an, sondern sie muss den Übergang zu den neuen Strukturen auch in dem regulatorischen Rahmen abbilden. Ausgehend von einer bedarfsorientierten Stromversorgung aus großen zentralen Kraftwerkseinheiten findet ein Wandel zu einer angebotsorientierten Stromversorgung auf Basis fluktuierender Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien statt. Wie auch im technischen Stromsystem, so spiegelt sich in der regulatorischen Struktur der Übergang wider. So existieren parallel Regularien, die von ihrer Logik her im alten System verankert sind neben jenen, die bereits an das neue Zielsystem angepasst sind. Daraus entstehen Zielkonflikte und sich widersprechende Anreize. In der Übergangszeit werden die wesentlichen Aspekte beider Systeme nebeneinanderstehen und unterschiedliche Relevanz haben. Die Regularien sollten soweit harmonisiert werden, dass Widersprüche in der Übergangszeit minimiert werden und für das Zielsystem Planungssicherheit hergestellt wird. Die gesetzlichen Rahmenbedingungen und Regularien für das Energiesystem und insbesondere das Stromsystem sind aktuell sehr häufigen Änderungen unterworfen, was die Planungssicherheit der Unternehmen einschränkt.

10.7.3 WIRTSCHAFTLICH

Die oberste Priorität aus Sicht der Grundstoffindustrie ist eine gesicherte, spezifikationsgerechte und kostengünstige Versorgung der Kunden mit den entsprechenden Produkten. Dies setzt umgekehrt eine gesicherte und planbare Energieversorgung für die energie- und kapitalintensiven Prozesse voraus. Sie produzieren mit relativ geringer Wertschöpfung pro eingesetzter Energiemenge, so dass eine sehr hohe Auslastung, angestrebt wird, um die Prozesse wirtschaftlich betreiben zu können.

Die Teilnahme an Energiemanagementmaßnahmen und ein einhergehende Reduktion der Auslastung ist somit nur möglich wenn die Einhaltung von spezifikationsgerechten Lieferverpflichtungen sichergestellt ist.

Darüber hinaus stehen die Erlösmöglichkeiten durch Flexibilitätsangebote prinzipiell in Konkurrenz zu anderen Erlösoptionen, wie z.B. eine höhere Auslastung durch höhere Produktion ohne akute Lieferverpflichtungen, die dann z.B. die auf einem Spotmarkt angeboten werden könnte. Unter den gegenwärtigen Bedingungen sind die Erlöse durch Flexibilitätsangebote jedoch zu gering, um mit den konventionellen Optionen der Erlösmaximierung zu konkurrieren, sodass aktuell keine oder wenn nur geringe Mengen an kurzfristiger Flexibilität an den lukrativeren Regelenenergiemärkten angeboten werden.

Selbst in den stromintensiven Prozessen der Grundstoffindustrie betragen die Stromkosten nur einen (Bruch-)Teil der Produktionskosten. Durch die enge Verknüpfung in den Prozessketten, die Wertschöpfungsketten entsprechen, führt ein Produktionsverlust im Sinne von Verzicht auf Wertschöpfung durch Produktion auch zu deutlich höheren betriebs- und volkswirtschaftlichen Kosten, als es durch die Größenordnung der Stromkosten den Anschein hat. Hinzu kommen ggfs. Investitionen in Anlagen und Kommunikationstechnologie, um zusätzliche Flexibilität anbieten zu können. Diese Kosten müssen mindestens in Form der entsprechenden Vergütung (über)kompensiert werden.

Die Unternehmen wollen in der Regel keine externe Kontrolle der eigenen Prozesse zulassen. In geringem Umfang geschieht dies bereits aktuell bei den Betrieben, die an Regelenenergiemärkten teilnehmen. Die Entscheidung über den Umfang eines externen Zugangs muss auch weiterhin in der Verantwortung der Betriebe liegen.

Aufgrund des hohen Verknüpfungsgrades der Prozess- und Wertschöpfungsketten sowie den Verpflichtungen gegenüber den Kunden, muss die Entscheidung über eine bestimmte Anfrage zur Flexibilitätsbereitstellung beim betroffenen Unternehmen verbleiben. Um dennoch eine gesicherte Flexibilität anbieten zu können, bieten sich das Poolen von möglichen Flexibilitätsmaßnahmen z.B. bei Aggregatoren an. Damit ist zwar selten die komplette mögliche Flexibilität verfügbar, wohl aber eine gesicherte mittlere Flexibilität.

Das Geschäftsmodell zum Anbieten von Flexibilität muss aus Sicht der Unternehmen klar erkennbar sein. Es muss daher sichergestellt werden, dass die entstehenden Kosten in der Bereithaltung der Infrastruktur, aber auch in den Flexibilitätsabrufen überkompensiert werden, da die Unter-

nehmen zusätzlich noch unbekannte Risiken in Bezug auf die eventuelle Schädigung ihrer Anlagen und Anlagenkomponenten ihrer Prozesse im fluktuierenden Betrieb eingehen, mit der Folge eines erhöhten Wartungs-, Reparatur und ggfs. Investitionsaufwands.

Wenn die Flexibilitätsbereitstellung erhebliche zusätzliche Investitionen erfordert, werden diese nur durchgeführt, wenn eine eindeutige Erwartungshaltung bzgl. der Anzahl der Abrufe und der ihrer Kompensation absehbar sind.

10.7.4 KULTURELL

Die Unternehmen der Grundstoffindustrie haben in der Vergangenheit erhebliche Anstrengungen im Bereich der Energieeffizienz und in der Vermeidung von Treibhausgas-Emissionen unternommen. Dabei wurden die Prozesse in ihren Betriebspunkten optimiert und möglichst vollständig ausgelastet. Die Produktionsmitarbeiter sind stolz auf ihre Prozesse und ihre Fähigkeit, diese Prozesse und die Qualität der Produkte zu beherrschen. Sie werden auch Lösungen für die Herausforderung einer Flexibilisierung ihrer Prozesse professionell erarbeiten und umsetzen.

Nichtsdestotrotz verstehen sich die Unternehmen der Grundstoffindustrie als produzierende Unternehmen und nicht als Energiemanagementdienstleister. Diese „dies ist nicht mein Geschäftsmodell“ Haltung ist in den Unternehmen noch recht verbreitet und steht einem verstärkten Einsatz von Flexibilitätsmaßnahmen im Wege. Häufig sind es die kleineren Unternehmen, die betriebsintern flexibler reagieren können und sich auf die neuen Möglichkeiten einlassen, statt nur die Risiken zu betonen.

10.8 ZUKÜNFTIGE PERSPEKTIVEN

Diese bisherige Analyse hat die Flexibilitätspotenziale und -perspektiven in der Grundstoffindustrie auf Basis von ausgewählten Prozessen erfasst. Die Untersuchungen haben einige neue und weiterführende Fragestellungen zur praxisrelevanten Bestimmung der Flexibilitätspotenziale ergeben. Im Fokus stand dabei die Validierung der Methodik und erste Einschätzungen der Flexibilitätspotenziale und ihrer Voraussetzungen und Hemmnisse in Bezug auf die betriebliche Praxis.

Die Arbeiten werden daher fortgesetzt und der erfolgreiche Ansatz, branchenübergreifend die Potenziale und Perspektiven in den Prozessen der Grundstoffindustrie methodisch zu erfassen, fortgeführt. Die Erkenntnisse werden gemeinsam diskutiert und durch die Netzwerke der Forschungseinrichtungen der Branchenverbände mit den Unternehmen reflektiert, um eine möglichst konsistente und realistische Darstellung zu erreichen.

Die Methodik wird weiterentwickelt, um auch Wärme und Brennstoffe als Energieeintrag zu berücksichtigen. Dabei wird dem Wechselspiel zwischen Prozesswärme und Strom eine besondere Bedeutung zukommen und der Aspekt der Energiespeicherung, neben der Speicherung elektrischer Energie auch den Einsatz von Hochtemperatur-Wärmespeichern umfassen. Die Ausweitung der Methodik im wirtschaftswissenschaftlichen Bereich wird die Rolle der Aggregatoren in der Vermittlung von Flexibilität zwischen Netz und Unternehmen integrieren.

IMPRESSUM

HERAUSGEBER

Dr. Florian Ausfelder
DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik
und Biotechnologie e. V.
Theodor-Heuss-Allee 25
60486 Frankfurt am Main

Dr. Antje Seitz
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR)
Pfaffenwaldring 38–40
70569 Stuttgart

Dr. Serafin von Roon
Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH, München
Am Blütenanger 71
80995 München

VERANTWORTLICH IM SINNE DES PRESSERECHTS

DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik
und Biotechnologie e. V.
Dr. Florian Ausfelder
Theodor-Heuss-Allee 25
60486 Frankfurt am Main

GESTALTUNG/SATZ

Technische Universität Darmstadt
Sandra Antes, Andreas Bonin, Emily Broschk
Institut für Produktionsmanagement,
Technologie und Werkzeugmaschinen (PTW)
Eugen-Kogon-Straße 4
64287 Darmstadt

GEFÖRDERT VOM

Bundesministerium für Bildung und Forschung

BETREUT VOM

Projektträger Jülich

Erschienen im Februar 2018 in Frankfurt am Main

1. Auflage | ISBN: 978-3-89746-206-9

BRANCHEN-ÜBERGREIFENDE ERGEBNISSE

1. **Die Einhaltung von Lieferverpflichtungen gegenüber den Kunden hat immer Priorität vor dem Anbieten von Flexibilität.**
2. Es gibt für die untersuchten Prozesse der Grundstoffindustrie eine **gegenläufige Wechselwirkung zwischen energetischer Effizienz und Flexibilität.**
3. **Änderungen der Prozessbedingungen führen zu Veränderungen der Produktqualität.**
4. **Die Wechselwirkungen zwischen häufigen, schnellen Laständerungen und deren Auswirkung auf die Anlagen und ihre kritischen Komponenten sind bisher nicht ausreichend untersucht.**
5. Die Möglichkeiten zur Flexibilisierung sind sehr stark von den **standortspezifischen Prozessketten und den Möglichkeiten zur Produktspeicherung innerhalb der Prozesskette** abhängig.
6. Die **Potenziale zur Lasterhöhung bei hoher Produktnachfrage sind sehr gering**, die **Potenziale für eine Lastreduktion sind in der Regel mit Produktionsausfall** verbunden.
7. Bei Lastverschiebung muss **sichergestellt werden, dass ausgefallene Produktion innerhalb kürzerer Zeit wieder nachgeholt werden kann.**
8. Der mögliche **Verlust der Berechtigung oder des Umfangs individueller Netzentgelte nach §19 Abs. 2 (StromNEV)** stellt eine erhebliche Hürde für das Anbieten von Flexibilität dar.
9. Die Unternehmen der Grundstoffindustrie bestehen auf einem **Primat der betrieblichen Erfordernisse** gegenüber dem externen Aufruf von Flexibilitätsoptionen.
10. Für **langfristig zu amortisierende Investitionen** wird eine **ausreichende Planungssicherheit** benötigt.
11. **Technische Limitierungen der Prozesse** sind in der Regel **nicht entscheidend für das Anbieten von Flexibilität.**

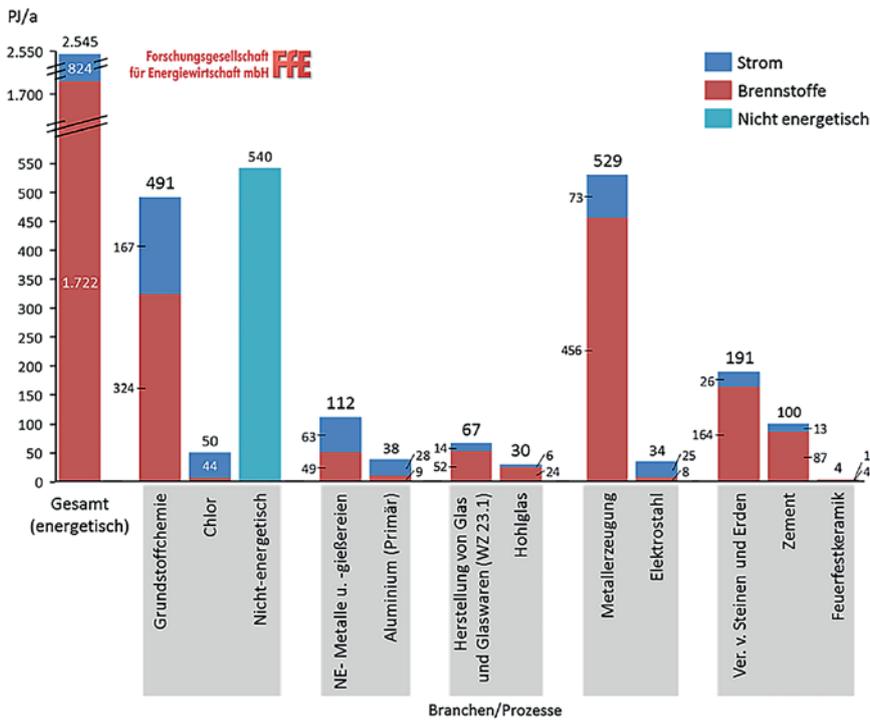


Abbildung 1: Energieeinsatz in der Grundstoffindustrie 2015 (AGEB, FhG ISI)

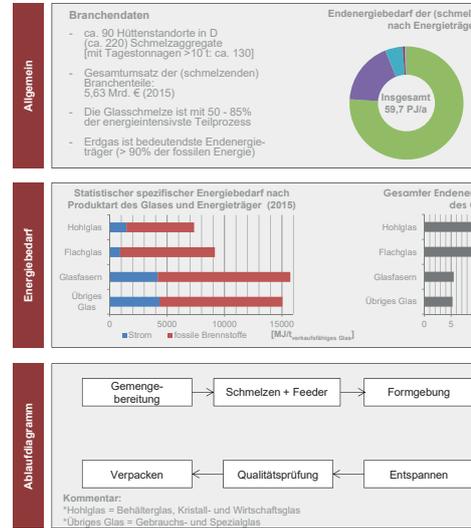


Abbildung 3.1: Branchensteckbrief Glasindustrie (Schmelzbetriebe) [2015]

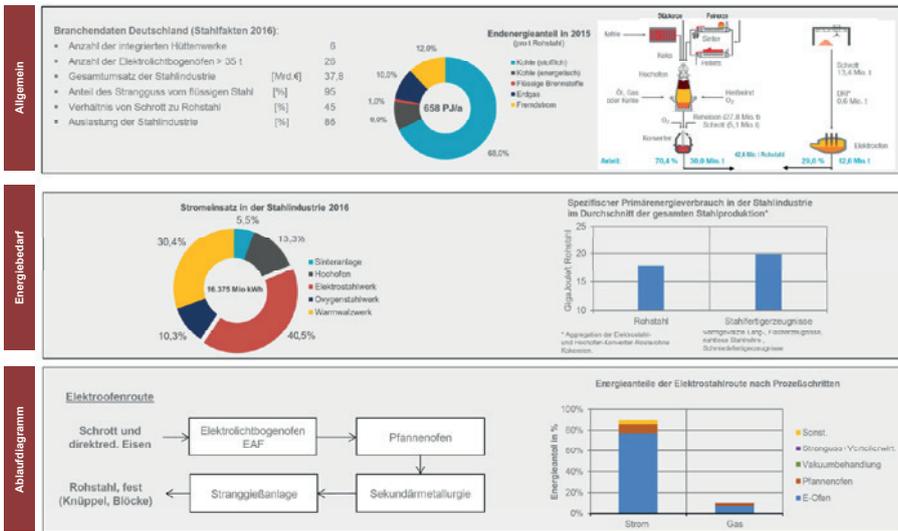


Abbildung 2.4: Branchensteckbrief Stahl

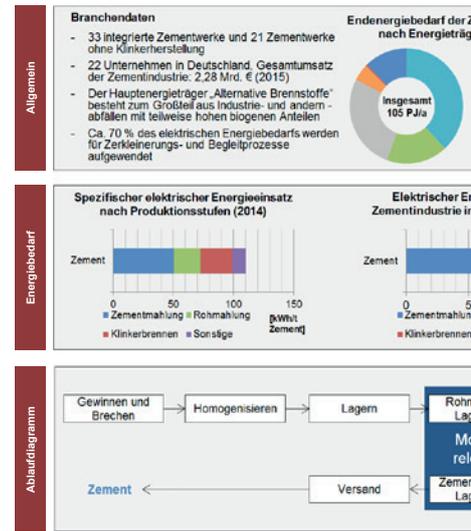
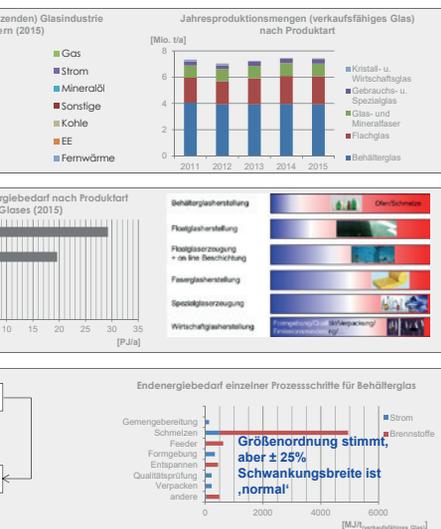
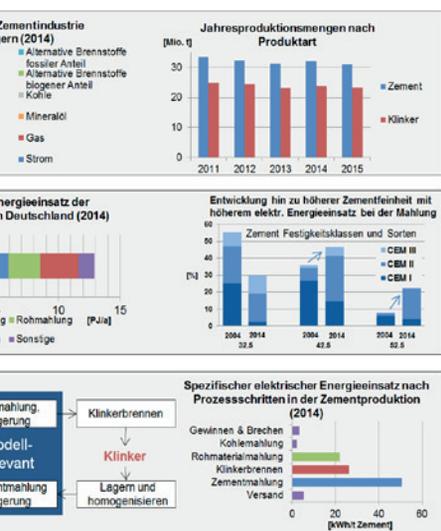


Abbildung 4.3: Branchensteckbrief zur Zementindustrie



Allgemein	Branchendaten	Energieverbrauch der chemischen Industrie	Prozessbeschreibung								
	<ul style="list-style-type: none"> Größter Stromverbraucher der chem. Industrie 1308 GW (ohne Nebenaggregate), =11 TWh/a Strombedarf (ca. 2% des dt. Stromverbrauchs) Jährliche Produktionsmenge: 4 Mio. t Cl₂ 21 Anlagen an 17 Standorten Kontinuierlicher Prozess, Auslastung ≥95% Anorganische Grundchemikalie mit standort-spezifischer Einbindung in Folgeprozesse 		<p>Allgemeine Reaktionsgleichung:</p> $2 \text{ NaCl} + 2 \text{ H}_2\text{O} \rightarrow \text{Cl}_2 + \text{H}_2 + 2 \text{ NaOH}$ <p>Verfahren (% der installierten Kapazität):</p> <ol style="list-style-type: none"> Membran-Verfahren (70%) Diaphragma-Verfahren (23%) Amalgam-Verfahren (8%) 								
Auslastung und Effizienz		Das Wichtigste in Kürze	Wechselwirkungen zwischen Effizienz und Flexibilität								
	<ul style="list-style-type: none"> Mögliche Flexibilität hängt von Auslastung ab Laständerungen ändern die Produktmenge Muss zeitnah kompensiert werden, um Folgeprozesse zu versorgen 	<ul style="list-style-type: none"> Die CAE ist ein kontinuierlicher Prozess, verknüpft mit Folgeprozessen im Verbundstandort Flexibilitätsoptionen standortspezifisch Über- oder Unterproduktion muss sehr zeitnah kompensiert werden Begrenzung der Flexibilitätsoptionen durch Bedingungen des §19.2 StromNEV PVC Produktion verläuft über EDC als speicherbares Zwischenprodukt → eröffnet Flexibilitätsperspektiven 	<p>Spezifische Effizienz der Elektrolyse nimmt mit abnehmender Stromstärke zu</p> <ul style="list-style-type: none"> bei geringerer Leistung ist Elektrolyse spezifischer effizienter Nachholung der Produktion erfordert mehr Strom für die gleiche Menge Chlor Lastenniedrigung schneller möglich als -erhöhung 								
Flexibilitätspotenziale und -perspektiven	Schematische Darstellung der VCM-Produktion auf Basis des Vinnolit-Prozesses	Flexibilitätspotenziale und -perspektiven	Teillastpotenzial								
		<ul style="list-style-type: none"> Teillastbetrieb Nutzung von Ethylendichlorid (EDC) als speicherbares Zwischenprodukt für Polyvinylchlorid (PVC) Standorte Schaltbare Sauerstoffverzehrkathoden (SVK) erlauben kontinuierliche Chlorproduktion unter Variation der Wasserstoffproduktion → bis zu 20% Lastreduktion, abhängig vom Wasserstoffbedarf des Standortes 	<table border="1"> <tr> <td>Typische Anlagen-größe in MW</td> <td colspan="2">30 – 150</td> </tr> <tr> <td>Technisches Potenzial</td> <td>Negativ</td> <td>Positiv</td> </tr> <tr> <td>Potenzial in MW oder %</td> <td>-10-50% bedingt Nachholung der Produktion</td> <td>±5%, abhängig von Auslastung</td> </tr> </table>	Typische Anlagen-größe in MW	30 – 150		Technisches Potenzial	Negativ	Positiv	Potenzial in MW oder %	-10-50% bedingt Nachholung der Produktion
Typische Anlagen-größe in MW	30 – 150										
Technisches Potenzial	Negativ	Positiv									
Potenzial in MW oder %	-10-50% bedingt Nachholung der Produktion	±5%, abhängig von Auslastung									

Abbildung 5.2: Branchensteckbrief Chemische Industrie Chlor-Alkali Elektrolyse



Allgemein	Branchendaten	Jahresproduktionsmengen nach Produktart	Endverbraucher feuerfester Erzeugnisse
	<ul style="list-style-type: none"> 61 Betriebe und assoziierte Unternehmen Gesamtumsatz der Keramikindustrie: 5,3 Mrd. € (2015), davon 1,5 Mrd. € für feuerfeste keramische Werkstoffe Keramikprodukte und Rohstoffe decken das gesamte Spektrum der spezifischen Energieverbräuche zur Produktion ab Die energieintensivsten Prozessschritte in der Feuerfest-Keramikindustrie sind die Sinterbrände 		
Energiebedarf	Statistischer spezifischer Energiebedarf nach Keramik-Produkten (2014)	Gesamter Endenergiebedarf nach Keramik-Produkten (2014)	Energieträger zur Feuerfest-Produktion
Ablaufdiagramm	Produktionsprozess	Ablaufdiagramm	

Abbildung 6.2: Branchensteckbrief für die Feuerfest-Industrie

ÜBER DIESES BUCH

Die energieintensiven Prozesse der Grundstoffindustrie stellen einen Großteil des industriellen Strombedarfs in Deutschland. Der zunehmende Beitrag fluktuierender erneuerbarer Stromerzeugung im Stromsystem führt absehbar zu einem erhöhten Bedarf an flexibler Leistung. Dies erfordert ein fundamentales Umdenken in der Art und Weise, wie Strom in den Prozessen der energieintensiven Grundstoffindustrie genutzt wird. Ausgehend von einer branchenübergreifenden Methodik werden jeweils in ausgewählten Prozessen aus der Eisen- und Stahl-, Glas-, Zement-, Chemie- und Feuerfestindustrie aktuelle und zukünftige Flexibilisierungsoptionen umfassend untersucht und durch die Branchennetzwerke validierte technische Flexibilisierungspotenziale ausgewiesen. Neben den prozessspezifischen technischen Limitierungen werden auch übergeordnete Aspekte, wie regulatorische und betriebswirtschaftliche Hemmnisse analysiert. Dabei werden nicht nur die Erkenntnisse der einzelnen Branchen zusammengefasst, sondern branchenübergreifend die Herausforderung und Rahmenbedingungen herausgearbeitet. Dieser Bericht gibt damit einen fundierten Überblick über die Möglichkeiten und Limitierungen, die sich für eine Flexibilisierung der Prozesse der Grundstoffindustrie ergeben.



DR. FLORIAN AUSFELDER

ist seit 2017 Teamleiter und Themensprecher für den Bereich „Energie und Klima“ in der DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V. Er hat Chemie in Karlsruhe studiert und in Edinburgh in Physikalischer Chemie promoviert. Nach Post-Doc-Aufenthalten in den USA und Spanien trat Dr. Ausfelder 2007 als wissenschaftlicher Mitarbeiter in die DECHEMA ein, wo er verschiedene Gremien und Forschungsprojekte im Energiebereich betreut.



DR. ANTJE SEITZ

leitet seit 2011 die Abteilung Thermische Prozesstechnik am Institut für Technische Thermodynamik des DLR. Sie hat Verfahrenstechnik an der Universität Stuttgart studiert und dort auch promoviert. Frau Dr. Seitz verantwortet am DLR und in der Helmholtz Gemeinschaft die Entwicklung thermischer Energiespeicher und deren Integration in industrielle und Kraftwerksprozesse. In nationalen und internationalen Netzwerken fördert sie den Austausch zwischen Industrie und Forschung, um innovative thermische Energiespeichersysteme für die Transformation des Energiesystems nutzbar zu machen.



DR. SERAFIN VON ROON

ist seit 2011 Geschäftsführer der Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft. Er hat Wirtschaftsingenieurwesen an der TU Berlin studiert und an der TU München promoviert. Von 2003 bis 2011 verantwortete er an der FfE e.V. die Themen System- und Marktanalysen. Seine Forschungsschwerpunkte sind industrielle Energiewirtschaft sowie Systemintegration von erneuerbaren Energien. Seit 2016 hat er einen Lehrauftrag an der TU München.



GEFÖRDERT VOM



BETREUT VOM



FLEXIBILITÄTSOPTIONEN IN DER GRUNDSTOFFINDUSTRIE II

ANALYSEN | TECHNOLOGIEN | BEISPIELE

Herausgeber:
Florian Ausfelder
Serafin von Roon
Antje Seitz



GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

KOPERNIKUS
SynErgie **PROJEKTE**
Die Zukunft unserer Energie

Kapitel 1: Hybridisierung von Prozesswärme

Eine Methodik zur Anwendung alternativer elektrischer Heizverfahren in Prozessen der Grundstoffindustrie wurde auf die Schlüsselproduktionsprozesse der Glas-, Papier- und Zementindustrie angewandt. Während die technologischen Hemmnisse für einen Einsatz dieser Technologien in der Glas- und Zementindustrie groß sind, könnte eine hybride Beheizung in der Papierindustrie umgesetzt werden und damit ein zusätzliches Flexibilitätspotenzial erschließen.

Kapitel 2: Industrielle Wärmenetze

Die Hybridisierung industrieller Wärmenetze, also die parallele Möglichkeit Wärme mit elektrischen Verfahren oder über Brennstoffe bereitzustellen, generiert eine flexible Leistung von 4,7 GW bis 14,5 GW bei 4000 Volllaststunden in Abhängigkeit des verwendeten Szenarios. Bei einer aktuell mittleren Stromnachfrage in Deutschland von 59 GW könnte die Hybridisierung der industriellen Wärmenetze somit einen signifikanten Beitrag zur Flexibilisierung der Stromnachfrage liefern.

Kapitel 3: Thermische Speicher

Elektrisch beheizte thermische Speicher ermöglichen einen Beitrag thermischer Prozesse zur Flexibilitätsbereitstellung durch eine zeitliche Entkopplung der Wärmeerzeugung und -nutzung. Für die Grundstoffindustrien sind prinzipiell verschiedene Anwendungen denkbar. Die größten Potenziale bestehen in der Prozessdampfbereitstellung in der chemischen Industrie und in Aggregaten der Feuerfestindustrie.

Kapitel 4: Variation von Erdgaszusammensetzung

Änderungen der Gaszusammensetzung werden für industrielle Gasnutzer als gut beherrschbar eingeschätzt, wenn sie zeitlich konstant sind, technisch beherrschbar, wenn sie zeitlich planbar variieren und als sehr schwer technisch beherrschbar, wenn die Änderungen der Gaszusammensetzung zeitlich nicht planbar variieren.

Kapitel 5: Synthetische Gase

Synthetische Gase werden an Bedeutung zunehmen. Hierzu zählen elektrolytisch erzeugter Wasserstoff, synthetisches Methan und Biomethan. Letztere sind mit der bestehenden Infrastruktur kompatibel.

Kapitel 6: Hemmnisanalyse

Eine Hybridisierung der Wärmeerzeugung, der Einsatz von thermischen Speichern sowie die Nutzung synthetischer Brenngase eröffnen Flexibilitätspotenziale in Hochtemperaturprozessen der Grundstoffindustrien. Die Hemmnisse, die einer Hebung dieser Flexibilitätspotenziale entgegenstehen, wurden aus technischer, organisatorischer, ökonomischer und regulatorischer Sicht erhoben und branchenübergreifend diskutiert.

Kapitel 7: Ökonomische Bewertung

Die Effekte, die durch zusätzliche Strompreisbestandteile neben dem Börsenstrompreis, auf das Anbieten von Flexibilität entstehen, werden am Beispiel einer hybriden Beheizung einer Glaswanne, der Herstellung und Verbrennung von Synthesegas sowie einer elektrischen Verbrennungsluftvorwärmung untersucht. Die Bereiche, in denen ein Anbieten von Flexibilität betriebswirtschaftlich im Rahmen der verwendeten Modelle sinnvoll erscheinen, können bereits durch kleine Änderungen der Strompreisbestandteile und der Investitionskosten der Technologien verschlossen werden. Der Bereich wo dies möglich ist wird mit größerer Strompreisvolatilität jedoch größer.

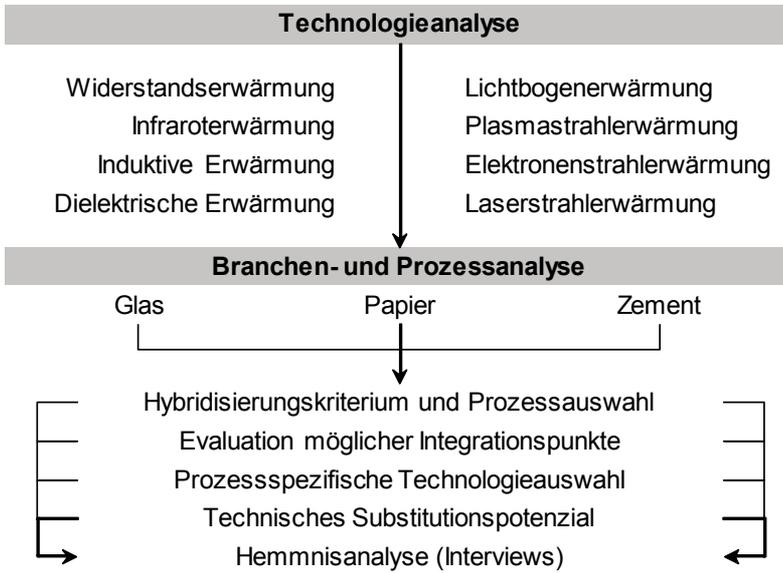


Abbildung 1.1: Methodik zur Potenzialermittlung.

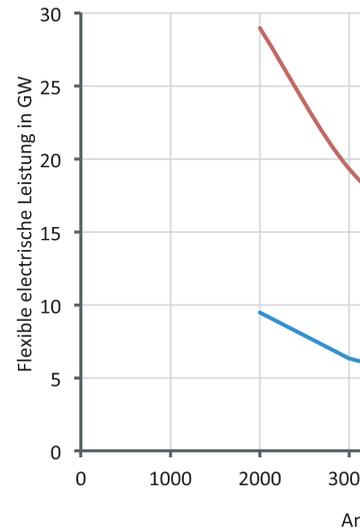


Abbildung 2.4: Darstellung der flexiblen elektrischen Leistung in hybriden Wärmenetzen in der Industrie.

	Anforderungsprofil 1	Anforderungsprofil 2	Anforderungsprofil 3
Vorankündigungszeit	nicht relevant	2-5 Tage	Minuten bis Stunden
Zeit bis Erreichen	–	1 h / 36 km	1 h / 36 km
Dauer	nicht relevant	bis mehrere Tage	kurze Zeiträume
max. Gradienten	nicht relevant	Gradient des H ₂ -Speichers	Gradient des H ₂ -Speichers
wesentlicher Handlungsbedarf	Umrüstung Messtechnik	Messtechnik alternative Produktionspfade Hybridisierung	Messtechnik Hybridisierung Abschaltung
zusätzliche Kosten	Investition in Umrüstung	Investition in Alternativtechnologien, höhere Betriebskosten	Investition in Alternativtechnologien, höhere Betriebskosten; mögl. Produktionsausfall
Graphische Darstellung			

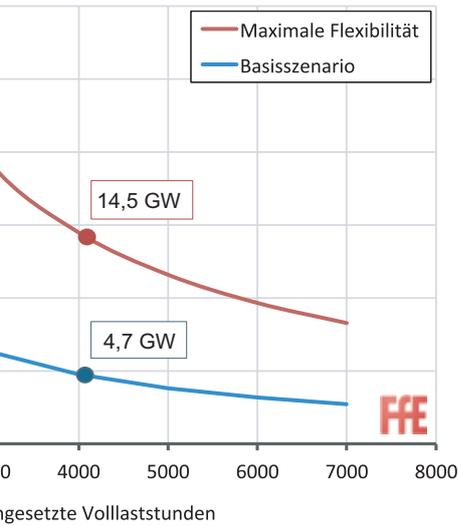
Abbildung 4.3: Wichtige Parameter der verschiedenen Anforderungsprofile im Vergleich.



Abbildung 5.1: Schematische Abbildung der Stromerzeugung über Wasserelektrolyse.

Abbildung 5.2: Schematische Abbildung der Wasserstoffproduktion.

Abbildung 5.3: Schematische Prozesskette der Wasserstoffnutzung.



flexiblen elektrischen Leistung, welche von Industrie bereitgestellt werden könnten.

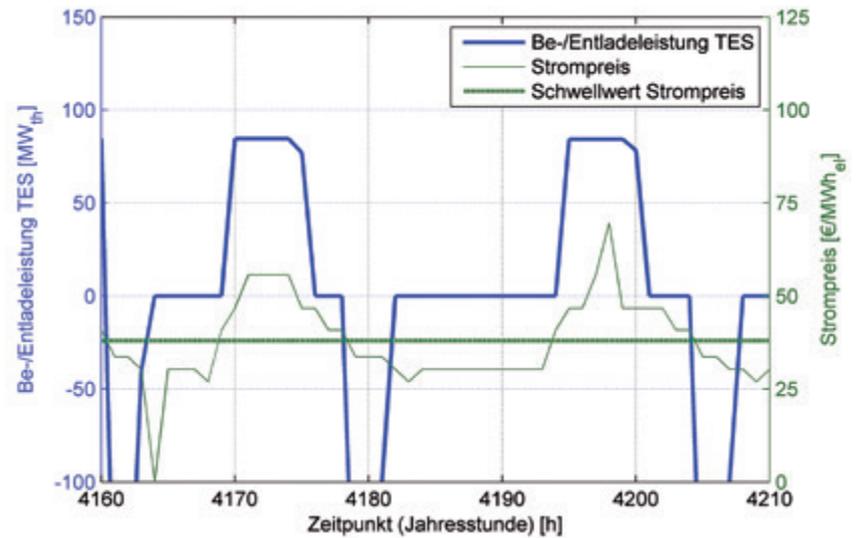
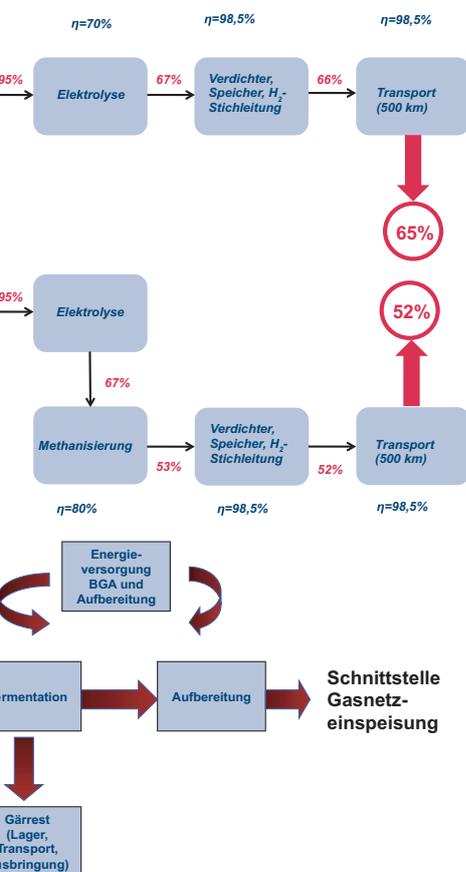


Abbildung 3.4: Beispielhafter Verlauf des Strompreises und der Be-/Entladeleistung des Speichers.



ung der Prozesskette Wasserstofferzeugung

ung der Prozesskette EE-Methan.

skette Biomethan auf Basis nachwachsender Rohstoffe.



Abbildung 6.1: Analyserahmen.

FLEXIBILITÄTSOPTIONEN IN DER GRUNDSTOFFINDUSTRIE II

ANALYSEN | TECHNOLOGIEN | BEISPIELE

Herausgeber:

Florian Ausfelder

Serafin von Roon

Antje Seitz

Bericht des AP V.6 „Flexibilitätsoptionen und Perspektiven in der Grundstoffindustrie“
im Kopernikus-Projekt „SynErgie – Synchronisierte und energieadaptive Produktionstechnik
zur flexiblen Ausrichtung von Industrieprozessen auf eine fluktuierende Energieversorgung“,
gefördert durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung.

Förderkennzeichen:

03SFK3P0 (VDEh-BFI)

03SFK3S0 (DIW)

03SFK3N0 (DEC)

03SFK3C1 (DLR)

03SFK3M1 (FGF)

03SFK3O0 (FFE)

03SFK3M0 (HVG)

03SFK3E1 (TUM)

03SFK3K0 (VDZ)

03SFK3L0 (WI)

HERAUSGEBER

Florian Ausfelder

florian.ausfelder@dechema.de

DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V.
Theodor-Heuss-Allee 25
60486 Frankfurt am Main

Serafin von Roon

sroon@ffe.de

Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH
Am Blütenanger 71
80995 München

Antje Seitz

antje.seitz@dlr.de

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR)
Institut für Solarforschung
Pfaffenwaldring 38-40
70569 Stuttgart

AUTOREN

Karin Arnold

karin.arnold@wupperinst.org

Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie
gGmbH Döppersberg 19
42103 Wuppertal

Florian Ausfelder

florian.ausfelder@dechema.de

DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik
und Biotechnologie e.V.
Theodor-Heuss-Allee 25
60486 Frankfurt am Main

Philipp Bartsch

philipp.bartsch@dlr.de

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
(DLR) Institut für Technische Thermodynamik
Pfaffenwaldring 38-40
70569 Stuttgart

Thomas Bayer

thomas.bayer@Infraserv.com

Infraserv GmbH & Co. Höchst KG
Industriepark Höchst
65926 Frankfurt am Main

Christian Dannert

dannert@fg-feuerfest.de

Forschungsgemeinschaft Feuerfest e. V. (FGF)
Rheinstraße 58
56203 Höhr-Grenzhausen

Christa Dufter

cdufter@ffe.de

Forschungsgesellschaft für
Energiewirtschaft mbH
Am Blütenanger 71
80995 München

Hanna Ewa Dura

hanna.dura@dechema.de

Theodor-Heuss-Allee 25
60486 Frankfurt am Main

Jonas Fischer

fischer@fg-feuerfest.de

Forschungsgemeinschaft Feuerfest e. V. (FGF)
Rheinstraße 58 56203 Höhr-Grenzhausen

Tobias Fischer

Tobias.Fischer@Infraserv.com

Infraserv GmbH & Co. Höchst KG
Industriepark Höchst
65926 Frankfurt am Main

Bernhard Fleischmann

fleischmann@hvg-dgg.de

Hüttentechnische Vereinigung der Deutschen
Glasindustrie e.V.
Siemensstraße 45
63071 Offenbach am Main

Michael Frank

michael.frank@Infraserv.com

Infraserv GmbH & Co. Höchst KG
Industriepark Höchst
65926 Frankfurt am Main

Kirstin Ganz

kganz@ffe.de

Forschungsgesellschaft für
Energiewirtschaft mbH
Am Blütenanger 71
80995 München

Anna Gruber

agruber@ffe.de

Forschungsgesellschaft für
Energiewirtschaft mbH
Am Blütenanger 71
80995 München

Andrej Guminski

aguminski@ffe.de

Forschungsgesellschaft für
Energiewirtschaft mbH
Am Blütenanger 71
80995 München

Georg Holtzgeorg.holtz@wupperinst.org

Wuppertal Institut für Klima, Umwelt,
Energie gGmbH
Döppersberg 19
42103 Wuppertal

Seyed Saeed Hosseiniounshosseinioun@diw.de

DIW Berlin
Mohrenstr. 58
10117 Berlin

Tobias Hübnerthuebner@ffe.de

Forschungsgesellschaft für
Energiewirtschaft mbH
Am Blütenanger 71
80995 München

Timo Kerntkern@ffe.de

Forschungsgesellschaft für
Energiewirtschaft mbH
Am Blütenanger 71
80995 München

Britta Kleinertzbkleinertz@ffe.de

Forschungsgesellschaft für
Energiewirtschaft mbH
Am Blütenanger 71
80995 München

Olaf Krausekrause@fg-feuerfest.de

Forschungsgemeinschaft Feuerfest e. V. (FGF)
Rheinstraße 58
56203 Höhr-Grenzhausen

Stefan Lindnerstefan.lindner@rohrdorfer.eu

Rohrdorfer Gruppe
Sinning 1
83101 Rohrdorf

Steffen Möhringsteffen.moehring@bfi.de

VDEh-Betriebsforschungsinstitut GmbH
Sohnstraße 65
40237 Düsseldorf

Roland Pietruckroland.pietruck@bfi.de

VDEh-Betriebsforschungsinstitut GmbH
Sohnstraße 65
40237 Düsseldorf

Andreas Queckandreas.queck@bfi.de

VDEh-Betriebsforschungsinstitut GmbH
Sohnstraße 65
40237 Düsseldorf

Jörn Constantin Richsteinjrichstein@diw.de

DIW Berlin
Mohrenstr. 58
10117 Berlin

Holger Rosemannholger.rosemann@bfi.de

VDEh-Betriebsforschungsinstitut GmbH
Sohnstraße 65
40237 Düsseldorf

Sebastian Röschsebastian.roesch@vdz-online.de

VDZ gGmbH
Tannenstraße 2
40476 Düsseldorf

Johannes Ruppertjohannes.ruppert@vdz-online.de

VDZ gGmbH
Tannenstraße 2
40476 Düsseldorf

Stefan Seemannstefan.seemann@vdz-online.de

VDZ gGmbH
Tannenstraße 2
40476 Düsseldorf

Ansgar TaubitzAnsgar.taubitz@wupperinst.org

Wuppertal Institut für Klima, Umwelt,
Energie gGmbH
Döppersberg 19
42103 Wuppertal

Kevin Treiberkevin.treiber@vdz-online.de

VDZ gGmbH
Tannenstraße 2
40476 Düsseldorf

Frank Veitengruberfveitengruber@ffe.de

Forschungsgesellschaft für
Energiewirtschaft mbH
Am Blütenanger 71
80995 München

Serafin von Roonsroon@ffe.de

Forschungsgesellschaft für
Energiewirtschaft mbH
Am Blütenanger 71
80995 München

Hartmut Wuthnowwuthnow@fg-feuerfest.de

Forschungsgemeinschaft Feuerfest e. V. (FGF)
Rheinstraße 58
56203 Höhr-Grenzhausen

Daniel Zinsmeisterd.zinsmeister@tum.de

TU München
Arcisstr. 21
80333 München

Stefan Zunftstefan.zunft@dlr.de

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
(DLR)
Institut für Technische Thermodynamik
Pfaffenwaldring 38-40
70569 Stuttgart

BETEILIGTE PROJEKTPARTNER

DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik
und Biotechnologie e.V.,
Frankfurt am Main (DEC)



Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung,
Berlin (DIW)



Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
Stuttgart (DLR)



Forschungsgemeinschaft Feuerfest e.V.,
Höhr-Grenzhausen (FGF)



Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH,
München (FFE)



Hüttentechnische Vereinigung der Deutschen
Glasindustrie e.V.,
Offenbach am Main (HVG)



Infraserv GmbH & Co. Höchst KG,
Frankfurt am Main (ISH)



Rohrdorfer Gruppe,
Rohrdorf (RG)



Technische Universität München, Lehrstuhl für
Energiewirtschaft und Anwendungstechnik,
München (TUM)



VDEh-Betriebsforschungsinstitut GmbH,
Düsseldorf (BFI)



Verein der Zementindustrie gGmbH,
Düsseldorf (VDZ)



Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH,
Wuppertal (WI)



VORWORT

Liebe Leserin, lieber Leser,

mit einem zunehmenden Ausbau fluktuierender erneuerbarer Stromerzeugung, hauptsächlich Windkraft und Photovoltaik, ist die Verfügbarkeit von Strom mittel- bis langfristig abhängig von meteorologischen Gegebenheiten. Es stellt sich zum einen die Frage, wie die erneuerbaren Strommengen in Zeiten hoher Erzeugung sinnvoll genutzt werden können und zum anderen inwiefern zu Zeiten geringer Stromerzeugung diese ausgeglichen werden kann. Die energieintensive Grundstoffindustrie stellt die größten industriellen Stromverbraucher und dennoch ist Strom in der Regel nicht der Hauptenergieträger der jeweiligen Branche.

Das Anbieten von positiver Flexibilität, also die Reduzierung der elektrischen Last eines Prozesses, bzw. negativer Flexibilität, die Erhöhung der elektrischen Last eines Prozesses, muss im Kontext eines sicheren Prozessfensters und der Einhaltung der Produktspezifikationen und Lieferverpflichtungen erfolgen.

In dem ersten Band (Flexibilitätsoptionen in der Grundstoffindustrie; Methodik – Potenziale – Hemmnisse; Ausfelder, von Roon, Seitz) wurden Schlüsselproduktionsprozesse der Grundstoffindustrie anhand einer neu entwickelten Methodik auf ihr jeweiliges Flexibilitätspotenzial untersucht. Da die Hauptprozesse der Grundstoffindustrie Wärme und damit i.d.R. Brennstoff-betrieben sind, waren große Energiemengen der Flexibilitätsbetrachtung nicht zugänglich.

Im vorliegenden Band wird daher die Betrachtung erweitert um Aspekte, die zumindest eine teilweise Erschließung dieses Potenzial versprechen.

Hybridisierung des Wärmeeintrags:

Die Möglichkeit die Wärme in einen Prozess entweder über Brennstoffe oder über Strom einzutragen eröffnet eine erhebliche Flexibilitätsperspektive. Für den Eintrag über elektrische Energie stehen verschiedene Technologien zur Verfügung, die je gewünschter Anwendung genutzt werden können. In jedem Fall sind parallel zwei Wärmeerzeuger notwendig, die sich zumindest teilweise ersetzen können.

Thermische Speicher:

Ein elektrisch beheizter thermischer Speicher kann die gleiche Funktionalität wie ein direkter elektrischer Wärmeeintrag erfüllen. Zusätzlich wird durch die Speicherfunktion die Notwendigkeit der Wärmeerzeugung und der -nutzung zeitlich entkoppelt und somit eine Flexibilitätsperspektive erzeugt.

Synthetische Brenngase:

Die aktuellen Prozesse beruhen auf der Nutzung fossiler Brennstoffe. Die Nutzung erneuerbarer Gase kann einen Beitrag zur Defossilisierung der Grundstoffindustrie leisten und hätte den Vorteil, dass die bestehenden Prozesse mit relativ geringen Änderungen weiter betrieben werden könnten. Wenn diese synthetischen Brenngase (Wasserstoff und Methan) über Elektrolyse erzeugt werden, so stellt diese in Kombination mit einem Wasserstoffspeicher ebenfalls ein Flexibilitätspotenzial dar.

Die folgenden Kapitel beschreiben zuerst die notwendigen methodischen Aspekte, nehmen darüber hinaus schon Bezug auf die später folgenden Kapitel, in denen einzelne relevante Aspekte aus den beteiligten Branchen der Grundstoffindustrie, Stahl- und Eisenerzeugung, Glasherstellung, Zementproduktion, chemische Industrie und die Herstellung von Feuerfestmaterialien vertieft und ausführlich aus technischer Sicht beleuchtet werden. Diese Betrachtungen werden ergänzt um eine Hemmnisanalyse und eine wirtschaftliche Modellierung einiger Flexibilitätsoptionen.

Die enge und vertrauensvolle Zusammenarbeit zwischen den Projektpartnern hat, aus unserer Sicht, neue relevante Perspektiven auf das Thema der Flexibilitätsoptionen erschlossen. Wir hoffen, dass Sie die Lektüre dieses Buches als anregend und interessant empfinden und wir damit einen Beitrag zur Debatte über die mögliche Ausgestaltung und Rolle der Grundstoffindustrie im Kontext der Energiewende leisten können.



Florian Ausfelder
DECHEMA Gesellschaft
für Chemische Technik
und Biotechnologie e.V.



Serafin von Roon
Forschungsgesellschaft für
Energiewirtschaft mbH



Antje Seitz
Deutsches Zentrum für
Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR)

EXECUTIVE SUMMARY

Chapter 1 discusses hybridization as a flexibility option. In the course of the expansion of volatile, renewable energy production, it is increasingly important to establish a grid-service operation of consumers. One possibility is the hybrid generation of industrial process heat for the energy-intensive primary industry.

The aim is to demonstrate both hybridisation potentials and cross-sector obstacles to fuel-based industrial processes using the example of the glass, paper and cement industries. The developed methodology consists of an upstream technology analysis as well as an industry and potential analysis. Suitable process steps are first identified for each branch of industry with the aid of a hybridisation criterion. On the basis of the agreement and linkage of the process properties with the technology criteria, a process-specific technology selection of electrothermal processes takes place. On this basis, the hybridisation potential is quantified in the form of a technical substitution potential for hybrid heat generation. Finally, barriers to hybrid process heat generation will be identified in expert interviews.

Chapter 2 addresses the possible contribution of industrial thermal grids. For a cost-efficient energy supply based on intermittent renewable energies, different flexibility options are needed. In Germany, the industrial thermal energy demand accounts for 22 % of the overall energy demand. Hereby, a significant amount is provided by thermal networks. The aim of this analysis is to estimate the flexibility potential, which industrial thermal networks could currently provide to the electricity supply system through an on-site connection of fuel-based heat supply technologies with electricity-based ones (hybridisation).

A top-down and bottom-up analysis of the German industrial thermal energy demand is presented and relevant data for network-based heat supply is extracted. From this, the yearly thermal energy provided by fossil fuel-based industrial thermal networks is determined as well as their potential flexible electrical load.

Chapter 3 focuses on providing (electrical) flexibility by means of high temperature thermal energy storage systems (TES). Sections 3.1 and 3.2 address general aspects like available storage technologies and electro-thermal charging of TES.

In sections 3.3 to 3.8 the individual sectors of process industries are analyzed. Based on a key process for each sector, the potential of storage integration for flexible power consumption is evaluated. The results can be summarized as follows:

The electric steel making process currently offers no promising options for TES integration. Refractory and glass industries offer potential for supplying process heat from electrically charged TES. In kilns and sintering furnaces of refractory industries, a partial substitution of burners and preheating of combustion air can be achieved through the provision of hot air from a TES. In glass industries an electrically heated TES can be used to preheat the batch at the glass furnace.

In chemical industries, the provision of process steam from combined cycle power plants opens flexibilisation opportunities through the integration of a TES integration into the exhaust gas system of the gas turbine. By this means, the steam generation can be decoupled from the operation of the gas turbine which thus can be operated in a flexible way.

In cement industries, no potential for storage integration could be identified. Prospectively, the calcium oxide (CaO), generated in the clinker burning process could be used as thermochemical storage medium. However, the components and technologies involved in such a concept (such as electrically heated (pre-) calciners) currently are in a very early stage of development.

Chapter 4 describes likely transitions in natural gas composition in the context of the transition of the German energy system, gaseous energy sources are strongly discussed as a counterpart to volatile

renewables. Power-to-Gas (PtG) in particular provides a decarbonisation measure with a high potential for flexibility. Feeding into the natural gas grid, however, changes the gas composition from pure natural gas to a gas mixture containing synthetic methane and hydrogen (H₂). The modified gas composition poses challenges for the industry, which will be analysed with the following requirement profiles.

The first requirement profile represents the situation for a constant H₂ feed and thus a constant volume fraction of renewable gas in the gas mixture. This situation arises, for example, from the feed-in of a PtG or biogas plant, which is constantly operated at full load. In the second requirement profile, a fluctuating but predictable volume fraction of renewable gases in the gas mixture is assumed. This means that changing gas compositions are assumed, e.g. due to the volatile feed of a PtG plant near a wind farm, which converts excess electricity into H₂. The last requirement profile poses the greatest challenges to the industry, as it is assumed that there will be unpredictable fluctuations that may occur, for example, due to the provision of control power by PtG plants or forecast errors for renewable energy generation.

In the context of energy system transformation, synthetic gases are discussed as a means of decarbonizing the gas sector. The focus is on hydrogen - produced by electrolysis - as well as synthetic methane (EE methane), which is produced from the methanisation of the previously produced hydrogen. In order to provide truly greenhouse gas-neutral energy carriers, it is assumed that the energy used is regeneratively generated electricity from solar and wind power plants.

Biomethane is currently already being fed into the natural gas grid as an exchange gas; the potential is expected to remain rather low due to the sustainability requirements placed on agriculture as a substrate supplier.

The feed-in of alternative gases into the existing gas grid is determined by the regulations of the DVGW (German Gas and Water Association), which, among other things, specify the characteristics of the gas that have to be maintained. These characteristics (calorific value, density, Wobbe index, methane number) span a map within which the gas composition is permissible. However, fluctuations in the gas quality can also occur within this map, which can already lead to the end user having to adapt the burners etc., depending on the application. Accordingly, sensors and measuring equipment would have to be installed upstream, which currently cannot be assumed for every consumer.

A barrier analysis presented in chapter 6 accompanied and supported the investigations carried out by the project partners with regard to hybridisation of process heat and the use of synthetic gases and thermal storage in selected heat-intensive processes in the steel, chemical, cement, glass and refractory industries. An analytical framework was developed which covers organisational, regulatory and economic barriers in addition to technical ones. Expert interviews were conducted to collect the data, the results of which were supplemented by literature research. In this chapter, the results of the barrier analysis are brought together across industries.

18 cross-industry barriers and five cross-industry flexibilisation options are generalised and concrete examples from the sectors examined are given for illustration purposes. In summary, it can be stated that the easiest flexibility option to implement from an industrial point of view is the provision of synthetic gases in a specified and constant composition via the natural gas network, since in this case a (minor) adaptation of the established and tested production processes and the associated technical facilities would be necessary at most. On the basis of the discussions held, hybridisation of heat input into processes in their current form appears to be possible only in a few cases for process engineering reasons. Under today's conditions, hybridisation is also made more difficult by electricity costs, which are very high compared to the costs of fossil fuels. With regard to the integration of thermal storage, various process-specific, technically plausible starting points have been identified.

In chapter 7 three reference processes in the basics materials industry are examined in detail with two different numerical models. The goal is to analyze under which market and regulatory conditions these processes can offer economically viable demand response.

With the first optimization model the glass melting process in the container glass production is analyzed in order to investigate the impact of flexibly operating a hybrid (gas and electric) melting process. Cost savings are quantified, as well as the impact of CO₂ prices, grid fees and other fees on demand response provision.

With the second model, two processes are analyzed: the combustion of synthesis gas in a (fictional) exemplary plant of the refractory industry, as well as the hybrid associated pre-heating process of the combustion air for thermal burners.

Chapter 8 takes a closer look at the operating characteristics of an electric arc furnace for the production of electric steel were evaluated over a representative production period. The measured data were analysed with regard to temporal and spatial aggregation. Specific parameters of process utilization and electrical power consumption were checked. In addition, duration lines with differently aggregated energy data were determined, which can form a basis for future estimates of the flexibility potential of electric arc furnaces in the steel industry.

Furthermore, experiments for the supply of control energy for an oxygen generation plant are reported. In addition, the mode of operation of ladle furnaces in the secondary metallurgy of steelworks and their flexibility are explained.

Hot rolling mills are a possible perspective for the hybrid heating of subsystems of steel production. There a media preheating of combustion air with integration of electrical heating elements is conceivable. Finally, perspectives for the use of synthetic gases are presented, with which the demand for fossil fuels for steel production could be reduced.

Chapter 9 addresses two different glass production process, container and float glass production, were investigated regarding the use of renewable energies that are not steadily available but fluctuate in quantity and price. Both production processes represent 85 % of the annual tonnage and energy consumption for glass production in Germany. Whereas the electric boosting of container glass furnaces provides a certain technical flexibility potential for short time actions, the float glass production shows no appreciable flexibility for any asked flexibility profile. Thus the maximum technical flexibility potential comes to ± 550 GWh/a with a consumption of electric power of about 3000 GWh/a by glass melting sites.

The national and international debate on the adjustment and adaptation of glass melting furnaces to fulfill the requirements for CO₂ neutrality are lively at the moment. Both concepts, all electric melting and hybrid melting furnaces are investigated and computation of simulation model are carried out to evaluate the new and adapted furnace concepts.

Chapter 10 assess the practical potential for flexible load management in cement grinding as a reference process based on production data of two different cement plants. The developed model compares flexible grinding mode with the reference grinding mode according to defined cross-sectorial demand profiles 1, 2 and 3 for different temporal scales of load shifting. The additional results for a second cement plant confirm again the principal dependence of the potential for flexible load management on installed mill drive power and the utilization rate. They are similar to results of the first cement plant and show a comparable scale.

The economical conditions and obstacles during flexible operation of cement mills were assessed based on cost-indexes for two different historical reference years and electricity prize scenarios for the year 2030. The results show, that even in case of extreme changes in the variable shares of electricity costs, there are nearly no economical potentials for the flexible electricity use available. The small cost reduction itself is usually not sufficient to justify new investments.

For demand profile 3 the influence of different site-specific boundary conditions like silo capacity and mill capacity on the potential for flexible cement mill operation was assessed with regard to temporal scales between 1 and 5 days. The increase of mill capacity shows a higher potential for positive load shifting (mill switch-off). However on its own, it can not justify the investment in a new mill.

Furthermore the potential for flexible load management in combination with the concept of separate fine grinding was examined and economically evaluated. A concept for the application of high-pressure grinding rolls for pregrinding and stirred media mills for fine grinding leads to a reduction of the specific energy demand and thereby to slightly higher cost reductions depending on the electricity price scenario in comparison with ball mill operation. At the same time the potential for flexible load management expressed as energy in MWh/year is reduced. The main reasons are firstly the low production capacity of single stirred media mills and secondly the low specific energy demand of these grinding mills in combination with high-pressure grinding rolls and using ball mills.

Chapter 11 investigates flexibility options originating from configurations of coupled heat and power generation. Chemical sites in Germany are often highly integrated sites with their own generation of power and steam. At the same time, these sites are interconnected to external infrastructures like power, natural gas and district heat grids, where they act as consumers and/or energy suppliers.

Different steam and power generation technologies can be combined in different configurations to secure, on one hand the energy supply on-site, and on the other hand to interact with the energy markets. The option to switch between different configurations creates a potential for flexibility as function of the reference mode of operation.

The effects of a flexible operation was analyzed for a given configuration of steam and power generation on-site of the industrial site at Höchst in Frankfurt for several different modes of reference operation (economic, CO₂-reduction, max. power generation, min. power generation and max. flexibility). A special focus was put on the interaction between cost, CO₂-emissions and flexibility.

Additionally, the configuration was extended to encompass a thermal storage unit that provides an additional positive flexibility potential and a water electrolyzer that provides an additional negative flexibility potential.

Chapter 12 evaluates flexibility potentials in the refractory industry, where sintered raw materials and numerous refractory products are fired in gas fired kilns. Natural gas is used to reach the high firing temperatures of up to 1800 °C and also to create oxidizing or reducing gas atmospheres inside of the kilns.

Industrial kilns for the firing of ceramic products can be retrofitted to provide flexibility regarding the composition of the gas being used, for introduction of synthetic gases.

The potential of gas fired kilns to provide flexibility regarding the availability of energy sources was analysed for the production of chamotte, bauxite products and tiles. The potential identified shall be transferable from gas to electric energy as primary source of energy in the kilns, if hybridization succeeds in introducing electrical energy as primary source of energy.

The dryer, the preheating zone, the preheating of the combustion air, regenerators and heat storage facilities of gas fired kilns were identified as components with potential for electrification resp. hybridization.

The results of these investigations can be transferred to other gas fired furnaces in the refractory and ceramic industry.

ZUSAMMENFASSUNG

Kapitel 1 adressiert Hybridisierung der Wärmeversorgung als eine Flexibilisierungsoption. Im Zuge des Ausbaus volatiler, erneuerbarer Energieerzeugung ist es zunehmend von Bedeutung, einen netzdienlichen Betrieb von Verbrauchern zu etablieren. Eine Möglichkeit besteht in der hybriden Erzeugung industrieller Prozesswärme für die energieintensive Grundstoffindustrie.

Ziel ist es, sowohl Hybridisierungspotenziale als auch branchenübergreifende -hemmnisse von brennstoffbasierten Industrieprozessen am Beispiel der Glas-, Papier- und Zementindustrie aufzuzeigen. Die entwickelte Methodik besteht aus einer vorgelagerten Technologieanalyse sowie einer Branchen- und Potenzialanalyse. Je Industriezweig werden zunächst geeignete Prozessschritte mit Hilfe eines Kriteriums zur Hybridisierung identifiziert. Anhand der Übereinstimmung und Verknüpfung der Prozesseigenschaften mit den Technologiekriterien findet eine prozessspezifische Technologieauswahl elektrothermischer Verfahren statt. Auf dieser Basis wird das Hybridisierungspotenzial in Form eines technischen Substitutionspotenzials für eine hybride Wärmeerzeugung quantifiziert. Abschließend werden im Rahmen von Experteninterviews ermittelte Hemmnisse für eine hybride Prozesswärmebereitstellung aufgezeigt.

Industrielle Wärmenetze sind das Thema in Kapitel 2. Für eine kosteneffiziente Energieversorgung auf Basis fluktuierender erneuerbarer Energien ist die Einbringung verschiedener Flexibilitätstechnologien erforderlich. In Deutschland macht der industrielle Wärmeenergiebedarf 22 % des gesamten Endenergiebedarfs aus. Ein relevanter Teil davon wird über thermische Netze bereitgestellt. Während diese netzbasierte Wärmeversorgung derzeit überwiegend aus fossilen Brennstoffen erfolgt, wird sie in Zukunft wesentlich auf Strom basieren und damit ein großes bisher nicht beziffertes Flexibilitätspotenzial bereitstellen.

In dieser Untersuchung wurde aus der Verschneidung vorliegender Top-down und Bottom-up Daten die potenzielle flexible jährliche Energie und die flexible Leistung hybrider Wärmenetze in Deutschland bestimmt.

Kapitel 3 untersucht Möglichkeiten, (elektrische) Flexibilität mit Hilfe thermischer Energiespeicher bereitzustellen. Abschnitt 3.1 und 3.2 adressieren allgemeine Aspekte der thermischen Energiespeicherung wie unterschiedliche Speichertechnologien und Möglichkeiten zur elektrothermischen Beladung solcher Speicher.

In den Abschnitten 3.3 bis 3.8 werden die einzelnen Branchen der Grundstoffindustrie beleuchtet. Auf Basis der jeweiligen Schlüsselproduktionsprozesse werden die Möglichkeiten zur Integration von Hochtemperaturwärmespeichern zum Zweck eines flexiblen Strombezug untersucht. Die Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

In der Elektrostahlerzeugung werden derzeit keine vielversprechenden Ansätze für eine Speicherintegration gesehen. In der Feuerfest und Glasindustrie ergeben sich Möglichkeiten, Prozesswärme aus einem elektrischen beheizten Speicher zur Verfügung zu stellen. In den Ofenprozessen der Feuerfestindustrie können damit teilweise Ofenbrenner ersetzt und die Verbrennungsluft der Brenner vorgewärmt werden. In der Glasindustrie ist eine Vorwärmung des Gemenges am Schmelzofen mit Hilfe eines Speichers möglich.

In der Prozessdampfbereitstellung für die chemische Industrie mit Hilfe von GuD-Anlagen erlaubt ein Wärmespeicher im Abgasstrang der Gasturbine eine Entkopplung der Dampferzeugung vom Gasturbinenbetrieb. Die Gasturbine kann somit zur flexiblen Stromerzeugung eingesetzt werden.

In der Zementindustrie wird zum gegenwärtigen Zeitpunkt keine Integrationsmöglichkeit für Wärmespeicher gesehen. Mittelfristig könnte jedoch das im Klinkerbrennprozess anfallende Kalziumoxid (CaO) als thermochemisches Speichermedium genutzt werden. Die dafür benötigten Technologien (wie z.B. ein elektrisch betriebener Kalzinierer) befinden sich jedoch in einem sehr frühen Entwicklungsstadium.

Kapitel 4 widmet sich den absehbaren Änderungen der Gasversorgung. Im Rahmen der Energiewende werden gasförmige Energieträger als Pendant zu den volatilen Erneuerbaren stark diskutiert. Vor allem durch Power-to-Gas (PtG) steht eine Dekarbonisierungsmaßnahme mit hohem Flexibilitätspotenzial bereit. Dadurch ändert sich allerdings bei Einspeisung ins Erdgasnetz die Gaszusammensetzung von reinem Erdgas zu einem Gasgemisch, welches unter anderem synthetisches Methan und Wasserstoff (H₂) enthält. Durch die veränderte Gaszusammensetzung kommen Herausforderungen auf die Industrie zu, welche mit den folgenden Anforderungsprofilen analysiert werden.

Das erste Anforderungsprofil stellt die Situation für eine konstante H₂-Einspeisung und damit einen konstanten Volumenanteil von erneuerbarem Gas im Gasgemisch dar. Diese Situation entsteht beispielsweise durch die Einspeisung einer PtG- oder Biogas-Anlage, welche konstant in Volllast betrieben wird. Im zweiten Anforderungsprofil wird von einem schwankenden, aber planbaren Volumenanteil erneuerbarer Gase im Gasgemisch ausgegangen. Hier wird also von wechselnden Gaszusammensetzungen ausgegangen, beispielweise durch die volatile Einspeisung einer PtG-Anlage in der Nähe eines Windparks, welche überschüssigen Strom in H₂ umwandelt. Das letzte Anforderungsprofil stellt die größten Herausforderungen an die Industrie, da hier von nicht planbaren Schwankungen ausgegangen wird, welche zum Beispiel durch die Erbringung von Regelleistung durch PtG-Anlagen oder Prognosefehlern für EE-Erzeugung auftreten können.

Im Kontext der Energiewende werden synthetische Gase als Mittel zur Dekarbonisierung des Gasektors diskutiert. Dabei stehen Wasserstoff – produziert per Elektrolyse – sowie synthetisches Methan (EE Methan), welches aus der Methanisierung des zuvor erzeugten Wasserstoffs hergestellt wird, im Fokus. Um wirklich treibhausgasneutrale Energieträger bereit zustellen, wird vorausgesetzt, dass es sich bei der eingesetzten Energie um regenerativ erzeugten Strom aus Solar- und Windkraftanlagen handelt.

Biomethan wird derzeit schon als Austauschgas ins Erdgasnetz eingespeist; es wird erwartet, dass das Potential aufgrund der Nachhaltigkeits-Anforderungen an Landwirtschaft als Substratlieferant eher gering bleiben wird.

Die Einspeisung alternativer Gase in das bestehende Erdgasnetz wird durch das Regelwerk des DVGW (Deutscher Verein des Gas- und Wasserfachs) bestimmt, das unter anderem einzuhaltende Kenndaten der Gasbeschaffenheit vorgibt. Diese Kenndaten (Brennwert, Dichte, Wobbe-Index, Methanzahl) spannen ein Kennfeld auf, innerhalb dessen die Gasbeschaffenheit zulässig ist. Allerdings kann es auch innerhalb dieses Kennfelds bereits zu Schwankungen in der Gasbeschaffenheit kommen, die beim Endverbraucher je nach Anwendungsfall bereits dazu führen kann, dass die Brenner etc. angepasst werden müssen. Entsprechend wäre eine Sensorik und Messtechnik vorzuschalten, was derzeit nicht bei jedem Verbraucher vorausgesetzt werden kann.

Die in dem Kapitel 6 vorgestellte Hemmnisanalyse begleitete und unterstützte die von den Projektpartnern durchgeführten Untersuchungen zur Flexibilitätsbereitstellung durch Hybridisierung der Wärmeerzeugung, Einsatz von thermischen Speichern sowie Nutzung synthetischer Brenngase in ausgewählten wärmeintensiven Prozessen der Stahl-, Chemie-, Zement-, Glas- und Feuerfestindustrien. Es wurde ein Analyserahmen entwickelt, der neben technischen auch organisatorische, regulatorische und ökonomische Hemmnisse erfasst. Zur Datenerhebung wurden Expertengespräche geführt, deren Ergebnisse durch Literaturrecherche ergänzt wurden. In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Hemmnisanalyse branchenübergreifend zusammengeführt.

Es werden 18 branchenübergreifende Hemmnisse sowie fünf branchenübergreifende Flexibilisierungsmöglichkeiten generalisiert dargestellt, und zur Illustration konkrete Beispiele aus den untersuchten Branchen gegeben. Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die aus technischer Sicht für den Industriebetrieb am einfachsten umzusetzende Flexibilisierungsmöglichkeit die Bereitstellung synthetischer Gase in spezifizierter und konstanter Zusammensetzung über das Erdgasnetz ist, da in diesem Fall maximal eine (geringfügige) Anpassung der etablierten und erprobten Produktionsprozesse und der zugehörigen technischen Anlagen nötig wäre. Auf Basis der geführten Gespräche erscheint eine Hybridisierung des Wärmeeintrags in Prozesse in ihren heutigen Formen aus verfahrenstechnischen Gründen nur in wenigen Fällen möglich. Unter heutigen Rahmenbedingungen wird eine Hybridisierung zudem insbesondere durch Stromkosten erschwert, die im Vergleich zu den Kosten fossiler Energieträger sehr hoch sind. Bzgl. einer Integration thermischer Speicher konnten verschiedene prozessspezifische, aus technischer Sicht plausible, Ansatzpunkte identifiziert werden.

In dem Kapitel 7 werden drei Referenzprozesse der Grundstoffindustrie mit Hilfe von zwei unterschiedlichen Modellen genauer betrachtet. Ziel ist es, aufzuzeigen, welche ökonomischen und regulatorischen Rahmenbedingungen auf dem Markt vorherrschen müssen, damit Flexibilitätspotentiale in der Grundstoffindustrie wirtschaftlich gehoben werden können.

Im ersten Modell wird die Behälterglasglasschmelze als Referenzprozess für eine hybride Wärmebereitstellung aus Strom (mit einer Elektrozusatzheizung) und Erdgas mithilfe eines Optimierungs-Modells näher untersucht. Dabei werden sowohl Energiekosteneinsparungen berechnet, als auch der Einfluss von Netzentgelten, anderer Umlagen sowie der Einfluss von CO₂-Preisen auf den Einsatz von Elektrizität in einer hybriden Wärmebereitstellung analysiert. Anschließend wird die Verbrennung von Synthesegas in einem fiktiven exemplarischen Werk der Feuerfestindustrie betrachtet. Der letzte Referenzprozess bezieht sich auf eine hybride Verbrennungsluftvorwärmung für thermische Brenner.

Kapitel 8 untersucht Flexibilitätsoptionen in der Elektrostahlherstellung. Die Betriebscharakteristik eines Elektrolichtbogenofens zur Herstellung von Elektrostahl wurde über einen repräsentativen Produktionszeitraum ausgewertet. Die Messdaten wurden hinsichtlich einer zeitlichen und räumlichen Aggregation analysiert. Spezifische Kenngrößen der Prozessauslastung und der elektrischen Leistungsaufnahme wurden überprüft. Zusätzlich wurden Dauerlinien mit unterschiedlich aggregierten Energiedaten ermittelt, die eine Basis für künftige Abschätzungen des Flexibilitätspotentials von Elektrolichtbogenöfen der Stahlindustrie bilden können.

Ferner wird über Versuche mit Bereitstellung von Regelenergie einer Sauerstofferzeugungsanlage berichtet. Außerdem wird die Betriebsweise von Pfannenöfen in der Sekundärmetallurgie von Stahlwerken und deren Flexibilität erläutert.

Eine mögliche Perspektive zur hybriden Beheizung von Teilanlagen der Stahlherstellung besteht ggf. in Warmwalzwerken. Dort ist eine Medienvorwärmung von Verbrennungsluft mit Einbindung elektrischer Heizelemente denkbar. Abschließend werden Perspektiven zur Nutzung synthetischer Gase aufgezeigt, mit denen der Bedarf fossiler Brennstoffe zur Stahlherstellung vermindert werden könnte.

Zur Beurteilung der Flexibilität der Glasindustrie in Deutschland in Kapitel 9 bezüglich der zeitlich schwankenden Verfügbarkeit erneuerbarer Energien wurden zwei sog. Schlüsselprozesse näher betrachtet: die Behälter- und die Flachglasherstellung. Beide Glasherstellungsprozesse decken ca. 85% der Jahrestonnage ab und repräsentieren auch ca. 85% des Energiebedarfs zur Glasherstellung in Deutschland. Während bei der Behälterglasherstellung ein gewisses technisches Flexibilitätspotential für kurzzeitige Maßnahmen auf Grund der vorhandenen Elektrozusatzheizung (EZH) ermittelt werden konnte [a], wurde bei der Flachglasherstellung keine nennenswerte Flexibilität für die abgefragten Profile erkannt bzw. von den Herstellern kein erkennbares Potential ausgewiesen [b]. Als maximales technisches Flexibilitätspotential ergibt sich somit ± 550 GWh/a bei einem aktuellen Verbrauch an elektrischer Energie von rund 3000 GWh/a [c] der schmelzenden Betriebe.

Die Diskussion um die Anpassung bzw. Adaption der Glasschmelzanlagen an die Forderung der CO₂-neutralen Schmelze ist in vollem Gange. Hier werden zurzeit national wie international die beiden grundlegenden Konzepte „vollelektrische Wanne“ und „Hybridwanne“ diskutiert und mit Hilfe von Simulations- und Modellrechnungen eine Beurteilung bzw. Abschätzung der unterschiedlichsten Varianten vorgenommen.

Das Lastflexibilisierungspotential des Referenzprozesses Zementmahlung im Kapitel 10 wurde anhand von Produktionsdaten aus zwei unterschiedlichen Zementwerken untersucht und praxisnah eingeschätzt. Es wurde ein Modell entwickelt, welches zur Abschätzung des maximalen Lastflexibilisierungspotentials entsprechend der branchenübergreifend definierten Anforderungsprofile 1 bis 3 für unterschiedliche Lastverschiebungszeiträume genutzt werden kann. Die zusätzlichen Ergebnisse für das zweite Referenzwerk bestätigen hierbei erneut die hauptsächliche Abhängigkeit des Lastflexibilisierungspotentials von der installierten Mühlenantriebsleistung und der jährlichen Mühlenauslastung. Sie ermöglichen eine Gegenüberstellung zu Ergebnissen für das erste Referenzwerk und weisen hierbei eine vergleichbare Größenordnung auf.

Die wirtschaftlichen Rahmenbedingungen und Hemmnisse beim flexiblen Betrieb von Zementmühlen wurden anhand von Kostenindizes für zwei historische Referenzjahre und Strompreisszenarien für das Jahr 2030 untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass selbst bei extremen Änderungen der variablen Anteile in den Stromkosten kaum wirtschaftliche Potentiale für den flexiblen Stromeinsatz in der Zementmahlung entstehen. Die Kostenersparnis selbst könnten in der Regel keine neuen Investitionen zur Erhöhung der Flexibilität begründen. Für Anforderungsprofil 3 wurde der Einfluss

unterschiedlicher standortspezifischer Rahmenbedingungen wie Silokapazität und Mühlenkapazität in Bezug auf das Potential zur Flexibilisierung des Zementmühlenbetriebs über eine Zeitspanne zwischen 1 und 5 Tagen untersucht. Die Erhöhung der Mühlenkapazität weist hierbei ein größeres Potential zur positiven Lastflexibilisierung (Mühlenabschaltung) auf, welches jedoch die Investition in eine neue Zementmühle alleine wirtschaftlich nicht rechtfertigt.

Darüber hinaus wurde das Lastflexibilisierungspotential für das Konzept der separaten Feinstmahlung untersucht und wirtschaftlich bewertet. Ein Konzept zum Einsatz einer Gutbett-Walzenmühle zur Vormahlung und Rührwerkskugelmühlen zur Feinstmahlung führt zu einer Reduktion des spezifischen Energiebedarfs und damit zu geringfügig höheren Kostenreduktionen in Abhängigkeit des Strompreisszenarios im Vergleich mit dem Kugelmühlenbetrieb. Das Lastflexibilisierungspotential in Form von Regelenergie in MWh/Jahr sinkt jedoch. Ursache hierfür sind 1. die geringen Produktionsleistung der einzelnen Rührwerkskugelmühlen und 2. der geringere spezifische Energiebedarf dieser Mahlanlagen in Kombination mit Gutbett-Walzenmühlen gegenüber Kugelmühlen.

Kapitel 11 adressiert die Flexibilitätsoptionen, die durch eine Konfiguration verschiedener Strom- und Wärmeerzeugungsanlagen entstehen können. Die Standorte der chemischen Industrie in Deutschland sind häufig integrierte Standorte, die häufig über eine eigene Strom- und Wärmeerzeugung verfügen. Gleichzeitig sind die Standorte an das externe Strom-, Gas-, und ggfs. Fernwämenetz angeschlossen und wirken sowohl in der Funktion des Verbrauchers als auch ggf. in der des Erzeugers. Die verschiedenen Strom- und Dampferzeuger können in verschiedenen Konfigurationen genutzt werden, um einerseits die Energieversorgung am Standort sicherzustellen und andererseits an den Energiemärkten teilzunehmen. Die Möglichkeit zwischen verschiedenen Erzeugungskonfigurationen hin- und her-zuschalten erzeugt ein Flexibilitätspotenzial in Abhängigkeit vom Referenzbetrieb.

Die Effekte einer Flexibilisierung für verschiedene Einsatzstrategien (Wirtschaftlich, CO₂-Minimierung, Max. Stromerzeugung, Min. Stromerzeugung und Max. Flexibilität) wurden anhand eines typischen größeren Chemiestandortes durchgeführt, welcher sich an den Gegebenheiten des Industrieparks Höchst anlehnt und auf Basis der MONA Standard Zeitreihe für 2030 über das Jahr summarisch bewertet. Von besonderem Interesse dabei ist die Wechselwirkung zwischen Kosten, CO₂-Emissionen und Flexibilität.

Die Konfiguration des Modells wurde zusätzlich um einen idealen thermischen Speicher erweitert, der ein zusätzliches positives Flexibilitätspotenzial erschließt. Zusätzlich wurde die Integration einer Wasserelektrolyse untersucht, die ein zusätzliches negatives Flexibilitätspotenzial verfügbar macht.

In der Feuerfestindustrie, Kapitel 12, erfolgt die Herstellung der gesinterten Rohstoffe und der vielfältigen Feuerfestprodukte in gasbefeuchten Sinter- und Brennöfen. Mit Erdgas werden die hohen Sintertemperaturen von > 1800 °C erreicht und kann eine oxidierende bzw. reduzierende Atmosphäre in den Öfen eingestellt werden. Mit technischen Nachrüstungen können die gasbefeuchten Sinter- und Brennöfen auf stoffliche Flexibilisierung der Brenngase reagieren.

Um Potenziale für eine energetische Flexibilisierung der Sinter- und Brennöfen zu identifizieren, wurden Durchlauföfen für die Produktion von Schamotte, von Bauxitprodukten und von Ziegeln untersucht. Die für den Betrieb mit Erdgas als Energieträger identifizierten energetischen Flexibilitätsoptionen können bei der Hybridisierung von solchen Aggregaten zumindest anteilhaft auf Strom als Energieträger übertragen werden.

Gasbefeuchte Sinter- und Brennöfen können zumindest teilweise hybridisiert werden und damit ein Teil der erforderlichen Energie durch elektrische Energie eingebracht werden. So lassen sich der Trockner, die Vorwärmzone, die Brennluftvorwärmung, Regeneratoren und thermische Speicher elektrifizieren. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen lassen sich auch auf andere gasbefeuchte Öfen in der Feuerfest- und Keramikindustrie übertragen.

INHALT

Herausgeber / Autoren	II
Beteiligte Projektpartner	IV
Vorwort	V
Executive Summary	VI
Zusammenfassung	X
1 Potenzialanalyse zur Hybridisierung von Prozessen in der Grundstoffindustrie	2
1.1 Ausgangssituation und Zielsetzung	2
1.2 Methodik	2
1.3 Technologieanalyse thermoelektrischer Erwärmungsverfahren	3
1.4 Branchen- und Potenzialanalyse	6
1.4.1 Glasindustrie	6
1.4.2 Papierindustrie	10
1.4.3 Zementindustrie	13
1.5 Schlussfolgerungen und Ausblick	17
1.6 Literatur	18
2 Flexibilitätspotenzial industrieller hybrider Wärmenetze in Deutschland	20
2.1 Einleitung	20
2.2 Geeignete Verknüpfung von Wärmeerzeugern für die hybride Wärmeversorgung	21
2.3 Industrieller Wärmeenergiebedarf und relevante Energiequellen	21
2.4 Hybridisierungs- und Flexibilitätspotenzial industrieller Wärmenetze	22
2.4.1 Ausschluss der dezentralen Wärmeversorgung – Analyse der thermischen Wärmeversorgung in realen Betrieben	23
2.4.2 Installierte netzgekoppelte Wärmelast	24
2.5 Limitationen der Ergebnisse, Schlussfolgerung und Ausblick	25
2.6 Literatur	25
3 Thermische Energiespeicher	26
3.1 Einleitung	26
3.2 Speichertechnologien	27
3.3 Elektrisch beheizte Speicher	28
3.4 Thermische Energiespeicher in der Elektrostahlerzeugung	29
3.5 Thermische Energiespeicher in der Glasherstellung	31
3.5.1 Verbrennungsluftvorwärmung mit Hilfe eines elektrisch beheizten Speichers	32
3.5.2 Gemengevorwärmung mit Hilfe eines elektrisch beheizten Speichers	32
3.6 Thermische Energiespeicher im Klinker-Prozess der Zementindustrie	34
3.7 Thermische Energiespeicher zur Flexibilisierung der Stromerzeugung in Dampfnetzen	35
3.7.1 Detaillierte Untersuchung: Regenerator im Abgaspfad der Gasturbine	37
3.7.2 Flexibilisierungsperspektive	39
3.8 Thermische Energiespeicher in Sinter- und Brennöfen der Feuerfestindustrie	40
3.9 Literatur	43

4	Gasversorgung im Wandel	44
4.1	Hintergrund und Motivation	44
4.2	Methodik	46
4.3	Die drei Anforderungsprofile	47
4.4	Fazit	48
4.5	Literatur	49
5	Was ist synthetisches Gas?	50
5.1	Ausgewählte Kenndaten synthetischer Gase	50
5.2	Welche Herstellungsverfahren gibt es?	51
5.2.1	Wasserelektrolyse	51
5.2.2	Power-to-Gas: EE-Methan	51
5.2.3	Biomethan	52
5.3	Synthetische Gase im Gasnetz	53
5.3.1	Regelwerk und derzeitige Situation	53
5.3.2	Auswirkungen der Einspeisung von alternativen Gasen	54
5.4	Literaturverzeichnis	57
6	Hemmnisse einer Flexibilisierung der Bereitstellung von Prozesswärme in den energieintensiven Industrien durch Hybridisierung, synthetische Gase und thermische Speicher	58
6.1	Einleitung	58
6.2	Vorgehen	59
6.3	Ergebnisse der Hemmnisanalyse im Überblick	60
6.4	Hybridisierung	61
6.4.1	Technische Hemmnisse	61
6.4.2	Organisatorische Hemmnisse	64
6.4.3	Ökonomische / Regulatorische Hemmnisse	65
6.4.4	Branchenübergreifende Flexibilisierungsmöglichkeiten	68
6.5	Verwendung synthetischer Gase	69
6.5.1	Technische Hemmnisse	69
6.5.2	Organisatorische Hemmnisse	71
6.5.3	Ökonomische / Regulatorische Hemmnisse	72
6.5.4	Branchenübergreifende Flexibilisierungsmöglichkeiten	72
6.6	Thermische Speicher	73
6.6.1	Technische Hemmnisse	73
6.6.2	Organisatorische Hemmnisse	73
6.6.3	Ökonomische / Regulatorische Hemmnisse	74
6.6.4	Branchenübergreifende Flexibilisierungsmöglichkeiten	74
6.7	Fazit	74
6.8	Danksagung	75
6.9	Literatur	75
7	Modellhafte Betrachtung von Flexibilitätstechnologien in der Grundstoffindustrie anhand ausgewählter Beispiele	76
7.1	Abschnitt ökonomische Modellierung der Glasschmelze als hybrider Prozess	76
7.1.1	Modellbeschreibung & Annahmen	76
7.1.2	Szenarien	78
7.1.3	Modellergebnisse	79
7.1.4	Schlussfolgerungen	82

7.2	Verbrennung von Synthesegas	82
7.2.1	Modellbeschreibung	83
7.2.2	Prozessbeschreibung	84
7.2.3	Analysen	86
7.2.4	Fazit	87
7.3	Elektrische Verbrennungsluftvorwärmung als hybrider Prozess	88
7.3.1	Prozessbeschreibung	88
7.3.2	Analysen	89
7.3.3	Fazit	90
7.4	Literatur	91
8	Fallbeispiele für Flexibilitätpotenziale und Flexibilitätperspektiven in der Stahlherstellung	92
8.1	Vorbemerkungen	92
8.2	Betriebsdaten eines Elektrolichtbogenofens	92
8.2.1	Zeitliche Aggregation der Prozessdaten	93
8.2.2	Visualisierung der 15 min- bzw. 1 Std.-Mittelwerte	93
8.2.3	Abweichung zwischen 1-Std. und 15 min-Mittelwerten	95
8.2.4	Tagesdurchschnittswerte und Leistungs-Kenngrößen	96
8.2.5	Dauerlinie eines Elektrolichtbogenofens	98
8.3	Flexibilität einer Sauerstofferzeugungsanlage	100
8.4	Betrieb von Pfannenöfen in der Sekundärmetallurgie	100
8.5	Perspektiven der hybriden Wärmebereitstellung im Warmwalzwerk	102
8.6	Nutzung synthetischer Gase in der Stahlindustrie	104
8.7	Literaturverzeichnis	107
9	Flexibilitätpotential und Perspektiven der Glasindustrie bezüglich des Einsatzes erneuerbarer elektrischer Energie	108
9.1	Flexibilitätpotential	108
9.1.1	Behälterglasproduktion	108
9.1.2	Flachglasherstellung	109
9.2	Flexibilitätperspektive	109
9.2.1	Anpassung des Schmelzaggregates an erneuerbare elektrische Energie: vollelektrische Wannen	110
9.2.2	Hybridwannen	112
9.2.3	Hochtemperaturwärmespeicher bei der Glasherstellung	112
9.3	Zusammenfassung	113
9.4	Literatur	113
10	Einschätzung des Flexibilitätpotentials bei der Zementmahlung	114
10.1	Einleitung	114
10.2	Modell-Eingangsdaten	114
10.3	Modellergebnisse	115
10.3.1	Ergebnisse Anforderungsprofil 1 und 2	115
10.3.2	Ergebnisse Anforderungsprofil 3	116
10.4	Rahmenbedingungen des flexiblen Mühlenbetriebs und Kostenindizes	118
10.4.1	Modellergebnisse für unterschiedliche Strompreisszenarien	119
10.5	Hemmnisanalyse	119

10.6	Flexibilisierungspotentiale der separaten Feinstmahlung	121
10.6.1	Vorzerkleinerung in der Gutbett-Walzenmühlen	121
10.6.2	Anteilige Feinstmahlung in der Rührwerkskugelmühle	122
10.6.3	Machbarkeitsstudie	123
10.6.4	Technische Hemmnisse zur Flexibilisierung durch separate Feinstmahlung	124
10.6.5	Wirtschaftliche Betrachtung	125
10.7	Fazit	126
10.8	Glossar	127
10.9	Literatur	127
11	Prozessdampfbereitstellung in integrierten Verbundstandorten	128
11.1	Einleitung	128
11.2	Beschreibung des Industrieparks Höchst	129
11.3	Beschreibung des MONA-Modells	130
11.4	Beschreibung des Datensatzes Standard	131
11.5	Einsatzstrategien	135
11.6	Auswertung	137
11.6.1	Vergleich der Einsatzstrategien	137
11.6.2	Einsatz eines thermischen Speichers	141
11.6.3	Sektorkopplung durch elektrolytische Wasserstoffbereitstellung	143
11.7	Fazit und Ausblick	143
11.8	Literatur	145
12	Flexibilisierung gasbefuerter Sinter- und Brennöfen	146
12.1	Einleitung	146
12.2	Gas als Energieträger	147
12.3	Produktion keramischer Rohstoffe und Feuerfestprodukte	148
12.3.1	Herstellung von Schamotterrohstoffen für die Feuerfestindustrie in einem gasbefeuerten Durchschubofen und ihre Flexibilitätspotenziale	148
12.3.2	Herstellung von Feuerfestprodukten (Bauxitsteine) in einem gasbefeuerten Durchschubofen und ihre Flexibilitätspotenziale	150
12.3.3	Erfassung jahreszeitlicher Einflüsse auf die Flexibilitätspotenziale der Durchschuböfen	152
12.4	Hybridisierungspotenzial und Elektrifizierung	152
12.4.1	Stoffliche Hybridisierung	152
12.4.2	Energetische Hybridisierung	153
12.5	Übertragbarkeit der Flexibilitätsoptionen auf andere Brennaggregate in der keramischen Industrie (Ziegelindustrie)	156
12.6	Fazit und Ausblick	157
12.7	Danksagung	157
12.8	Literatur	157
13	Fazit und Ausblick	158
	Impressum	160

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abb. 1.1:	Methodik zur Potenzialermittlung	3
Abb. 1.2:	Prozessablaufschritte der Glasherstellung, Eigene Darstellung in Anlehnung an [4], [24], [25], [26], [27].	6
Abb. 1.3:	Technologien zur hybriden Prozesswärmebereitstellung in der Glasindustrie	7
Abb. 1.4:	Technisches Substitutionspotenzial nach Prozess und Erwärmungsverfahren in der deutschen Glasindustrie	8
Abb. 1.5:	Prozessablaufschritte zur Papierherstellung in der Papiermaschine (eigene Darstellung in Anlehnung an [37])	10
Abb. 1.6:	Technologien zur hybriden Prozesswärmebereitstellung in der Papierindustrie	11
Abb. 1.7:	Technisches Substitutionspotenzial nach Prozess und Erwärmungsverfahren in der deutschen Papierindustrie	12
Abb. 1.8:	Prozessablaufschritte zur Zementherstellung (eigene Darstellung in Anlehnung an [42], [43], [33], [49])	13
Abb. 1.9:	Technologien zur hybriden Prozesswärmebereitstellung in der Zementindustrie	14
Abb. 1.10:	Technisches Substitutionspotenzial nach Prozess und Erwärmungsverfahren in der deutschen Zementindustrie.	15
Abb. 2.1:	Energiebedarf für Prozesswärme nach Branchen und Temperaturniveau, basierend auf Daten aus [7] und [8].	22
Abb. 2.2:	Energiebedarf für Prozesswärme nach Branchen hinsichtlich Temperaturniveau und Energiebereitstellung aus erneuerbaren Energien, Strom und Fernwärme, abgeleitet aus [6], [7] und [8].	22
Abb. 2.3:	Energiebedarf für Heizzwecke, zentral bereitgestellt durch fossile Brennstoffe, potenziell bereitgestellt durch hybride industrielle Wärmenetze	24
Abb. 2.4:	Darstellung der flexiblen elektrischen Leistung, welche von hybriden Wärmenetzen in der Industrie bereitgestellt werden könnten.	25
Abb. 3.1:	Systematik Speichertechnologien	27
Abb. 3.2:	Wärmetechnische Verschaltung zwischen Gemengevorwärmer und thermischem Energiespeicher (TES) mit Bypass zur Erreichung der gewünschten Mischtemperatur T_{mix} am Vorwärmereintritt.	33
Abb. 3.3:	Prozessskizze der Erzeugungsstruktur für ein Dampfnetz. Farblich eingefügt sind prinzipielle Optionen für die Integration thermischer Speicher sowie die in Frage kommenden Speichertechnologien.	35
Abb. 3.4:	Beispielhafter Verlauf des Strompreises und der Be-/Entladeleistung des Speichers.	37
Abb. 3.5:	Links: Kostenersparnis pro Jahr durch thermischen Speicher in Abhängigkeit der Speicherkapazität. Mitte: Quotient aus Investition für Speicher und Kostenersparnis pro Jahr (keine Verzinsung und Betriebskosten berücksichtigt). Rechts: Amortisation mit Verzinsung ($p = 3\%$) und Betriebskosten (1% der Investkosten).	38
Abb. 3.6:	Integration eines thermischen Speichers in einen Sinter-/Brennprozess für keramische Erzeugnisse.	40
Abb. 4.1:	PtG in Deutschland im Jahr 2050 [1]	44
Abb. 4.2:	Die Gasversorgung der Zukunft	45
Abb. 4.3:	Wichtige Parameter der verschiedenen Anforderungsprofile im Vergleich	47
Abb. 5.1:	Schematische Abbildung der Prozesskette Wasserstofferzeugung über Wasser-Elektrolyse.	51
Abb. 5.2:	schematische Abbildung der Prozesskette EE-Methan.	52

Abb. 5.3:	Schematische Prozesskette Biomethan auf Basis nachwachsender Rohstoffe.	53
Abb. 6.1:	Analyserahmen	60
Abb. 7. 1:	Zusätzliche Beiträge zum Strombörsenpreis: Arbeits- und Leistungspreise.	79
Abb. 7.2:	Vergleich von effektiven Strom- und Gaspreisen (unter Berücksichtigung von Ineffizienzen und Steuern und Umlagen).	79
Abb. 7.3:	Durchschnittlicher Stromverbrauch in verschiedenen Szenarien	80
Abb. 7.4:	Flexibilitätsbereitstellung: Durchschnittliche Abweichung vom Jahresmittel des Stromverbrauchs	81
Abb. 7.5:	Relative Energiekosteneinsparungen	81
Abb. 7.6:	Exemplarische Struktur der Modellierung in Ficus	83
Abb. 7.7:	Schema des modellierten Prozesses, in schwarz ist der bisherige Prozess dargestellt, blau dargestellt ist die Erweiterung zur Verbrennung von Synthesegas	84
Abb. 7.8:	Einfluss der Fixkosten des Elektrolyseur	86
Abb. 7.9:	Kostenverteilung	86
Abb. 7.10:	Produktionsverlauf für zwei exemplarische Wochen Ende Februar	87
Abb. 7.11:	Schema des modellierten Prozesses, in schwarz ist der bisherige Prozess dargestellt, blau dargestellt ist die Erweiterung zur elektrischen Verbrennungsluftvorwärmung	88
Abb. 7.12:	Einsatz der elektrischen Verbrennungsluftvorwärmung bei Verwendung der Stromkosten des Jahres 2017 (links) und 2030 (rechts)	89
Abb. 7.13:	Kostenaufteilung hybride Verbrennungsluftvorwärmung	90
Abb. 8.1:	Elektrische Leistung (15-min) eines Elektrolichtbogenofens	94
Abb. 8.2:	Elektrische Leistung (in MVA) eines Elektrolichtbogenofens an 12 Betriebstagen. Links: 15 min-Werte, Rechts: 1 h-Werte, rot=0%, grün=100%	95
Abb. 8.3:	Relative Abweichung zwischen 1-Std.- und 15-min-Mittelwerten	96
Abb. 8.4:	Energieübertragung als Funktion der power-on-Betriebszeit	98
Abb. 8.5:	Streuung des spezifischen elektrischen Energiebedarfs je Schmelze	98
Abb. 8.6:	Dauerlinien der elektr. Leistung eines Elektrolichtbogenofens (blau: 5sec, rot: 15 min, grün: 1h)	99
Abb. 8.7:	Fließbild einer Anlage zur O ₂ -Erzeugung [3]	100
Abb. 8.8:	Installierte Leistung von Pfannenöfen in der Sekundärmetallurgie (Quelle: Stahlinstitut VDEh, database PLANTFACTS)	101
Abb. 8.9:	Temperaturverlauf einer Flüssigstahl-Schmelze bei Aufheizung im Pfannenofen (Quelle: B. Kleimt, Stahlakademie des Stahlinstituts VDEh [5])	102
Abb. 8.10:	Energiefließbild eines Warmwalzwerks (Daten pro t WB) [15]	103
Abb. 8.11:	Hybrider Rekuperator als flexibler Verbraucher [12]	103
Abb. 8.12:	Vergleichmäßigung der Wärmezufuhr durch Induktion [13]	104
Abb. 8.13:	Wasserstoff als Reduktionsmittel am Hochofen [19]	105
Abb. 8.14:	Fließbild für die Herstellung von Rohstahl mit Wasserstoff [23]	106
Abb. 9.1:	Produktionskette der Behälterglasherstellung mit ihren wesentlichen Prozessschritten und der angeschlossenen Abgasreinigungsanlage	109
Abb. 9.2:	Produktionskette der Floatglasherstellung mit ihren wesentlichen Prozessschritten	109
Abb. 9.3:	Vollelektrische Glasschmelzwanne für Behälterglas mit einer Maximaltonnage von ca. 200 t/d	110
Abb. 10.1:	Vergleich der flexibel eingesetzten positiven Regelenergie für zwei unterschiedliche Referenzwerke und Referenzjahre für Anforderungsprofil 1	115

Abb. 10.2:	Korrelation zwischen Mühlenauslastung und verfügbarer Regelenergie bei einer normierten Mühlenantriebsleistung für zwei unterschiedliche Referenzwerke und Referenzjahre nach Anforderungsprofil 2	116
Abb. 10.3:	Häufigkeiten einer potentiellen positiven Lastflexibilisierung über 1-5 Tage gemäß Anforderungsprofil 3 bei Erhöhung der Silokapazität jeweils für alle Zementmühlen in Referenzwerk 2	117
Abb. 10.4:	Häufigkeiten einer positiven Lastflexibilisierung (Mühlenabschaltung) über 1-5 Tage gemäß Anforderungsprofil 3 bei Erhöhung der Mühlenkapazität für Referenzwerk 2	118
Abb. 10.5:	Häufigkeiten einer negativen Lastflexibilisierung (Mühleneinschaltung) über 1-5 Tage gemäß Anforderungsprofil 3 bei Erhöhung der Mühlenkapazität für Referenzwerk 2.	118
Abb. 10.6:	Statistische Auswertung der Jahresverläufe der genutzten Kostenindizes, von unten nach oben in Zeilen: 1 = Referenzjahr 1, 2 = Referenzjahr 2, 3 = Strompreisszenario 1 und 4 = Strompreisszenario 2. Kostenindizes für die beiden Referenzjahre 1 und 2 [4] sowie für die Strompreisszenarien 1 und 2 für 2030 [5,6]	119
Abb. 10.7:	In der Zementmahlung nach Anforderungsprofil 2 flexibel eingesetzte positive Regelenergie bei unterschiedlichen Kostenindizes und bei einer Mindestmühlenbetriebszeit von 4 Stunden in zwei Referenzwerken	119
Abb. 10.8:	Vereinfachtes Fließbild einer Fertigmahlanlage mit Gutbett-Walzenmühle	121
Abb. 10.9:	Horizontale Rührwerkskugelmühle der Fa. Netzsch.	122
Abb. 10.10:	Anlagenschaltung einer Rührwerkskugelmühle	123
Abb. 10.11:	Vergleich der verfügbaren positiven Regelenergie der Zementmühlen bei Einsatz von Rührwerkskugelmühlen gegenüber einer Mahlung in Kugelmühlen	124
Abb. 10.12:	Prozentuale Kostenreduktion des Modellmühlenbetriebs mit Kugelmühlen sowie mit Kugelmühlen und 2 Rührwerkskugelmühlen basierend auf den unterschiedlichen Kostenindizes	126
Abb. 11.1:	Konfiguration der Wärme- und Stromerzeugung des modellhaften Industrieparks.	130
Abb. 11.2:	Geordnete Leistungsdauerlinie (linke Skala) und Flexibilitätsbedarf (rechte Skala) abgeleitet vom Einsatz der Wasserpumpspeicherkraftwerke	132
Abb. 11.3:	Tägliche und stündliche Auflösung des Flexibilitätsbedarfs der MONA 2030 Standard Zeitreihe.	132
Abb. 11.4:	Strompreisverteilung entlang der geordneten Leistungsdauerlinie. Die waagerechten Linien geben jeweils die höchsten Kosten des entsprechenden Grenzkraftwerks an.	133
Abb. 11.5:	Tägliche und stündliche Auflösung der Strompreise der MONA 2030 „Standard“ Zeitreihe.	133
Abb. 11.6:	CO ₂ -Emissionen (grüne Punkte) des jeweiligen Grenzkraftwerks und durchschnittlichen Emissionen (blaue Punkte) sowie die Emissionskennlinien für das jeweilig in seiner Kategorie emissionsintensivste Grenzkraftwerk.	134
Abb. 11.7:	Tägliche und stündliche Auflösung der CO ₂ -Emissionen der jeweiligen Grenzkraftwerke in der MONA 2030 „Standard“ Zeitreihe [3].	135
Abb. 11.8:	Vergleich der Einsatzstrategien ohne Anwendung von Flexibilität.	137
Abb. 11.9:	Verschiedene Einsatzstrategien relativ zu einem vollflexiblen Betrieb.	139
Abb. 11.10:	Netto-Kennzahlen für die verschiedenen Einsatzstrategien und den vollflexiblen Betrieb.	139
Abb. 11.11:	Effekt der Berücksichtigung von weiteren Strompreisbestandteilen in der betriebswirtschaftlich-optimalen Einsatzstrategie (Wirtschaftlich).	140

Abb. 11.12:	Verlauf der durchschnittlichen Flexibilitätskosten als Funktion eines zusätzlichen Strompreisbestandteils in der betriebswirtschaftlich-optimalen Einsatzstrategie (Wirtschaftlich).	140
Abb. 11.13:	Effekt des Einsatzes eines thermischen Speichers auf die Nettokennzahlen in den Einsatzstrategien Wirtschaftlich und CO ₂ -Minimierung.	141
Abb. 11.14:	Kosten der Flexibilitätsbereitstellung (durchgezogene Linien, linke Achse) als Funktion der Größe des thermischen Speichers in der betriebswirtschaftlich optimalen Einsatzstrategie. Zusätzlich sind die differentiellen Kosten (gestrichelte Linien, rechte Achse) für die Flexibilitätsbereitstellung als Funktion der Speichergröße dargestellt. Die Abszisse ist logarithmisch skaliert.	142
Abb. 11.15:	Effekt des Einsatzes der Wasserelektrolyse zur negativen Flexibilitätsbereitstellung in den Nettokennzahlen für die Einsatzstrategien Wirtschaftlich und CO ₂ -Minimierung.	143
Abb. 12.1:	Tunnelofen zum Brand von Sanitärkeramik (links, Quelle: Eisenmann) und Herdwagenofen mit seitlicher Gasbefuerung (rechts, Quelle: Rath).	146
Abb. 12.2:	Gepresste Batzen zum Schamottebrand (Quelle: KTS).	148
Abb. 12.3:	Schematische Darstellung des Durchschubofens zum Brennen von Schamotterohstoffen (Massenstrom bezogen auf 100 t Edukt).	149
Abb. 12.4:	Hochwertige Feuerfestprodukte für die Unterguss-Gespannzustellung (Quelle: Steuler Refractory Linings).	150
Abb. 12.5:	Schematische Darstellung des Durchschubofens zum Brennen von Bauxitsteinen (Massenstrom bezogen auf 75 t Edukt)	151
Abb. 12.6:	Energieströme bei direkter Wärmenutzung für Trockner und Verbrennungsluft.	154
Abb. 12.7:	Teil- und vollelektrische Beheizung von Trockner, Vorwärmzone und der Verbrennungsluft.	154
Abb. 12.8:	Hybridisierung durch thermischen Speicher.	155
Abb. 12.9:	Integration eines Regenerators in den Energiefluss.	155
Abb. 12.10:	Getrocknete (links) und gebrannte Ziegel (rechts) am Ofenausgang (Quelle: Ziegelwerk Ott).	156
Abb. 12.11:	Schematische Darstellung des Durchschubofens zum Brennen von Ziegeln (Massenstrom bezogen auf 215 t Edukt).	156
Abb. 12.12:	Ziegelprodukte Klimatherm PL 9 (links) und ThermoPlan MZ80-G (Quelle: Ziegelwerk Ott).	156

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1.1:	Technologiecharakteristika elektrothermischer Erwärmungsverfahren [6] ^a , [7] ^b , [8] ^c , [9] ^d , [10] ^e , [11] ^f , [12] ^g , [13] ^h , [14] ⁱ , [15] ^j , [16] ^k , [17] ^l .	4
Tabelle 1.2:	Prozessbezogene Wirkungsgrade elektrothermischer Erwärmungsverfahren [6] ^a , [18] ^b , [20] ^c , [19] ^d , [21] ^e .	5
Tabelle 2.1:	Überblick über geeignete Wärmeerzeugungskonzepte nach Soll-Temperaturniveau (Elektroden- und Elektrokessel werden als Elektrokessel zusammengefasst)	21
Tabelle 2.2:	Übersicht über den Anteil der zentralbasierten Wärmeversorgung bei ausreichenden Temperaturen im analysierten Datensatz	23
Tabelle 2.3:	Überblick über relevante Temperaturniveaus für die netzgebundene thermische Energieversorgung, geeignete Technologien und Flexibilitätspotenziale	24
Tabelle 3.1:	Techno-ökonomische Kenndaten unterschiedlicher Wärmespeichertechnologien (aus [2] und eigene Abschätzungen).	28
Tabelle 3.2:	Parameter zur überschlägigen Speicherauslegung entsprechend Abbildung 3.2.	33
Tabelle 3.3:	Ergebnis der Speicherauslegung entsprechend der Parameter in Tabelle 3.2.	34
Tabelle 3.4:	Abschätzung der Speichergröße zur Pufferung des Dampfbedarfs über 3 h bzw. 12 h.	39
Tabelle 3.5:	Parameter zur überschlägigen Speicherauslegung entsprechend Abbildung 3.6.	41
Tabelle 3.6:	Ergebnis der Speicherauslegung entsprechend der Parameter in Tabelle 3.5.	42
Tabelle 5.1:	Gasbeschaffenheitskennwerte für verschiedene Erdgase, Bio- und SNG Methan sowie Wasserstoff [1,2,3,4].	50
Tabelle 6.1:	In den Branchen bzgl. der jeweiligen Flexibilisierungsansätze untersuchte Prozesse	58
Tabelle 6.2:	Ergebnisse der Hemmnisanalyse im Überblick	60
Tabelle 7.1:	Variablen	77
Tabelle 7.2:	Input Parameter	77
Tabelle 7.3:	Modell Gleichungen	78
Tabelle 7.4:	Gleichungen der Zielfunktion	84
Tabelle 7.5:	Variablen	84
Tabelle 7.6:	Kosten für Import- / Exportgüter	85
Tabelle 7.7:	Technologiekosten	85
Tabelle 7.8:	Technologieeigenschaften	85
Tabelle 7.9:	Technologiekosten und -eigenschaften	89
Tabelle 8.1:	Technische Daten des untersuchten AMH-Elektrolichtbogenofens	93
Tabelle 8.2:	Varianz der Messdaten bei unterschiedlicher Aggregation	93
Tabelle 8.3:	Analyse der Stillstände (15-min-Mittel) nach Dauer und Häufigkeit	95
Tabelle 8.4:	Betriebskennzahlen des AMH-Elektrolichtbogenofens	97
Tabelle 8.5:	Vergleich der in [1] getroffenen Annahmen mit Messdaten	97
Tabelle 8.6:	Charakteristische Zeitabschnitte in Abbildung 86	99
Tabelle 10.1:	Modellierte jährliche Regelenergie der Zementmühlen aus zwei Referenzwerken nach Anforderungsprofil 2 (links: *Regelenergie mit Strompreislimit je Anforderungsprofil [2], rechts: Regelenergie bei verändertem monatlichem Strompreislimit).	116
Tabelle 10.2:	Änderung der jährlichen Kostenindizes durch flexiblen Betrieb der Zementmühlen nach Anforderungsprofil 2	120

Tabelle . 10.3: Kennzahlen der Gutbett-Walzenmühlen und Rührwerkskugelmühlen- produktion* Berechnungen zur Abschätzung der Anteile im Gesamtprodukt basieren auf den Korngrößenverteilungen. Trotz niedriger spezifischer Oberfläche reichen geringe Anteile dieser Korngrößenverteilung aus, um die Referenzprodukte nachzubilden.	123
Tabelle 10.4: Gegenüberstellung der Mahlanlagen	125
Tabelle 11.1: Annahmen des MONA-Szenarios Standard [3].	131
Tabelle 11.2: Kennzahlen für das Anbieten von positiver Flexibilität in den verschiedenen Einsatzstrategien.	138
Tabelle 11.3: Kennzahlen für das Anbieten von negativer Flexibilität in den verschiedenen Einsatzstrategien.	138
Tabelle 12.1: Flexibilitätspotenziale des Durchschubofens zur Herstellung von Schamotte- rohstoffen	149
Tabelle 12.2: Flexibilitätspotenziale des Durchschubofens zur Herstellung von Bauxitprodukten	151

VERWENDETE ABKÜRZUNGEN

Sprachliche Abkürzungen

Abb.:	Abbildung	PC:	Personal Computer
bzgl.:	bezüglich	S.:	Seite
ca.:	zirka	s.o.:	siehe oben
ct:	(Euro-)Cent	T€:	Tausend Euro
D. h.:	Das heißt	u.a.:	unter anderem
Ggf.:	gegebenenfalls	u.U.:	unter Umständen
€:	Euro	vgl.:	vergleiche
etc.:	uns so weiter (et cetera)	z.B.:	zum Beispiel
i.d.R.:	In der Regel	z.T.:	zum Teil
IT:	Informationstechnik	%:	Prozent
Mio.:	Millionen		

Abkürzungen für Gesetze und Regularien

EEG:	Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz – EEG 2017); „Erneuerbare-Energien-Gesetz vom 21. Juli 2014 (BGBl. I S. 1066), das zuletzt durch Artikel 5 des Gesetzes vom 13. Mai 2019 (BGBl. I S. 706) geändert worden ist“
EnWG:	Gesetz über die Elektrizitäts- und Gasversorgung(Energiewirtschaftsgesetz – EnWG); „Energiewirtschaftsgesetz vom 7. Juli 2005 (BGBl. I S. 1970, 3621), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 13. Mai 2019 (BGBl. I S. 706) geändert worden ist“
KWKG:	Gesetz für die Erhaltung, die Modernisierung und den Ausbau derKraft-Wärme-Kopplung (Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz - KWKG); „Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz vom 21. Dezember 2015 (BGBl. I S. 2498), das zuletzt durch Artikel 6 desGesetzes vom 13. Mai 2019 (BGBl. I S. 706) geändert worden ist“
StromNEV:	Verordnung über die Entgelte für den Zugang zuElektrizitätsversorgungsnetzen (Stromnetzentgeltverordnung -StromNEV); „Stromnetzentgeltverordnung vom 25. Juli 2005 (BGBl. I S. 2225), die zuletzt durch Artikel 10 des Gesetzes vom13. Mai 2019 (BGBl. I S. 706) geändert worden ist“
TA-Luft:	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum BundesImmissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft – TA Luft) Vom 24. Juli 2002 Nach § 48 des Bundes–Immissionschutzgesetzes in der Fassung der Bekanntmachung vom 14. Mai 1990 (BGBl. I S. 880), der durch Artikel 2 des Gesetzes vom 27. Juli 2001 (BGBl. I S. 1950) geändert worden ist.

Technische Abkürzungen

AHDE:	Abhitzedampferzeuger
AMH:	ArcelorMittal Hamburg
BGA:	Biogasanlage
CAPEX:	Investitionsausgaben (capital expenditure)
CEM I:	Portland Zement
CFD:	Numerische Strömungsmechanik (computational fluid dynamics)
COP:	Arbeitszahl (coefficient of performance)
BG:	Behälterglas
D:	Dimension
DIN:	Deutsches Institut für Normung
DRI:	Direkt-reduziertes Eisen (direct reduced iron)
DVGW:	Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V.
ε :	Leistungsfaktor in der power-on-Zeit, bezogen auf die installierte Leistung
E-:	Elektro-
EAF:	Elektrolichtbogenofen (electric arc furnace)
EE:	Erneuerbare Energien
EWI:	Energiewirtschaftliches Institut an der Universität zu Köln
EZH:	Elektrische Zusatzheizung
FG:	Floatglas
FMEA:	Ermittlung von Fehlerursachen (failure mode and effects analysis)
GHD:	Gewerbe, Handel und Dienstleistungen
GK:	Gaskessel
GT:	Gasturbine
GuD:	Gas- und Dampf(kraftwerke)
H (Index):	Hoch
HBI:	Heiß brikettierter Eisenschwamm (hot-briquetted iron)
HD:	Hochdruck
Inst. (Index):	Installiert
KM:	Kugelmühlen
KWK:	Kraft-Wärme gekoppelte (Anlagen)
L (Index):	Luft
L _{HV} (Index):	Heizwert
LP:	Lineares Programm
LPG:	Flüssiggas (liquefied petroleum gas)
LSW:	Lech-Stahlwerke
M _{max} (Index):	Maximal
MILP:	gemischt-ganzzahliges lineares Optimierungsmodell (mixed-integer linear programming)
M _{min} (Index):	Minimal
MONA:	Merit Order Netz-Ausbau
ND:	Niederdruck
OPEX:	Betriebsaufwand (operational expenditure)
PCM:	Phasenwechselmaterial (phase change material)
PEM:	Protonen Austausch Membran (Proton Exchange Membran)
PGC:	Prozess-Gaschromatographen
PtG:	Power-to-Gas
PVSA:	Druckwechselabsorption (pressure vacuum swing adsorption)
QTES:	Wärmespeicherkapazität (thermischer Speicher)
RS:	Rohstahl
RWKM:	Rührwerkskugelmühlen
SNG:	Künstliches Erdgas (synthetic natural gas)
τ :	power-on-Faktor, entspricht dem Zeitanteil mit Lichtbogenbetrieb
TES:	Thermischer Energiespeicher
TRL:	Technologiereifegrad (technology readiness level)
ÜNB:	Übertragungsnetzbetreiber
VES:	Vollelektrische Schmelzeinheit
WB:	Warmband

Physikalische Einheiten und Größen

a:	Jahr (Einheit)	m ³ :	Kubikmeter (Einheit)
A:	Ampere (Einheit)	min:	Minuten (Einheit)
bar:	bar (Einheit)	p:	relative elektrische Leistung
°C:	Grad Celsius (Einheit)	p:	Druck
d:	Tag (Einheit)	P:	Elektrische Leistung
e _l (Index):	elektrisch	Std.:	Stunde(n)
g:	Gramm (Einheit)	T:	Zeiträume
h:	Stunde (Einheit)	t:	Tonne (Einheit)
Hz:	Hertz (Einheit)	T:	Temperatur
J:	Joule (Einheit)	t _h (Index):	thermisch
K:	Kelvin (Einheit)	Vol.:	Volumen
m:	Masse	V:	Volt (Einheit)
m:	Meter (Einheit)	W:	Watt (Einheit)

Präfixe

μ: Mikro (10 ⁻⁶)	M: Mega (10 ⁶)
m: Milli (10 ⁻³)	G: Giga (10 ⁹)
c: Zenti (10 ⁻²)	T: Tera (10 ¹²)
d: Dezi (10 ⁻¹)	P: Peta (10 ¹⁵)
k: Kilo (10 ³)	

Chemische Verbindungen und Mineralien

CaO:	gebrannter Kalk, Kalziumoxid
CaCO ₃ :	Kalkstein, Kalziumkarbonat
CH ₄ :	Methan
CO:	Kohlenmonoxid
CO ₂ :	Kohlenstoffdioxid
Fe ₂ O ₃ :	Eisenerz, Eisen(III)oxid
H ₂ :	Wasserstoff
H ₂ O:	Wasser
N ₂ :	Stickstoff
O ₂ :	Sauerstoff

1

POTENZIALANALYSE ZUR HYBRIDISIERUNG VON PROZESSEN IN DER GRUNDSTOFFINDUSTRIE

Verantwortliche Autoren

Frank Veitengruber fweitengruber@ffe.de
Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH, Am Blütenanger 71, 80995 München

Christa Dufter cdufter@ffe.de
Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH, Am Blütenanger 71, 80995 München

Anna Gruber agruber@ffe.de
Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH, Am Blütenanger 71, 80995 München

Tobias Hübner thuebner@ffe.de
Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH, Am Blütenanger 71, 80995 München

Andrej Guminski aguminski@ffe.de
Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH, Am Blütenanger 71, 80995 München

1.1 Ausgangssituation und Zielsetzung

Infolge der fluktuierenden erneuerbaren Energieerzeugung wird es zunehmend wichtiger, Flexibilität auf Verbraucherseite zu schaffen. Eine Möglichkeit stellt die Hybridisierung der industriellen Prozesswärme dar [1]. Diese kann insbesondere für Bestandsanlagen als Zwischenlösung auf dem Weg zu einer dekarbonisierten, flexiblen und erneuerbaren Energieversorgung dienen [2]. Im Rahmen dieses Papers steht der Konversionspfad von einer derzeit brennstoffbasierten hin zu einer hybriden Wärmebereitstellung im Fokus. Unter dem Begriff der hybriden Wärmeerzeugung ist ein kombiniertes Wärmebereitstellungssystem zu verstehen, das entweder zwischen brennstoffbasierter und thermoelektrischer Wärmeerzeugung umschalten oder dessen Erzeugungsverhältnis flexibel verschieben kann [3]. Dadurch soll einerseits mehr Flexibilität bei der Stromnachfrage geschaffen werden, um auf die zunehmend fluktuierende, erneuerbar erzeugte Elektrizität im Stromnetz zu reagieren. Andererseits soll neben der potenziellen Netzentlastung und verbesserten Integration erneuerbarer Energien auch eine Reduktion der CO₂-Emissionen und Energiebezugskosten für die energieintensive Grundstoffindustrie erreicht werden [4], [5]. Das Ziel der Publikation ist es, sowohl Hybridisierungspotenziale als auch branchenübergreifende -hemmnisse von brennstoffbasierten Industrieprozessen aufzuzeigen. Darüber hinaus soll die entwickelte Methodik als exemplarischer Leitfaden verstanden werden, der auf weitere Branchen übertragen werden kann.

1.2 Methodik

Um das Hybridisierungspotenzial am Beispiel der Grundstoffindustrie zu evaluieren, ist eine Betrachtung mehrerer Analysepfade erforderlich (vgl. Abbildung 1.1). Durch eine vorgelagerte Technologieanalyse werden Kriterien für den Einsatz elektrothermischer Erwärmungsverfahren evaluiert. Anschließend wird unter Berücksichtigung der Erkenntnisse eine mehrstufige Branchen- bzw. Prozessanalyse angewandt. Letztere wird im Rahmen dieser Veröffentlichung am Beispiel der Branchen Glas, Papier und Zement durchgeführt.

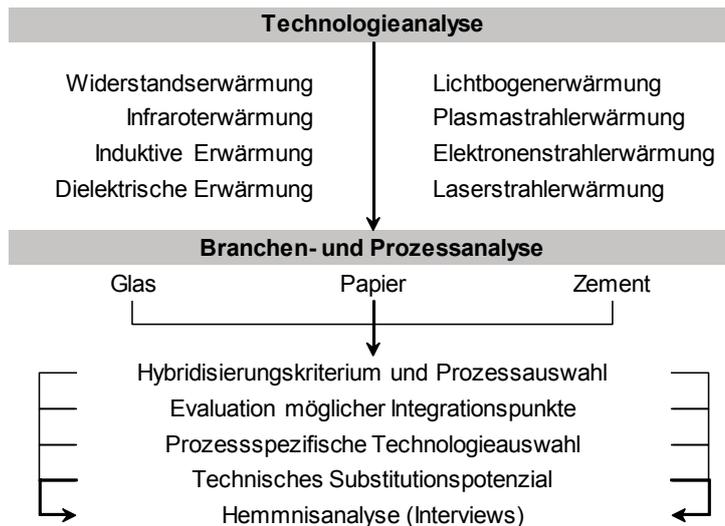


Abb. 1.1: Methodik zur Potenzialermittlung

- Zunächst ist für jeden Prozessschritt das Hybridisierungskriterium „Vorliegen einer brennstoffbasierten Beheizung“ zu prüfen. Die Erfüllung des Kriteriums ist eine Grundvoraussetzung, ob ein Prozessschritt einer weiterführenden Betrachtung unterzogen wird oder nicht. Dadurch wird sichergestellt, dass keine bereits elektrifizierten Prozesse, sondern ausschließlich mit Brennstoffen betriebene Prozesse für Hybridisierungsmaßnahmen betrachtet werden.
- In einem weiterführenden Schritt werden darauf aufbauend und unter Berücksichtigung der eingangs definierten Kriterien einer elektrothermischen Erwärmung entsprechende Integrationspunkte für ein hybrides Heizsystem identifiziert, die zur flexibel wechselnden Prozesswärmebereitstellung dienen können.
- Die prozessspezifische Technologieauswahl elektrothermischer Verfahren, die sich theoretisch für eine lokal hybride Prozesswärmebereitstellung eignen, ergibt sich anhand der Übereinstimmung und Verknüpfung der Prozesseigenschaften mit den Technologiekriterien. Anhand dessen wird das technische Substitutionspotenzial der hybriden Wärmezeugung ermittelt.
- Abschließend wird eine Hemmnisanalyse durchgeführt, bei der sowohl prozess- als auch anwendersensitive Gesichtspunkte evaluiert und diskutiert werden, die im Hinblick auf eine hybride Prozesswärmebereitstellung zu beachten sind.

1.3 Technologieanalyse thermoelektrischer Erwärmungsverfahren

Zu den thermoelektrischen Erwärmungsverfahren zählen grundsätzlich alle Technologien, bei denen Wärme in Form von Nutzenergie durch den Einsatz von elektrischer Energie erzeugt wird. Dies ist bei der Widerstands-, Infrarot-, induktiver und dielektrischer Erwärmung sowie der Lichtbogen-, Plasma-, Elektronen- und Laserstrahlerwärmung der Fall. Nicht berücksichtigt werden Technologien wie zum Beispiel die elektrische Wärmepumpe, bei denen elektrische Energie zum mechanischen Antrieb eines Verdichters genutzt wird, um thermische Energie mittels eines thermodynamischen Kreisprozesses auf ein höherwertigeres Niveau anzuheben. In diesen Fällen ist in der Regel das erzielbare Temperaturniveau zur Bereitstellung der industriellen Prozesswärme für Prozesse in der Grundstoffindustrie nicht ausreichend. Tabelle 1.1 gibt einen Überblick zu den Technologiecharakteristika der elektrothermischen Erwärmungsverfahren.

Die Beheizungsart stellt ein wesentliches Unterscheidungsmerkmal dar. Hierbei kann einem Objekt direkt elektrische Energie zugeführt werden, sodass eine Erwärmung unmittelbar im Stoff selbst stattfindet. Im Fall einer indirekten Erwärmung wird elektrische Energie außerhalb des Erwärmungsgutes in Wärme umgewandelt und anschließend meist aus einer Kombination von Konvektion, Wärmestrahlung oder Wärmeleitung auf das zu erwärmende Objekt übertragen [6].

Für jede Technologie sind in Tabelle 1.1 mögliche Temperaturbereiche ausgewiesen, die als literarische Richtwerte zu verstehen sind. In der Praxis sind deutliche Abweichungen aufgrund vielfältiger Einflussfaktoren, wie zum Beispiel die elektrische Leitfähigkeit, Form, Beschaffenheit und Schüttdichte des Stoffes, möglich. Zusätzlich weisen technische Restriktionen auf potenzielle Einschränkungen zur Integration eines elektrothermischen Verfahrens hin. Im Folgenden wird die Funktionsweise der einzelnen Technologien beschrieben.

Tabelle 1.1: Technologiecharakteristika elektrothermischer Erwärmungsverfahren [6]^a, [7]^b, [8]^c, [9]^d, [10]^e, [11]^f, [12]^g, [13]^h, [14]ⁱ, [15]^j, [16]^k, [17]^l

Technologie	Beheizungsart		Temperaturbereich	Technische Restriktionen
	direkt	indirekt		
Widerstandserwärmung ^a	x		bis ca. 3.000 °C	Nur für elektrisch leitfähige Materialien, anwendungsspezifische Verfahren
		x	bis ca. 2.000 °C	Universell einsetzbar
Infraroterwärmung ^a		x	bis ca. 2.100 °C	Hauptsächlich für Oberflächenerwärmung
Induktive Erwärmung ^{a,b,c}	x		abhängig von Frequenz	Nur für elektrisch leitfähige Materialien, möglichst gleichförmige Geometrie des Erwärmungsgutes
		x		Elektrisch leitendes Gefäß für konvektiven Wärmeübergang notwendig
Dielektrische Erwärmung ^{a,b,d,e,f}	x		bis ca. 1.800 °C	Nur für elektrisch nichtleitende Materialien mit polaren Eigenschaften (z. B. Wasser, Salze); Wärmeumwandlung material-, temperatur- und frequenzabhängig
- Hochfrequenzerwärmung				
- Mikrowellenerwärmung				
Lichtbogenerwärmung ^{a,b,g,h}	x		ca. 1.000 - 2.500 °C	Nur für elektrisch leitfähige Materialien, i. d. R. für Schmelzvorgänge, diskontinuierliche Betriebsweise
		x		Anwendungsspezifische Verfahren
Plasmastrahlerwärmung ^{a,i,j}		x	ca. 1.000 - 5.000 °C	Arbeitsgas (Ar, H ₂ , N ₂ oder Luft) erforderlich, wird zusätzlich in Prozess eingebracht
Elektronenstrahlerwärmung ^a	x		ca. 2.300 - 2.700 °C	Hochvakuum erforderlich
Laserstrahlerwärmung ^{a,k,l}		x	k. A.	Nur zur punktuellen Erwärmung; Einflussgrößen: Strahleinfallswinkel, umgebende Atmosphäre und Materialeigenschaften

- Die Widerstandserwärmung basiert auf dem Prinzip der Umwandlung von elektrischer Energie in joulesche Wärme. Der Widerstand kann entweder das Erwärmungsgut selbst oder ein Heizleiter sein, der die Wärme indirekt auf das Erwärmungsgut überträgt [6], [18].
- Demzufolge ist auch die elektrische Infraroterwärmung eine Form der indirekten Widerstandserwärmung. In diesem Fall wird ein Heizleiter erhitzt, der Wärmestrahlung in einem definierten Wellenlängenspektrum emittiert und vom zu erwärmenden Objekt absorbiert wird [19].
- Bei der induktiven Erwärmung wird hauptsächlich die Erwärmungsmethode ohne Eisenkern angewandt. Um einen wechselstromdurchflossenen Leiter baut sich ein magnetisches Wechselfeld auf, das durch das Erwärmungsgut gerichtet wird und sich infolgedessen unmittelbar selbst erwärmt [7]. Die Eindringtiefe der Erwärmung ist in Abhängigkeit der Frequenz (50 Hz bis 3 MHz) regelbar und nimmt mit steigender Frequenz ab [8]. Bei einer indirekten Erwärmung erfolgt ein konvektiver Wärmeübergang vom elektrisch leitenden, induktiv erwärmten Behälter hin zum nichtleitenden Erwärmungsgut [6].
- Das Verfahren der dielektrischen Erwärmung ist auf elektrisch nichtleitende Stoffe mit polaren Eigenschaften beschränkt. Ein elektromagnetisches Wechselfeld bewirkt eine kontinuierliche Schwingung elektrisch polarisierter Moleküle. Die dadurch entstandene Molekülreibung bedingt eine gleichzeitige Wärmeentwicklung des gesamten Objektvolumens [7]. Durch das Angrenzen der Oberfläche an die kalte Umgebungsluft liegt im Fall der dielektrischen Erwärmung ein inverser Temperaturverlauf von innen nach außen vor [9].

- Die Lichtbogenerwärmung wird typischerweise für Schmelzvorgänge metallischer Materialien angewandt [7]. Durch das Anlegen einer ausreichend hohen Spannung wird ein Lichtbogen initiiert, wodurch sich ein Stromfluss im ionisierten Gas des Lichtbogens einstellt. Grundsätzlich kann die Erwärmung direkt oder indirekt erfolgen. Im Fall der direkten Erwärmung brennt der Lichtbogen zwischen einer Elektrode und dem Erwärmungsgut, sodass die Wärme durch Konvektion, Wärmeleitung und -strahlung übertragen wird. Bei der indirekten Lichtbogenerwärmung brennt der Lichtbogen zwischen mehreren Elektroden, ohne das Erwärmungsgut zu berühren. Die Erwärmung erfolgt durch Strahlung und Konvektion [13].
- Die Plasmastrahlerwärmung ist mit der Lichtbogenerwärmung verwandt, da prinzipiell alle Arten von Lichtbögen ein Plasma in Form eines ionisierten Gaskanals erzeugen [15]. Der wesentliche Unterschied besteht darin, dass in diesem Fall ein strömendes Arbeitsgas Verwendung findet, wodurch das Plasma gezielt für den Energietransport und die Wärmeübertragung auf das Erwärmungsgut genutzt wird [6].
- Bei der Elektronenstrahlerwärmung werden Elektronen an einer heißen Glühkathode der Elektronenstrahlkanone erzeugt und unter Hochspannung beschleunigt. Beim Auftreffen der Elektronen auf das Zielobjekt wird deren kinetische Energie durch elastische Zusammenstöße mit äußeren Hüllelektronen einzelner Stoffteilchen abgebaut und in Wärme umgewandelt [6].
- Bei der Laserstrahlerwärmung werden masselose Photonen in einem Laser erzeugt und mittels eines optischen Systems auf das zu erwärmende Objekt fokussiert. Abhängig vom Absorptionsgrad des Erwärmungsguts regt ein Teil der Photonenenergie im Zielobjekt Gitterschwingungen an, die in Wärme umgewandelt werden [17].

Zur Potenzialermittlung im Rahmen der nachfolgenden Branchenanalyse sind in Tabelle 32 entsprechende prozessbezogene Wirkungsgrade für die elektrothermischen Erwärmungsverfahren zusammengefasst. Neben dem Technologiewirkungsgrad werden die Verluste, die bei und bis zu der Erwärmung eines Objektes oder Stoffes auftreten, berücksichtigt.

Tabelle 1.2: Prozessbezogene Wirkungsgrade elektrothermischer Erwärmungsverfahren [6]^a, [18]^b, [20]^c, [19]^d, [21]^e

Technologie	Beheizungsart		Wirkungsgrad	Bemerkungen
	direkt	indirekt		
Widerstandserwärmung	x		70 % ^{a,b}	Wirkungsgrad eines Elektrodenkessels ca. 99 % ^c
		x	60 % ^b	Wirkungsgrad eines Elektrokessels ca. 95 % ^{ES}
Infrarot Erwärmung		x	78 % ^d	
Induktive Erwärmung	x		75 % ^{UES}	Frequenzabhängig, 50 % (3 MHz) - 99 % (50 Hz) ^a
		x	70 % ^b	
Dielektrische Erwärmung - Hochfrequenz Erwärmung - Mikrowellenerwärmung	x		49 % ^a	Große Verluste durch Hochspannungstrafo, Magnetron und Rückstrahlung
Lichtbogenerwärmung	x		73 % ^a	
		x	68 % ^{OES}	
Plasmastrahlerwärmung		x	70 % ^a	
Elektronenstrahlerwärmung	x		70 % ^e	
Laserstrahlerwärmung		x	6 % ^a	Große optische Verluste und Zusatzverbraucher

^{ES} Expertenschätzung, ^{UES} Untere Expertenschätzung, ^{OES} Obere Expertenschätzung

Die industrielle Wärmeversorgung ist für die thematisierten Erwärmungsverfahren grundlegend in zwei Integrationsebenen zu unterteilen: die Versorgungsebene und die Prozessebene. Die Versorgungsebene dient als Wärmeversorgung für untergeordnete Prozessschritte und Anwendungen. Eine zentrale Einbindung in den vorhandenen Heizkreis ist möglich [22]. Für eine Hybridisierung von Wärmenetzen auf Versorgungsebene bietet sich beispielsweise auch eine Kaskadenschaltung mehrerer Wärmeerzeuger an, um Temperaturen auf höherem Niveau möglichst effizient bereitzustellen [23]. Im Gegensatz dazu besteht auf Prozessebene die Option einer dezentralen Einspeisung, wodurch einzelne Anwendungen direkt mit dem individuell benötigten Temperaturniveau versorgt werden [22].

1.4 Branchen- und Potenzialanalyse

In den Kapiteln 1.4.1 bis 1.4.3 wird die entwickelte Methodik zur Branchen- und Potenzialanalyse auf die Glas-, Papier- und Zementindustrie angewandt. Je Branche erfolgt zunächst eine Prozessbeschreibung. Auf dieser Basis werden relevante Prozesse identifiziert, eine Technologieauswahl vorgenommen und Hybridisierungsoptionen aufgezeigt. Anschließend folgen die Quantifizierung des Hybridisierungspotenzials sowie eine Hemmnisanalyse.

1.4.1 Glasindustrie

Die Glasproduktion untergliedert sich grundlegend für alle Glasprodukte zur Herstellung von Behälter-, Flach-, Faser- oder Spezialglas in sechs Prozessschritte, siehe Abbildung 1.2.

Abb. 1.2: Prozessablaufschritte der Glasherstellung, Eigene Darstellung in Anlehnung an [4], [24], [25], [26], [27].



In einem ersten Schritt werden mineralische und chemische Rohstoffe sowie Recycling- und Eigenscherten miteinander vermischt, um die benötigte chemische Zusammensetzung an Oxidverbindungen in der Schmelze einzustellen. Anschließend folgt das Einschmelzen des Gemenges zu einer blasenfreien und thermisch homogenen Schmelze. Je nach Produkt variiert die darauffolgende Formgebungsmethode. Das Abkühlen und Entspannen der geformten Glasprodukte findet in Kühlöfen statt, um mechanische Spannungen kontrolliert abzubauen. Abschließend erfolgt gegebenenfalls eine zusätzliche Veredelung sowie die Qualitätsprüfung und Verpackung der Produkte [4].

Relevante Prozesse

Nach dem Hybridisierungskriterium reduziert sich die Auswahl der Prozessschritte zur weiteren Betrachtung auf den fossil beheizten Schmelzprozess sowie auf das nachgelagerte Entspannen in den Kühlöfen.

Zum Einsatz für den energieintensiven Schmelzprozess kommen entweder gasbefeuerte Schmelzaggregate, gegebenenfalls mit Elektrozusatzheizung (EZH), für Produktionsmengen von bis zu 1.000 t/d oder vollelektrische Schmelzeinheiten (VES) für Tonnagen von bis zu 50 t/d. Hierbei weisen die derzeit weltgrößten vollelektrischen Wannenöfen eine tägliche Produktionsrate von ca. 200 t/d auf [4].

Der energieintensive Kernprozess beim Einschmelzen des Gemenges zu einer blasenfreien und thermisch homogenen Schmelze findet im Bereich von ca. 1.400 °C bis 1.700 °C statt. Der spezifische Energiebedarf liegt für Behälterglas (BG) in der Größenordnung von ca. 1,3 MWh/t verkaufsfähigem Glas und variiert je nach Gemengezusammensetzung. Bei der Flachglasproduktion (FG) nimmt der Schmelzprozess einen Anteil von ca. 65 % des gesamten Energiebedarfs ein und weist einen spezifischen Energiebedarf von ca. 1,6 MWh/t auf. Die Beheizung erfolgt vereinzelt vollelektrisch oder meist mit brennstoffbeheizten Feuerungsanlagen, die in der Regel in horizontaler Ebene angeordnet sind und oftmals Gas als Primärenergieträger verwenden. Um bei einer nicht ausreichenden Flammeneindringtiefe, hohen Durchsatzraten und je nach Glassorte die erforderlichen physikalischen Eigenschaften einzuhalten, kommt bei Bedarf eine elektrische Zusatzheizung zum Einsatz. Dies ist allerdings nicht als Hybridansatz im engeren Sinn zu verstehen, da technologisch bedingt zur homogenen Temperaturverteilung ein zeitgleicher Einsatz unterschiedlicher Energieträger – ca. 90 % Brennstoff, 10 % EZH – erforderlich ist [4].

In den Kühlöfen wird die Temperatur des Ofenguts von ca. 600 °C bis auf Umgebungstemperatur reduziert, um mechanische Spannungen kontrolliert abzubauen. Der Energieeinsatz zur Beheizung der Kühlöfen beträgt ca. 10 bis 15 kWh/t [4]. Heutige Kühlöfen sind üblicherweise auf eine Strecke von bis zu ca. 100 m eingehaust und in mehrere Temperaturzonen unterteilt. Die Beheizung erfolgt meist über seitlich installierte Gasbrenner, die das Glasprodukt zoniert temperieren [28].

Technologieauswahl und Hybridisierungsoptionen

Unter Beachtung der Technologiecharakteristika aus Tabelle 1.1 und Verknüpfung mit den zuvor beschriebenen prozessrelevanten Parametern ergibt sich die Technologieauswahl zur hybriden Prozesswärmebereitstellung (vgl. Abbildung 1.3).

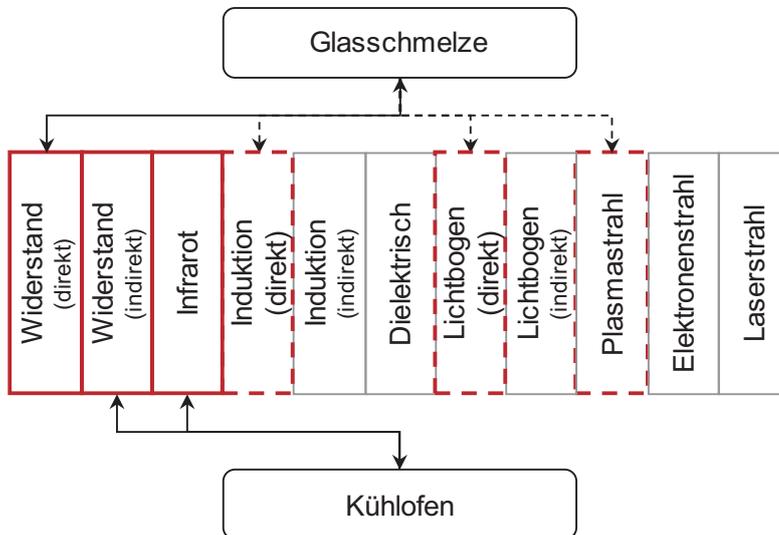


Abb. 1.3: Technologien zur hybriden Prozesswärmebereitstellung in der Glasindustrie

Für einen (teil-) elektrifizierten Schmelzprozess sind prinzipiell nur Glassorten geeignet, die einen möglichst hohen Anteil an frei beweglichen Ionen aufweisen, beispielsweise alle Natron-Kalk-Gläser [29]. Die Ionen reduzieren maßgeblich den elektrischen Widerstand und begünstigen bei hohen Temperaturen einen direkten Stromfluss im Erwärmungsgut. Sowohl bei der EZH als auch bei einer VES werden nach aktuellem Technikstand überwiegend Molybdänelektroden für eine direkte Widerstandserwärmung eingesetzt. [30] Für eine Teil- oder vollelektrische Schmelze bei brennstoffbeheizten Bestandsanlagen liegen Maßnahmen zur Hybridisierung entweder in einem Ausbau der EZH oder in einer Umrüstung auf eine vollelektrische Schmelzwanne. Beide Optionen weisen jedoch deutliche Umsetzungshemmnisse auf, die der nachfolgenden Hemmnisanalyse zu entnehmen sind.

Darüber hinaus ist eine Glasschmelze mittels direkter Induktion, beispielsweise an einem Induktortiegel [31], mittels direkter Lichtbogen- oder einer Plasmastrahlerwärmung denkbar. Dieser Ansatz befindet sich aber noch im Forschungsstadium und ist nach derzeitigem Kenntnisstand auch aufgrund des hohen spezifischen Energieverbrauchs nur für geringe Tonnagen von Spezialgläsern und -produkten geeignet [29]. Alle anderen elektrothermischen Verfahren liegen außerhalb der technischen Anforderungen für einen elektrifizierten Schmelzprozess oder erfüllen diese nicht.

Hybridisierungspotenzial

Als Hybridisierungspotenzial wird im Folgenden in Abbildung 1.4 das technische Substitutionspotenzial ausgewiesen, das unter der Bedingung einer gegebenen Integrationsmöglichkeit und eines zeitweise vollelektrischen Betriebes vorliegt. Im Fall der Glasherstellung wird die Potenzialbetrachtung für den Schmelzprozess auf die Behälter- und Flachglasherstellung eingeschränkt, die zusammen über 80 % der Jahres-Gesamtproduktionsmenge aller Glasarten verkörpern.

Im Fall der Spezialglasproduktion, die ca. 5 % der gesamten Jahres-Glasproduktionsmenge aller Glasarten darstellt, hängt die elektrische Leitfähigkeit von der zu erschmelzenden Glasart ab und damit von der jeweiligen Glaszusammensetzung. Bei der Vielzahl der Glasarten ist eine generelle Aussage der Eigenschaften zum Spezialglas nicht möglich [29]. Aufgrund eines zu hohen Spezialisierungsgrades eines jeden Prozessschrittes im Spezialglasbereich ist eine detailliertere Betrachtung nicht gegeben. Folgend wird auf diesen Produktionszweig und ebenso auf die Glasfaserherstellung nicht näher eingegangen.

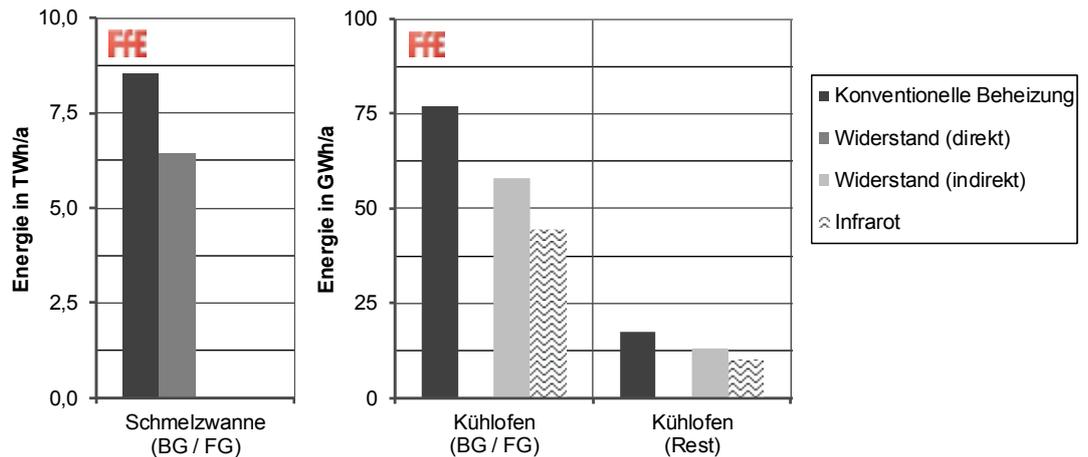


Abb. 1.4: Technisches Substitutionspotenzial nach Prozess und Erwärmungsverfahren in der deutschen Glasindustrie

Bei einer Jahrestonnage von ca. 2,1 Mio. t (FG) und ca. 4,1 Mio. t (BG) wird in Abbildung 1.4 ersichtlich, dass in Summe zur konventionellen Beheizung der Behälter- und Flachglasschmelze ein Energiebedarf in Deutschland von ca. 8,5 TWh/a vorliegt. Für eine VES der gleichen Produktionsmenge in Verbindung mit einer direkten Widerstandsheizung reduziert sich der elektrische Energieeinsatz um ca. 2 TWh/a. Berücksichtigung finden bereits bestehende EZH an 45 BG-Wannen und 4 FG-Wannen, die in Summe einen elektrischen Energieeintrag von ca. 570 GWh_{el}/a aufweisen und potenzialvermindernd wirken. Für die 60 BG-Wannen würde dies je BG-Schmelzwanne eine Steigerung des zusätzlichen elektrischen Leistungsbezugs um durchschnittlich ca. 7 MW_{el} und für die 11 FG-Wannen je Wanne ca. 29 MW_{el} bedeuten.

Für den konventionellen Energieeinsatz zum Entspannen in den Kühlöfen ergibt sich in Summe für Behälter- und Flachglas sowie Spezial- und Faserglas (Rest) ein Energiebedarf von ca. 94 GWh/a. Ein Betrieb mit einer 100 % hybriden Infrarotheizung würde den Energiebedarf um insgesamt 40 GWh/a senken bei einem zusätzlichen elektrischen Leistungsbezug von ca. durchschnittlich 7 kW_{el} je vorhandener Schmelzwanne.

Hemmnisanalyse

Auf Basis der vorangegangenen Überlegungen und Ergebnisse wird ein Brancheninterview [32] durchgeführt, mit dem Ziel, technische, prozessbezogene Restriktionen sowie mögliche Umsetzungshemmnisse aufzuzeigen. Diese werden im Folgenden erläutert.

In der Glasindustrie gestaltet sich eine Hybridisierung des Schmelzprozesses als problematisch bis nicht durchführbar. Dies hat mehrere Gründe. Bei der Schmelze müssen die glasspezifischen Prozessparameter möglichst konstant eingehalten werden, um beispielsweise eine ideale Viskosität zur Weiterverarbeitung zu gewährleisten. Aus diesem Grund sind Temperaturschwankungen in der Schmelze auf ± 5 K begrenzt [4]. Jegliche Verzögerungen im Prozessablauf, die zu einem ungewollten, deutlichen Abkühlen der Glasschmelze führen, sind zu vermeiden, da dies die Zerstörung sämtlicher schmelzeführender Teile zur Folge hätte. In Abhängigkeit der Glasart kann bei brennstoffbeheizten Schmelzwannen eine EZH zum Einsatz kommen. Hierbei ist die EZH bei Bestandsanlagen nicht beliebig skalierbar, um einen erhöhten Hybridisierungsgrad zu erreichen. Dies hätte neben einer geringeren Temperaturverteilung über dem Schmelzbad auch verminderte Abgasvolumina zur Folge und würde eine gänzlich neue Wannengeometrie sowie neue Feuerfestmaterialien erfordern. Das veränderte Abgasverhalten hätte zudem Auswirkungen auf nachgeschaltete Abgasreinigungsanlagen sowie sämtliche Peripherieprozesse, die einer Anpassung bzw. Umrüstung benötigen würden. Bei Wannenlaufzeiten von 10 bis 15 Jahren ist es für Bestandsanlagen innerhalb der praxisüblichen Hauptreparatur von ca. 6 bis 12 Wochen nicht möglich, derartige Innovationsmaßnahmen umzusetzen.

- Um theoretisch dennoch eine Hybridisierung des Schmelzprozesses zu erreichen, wäre der Bau einer zweiten, vollelektrischen Produktionslinie notwendig. Dieser Ansatz scheitert aus heutiger Einschätzung jedoch aus mehreren Gründen:
- Die Produktionsstätten befinden sich historisch bedingt oftmals in denkmalgeschützten Bauwerken, die sowohl in ihrer Grundfläche als auch durch bauliche Restriktionen eingeschränkt sind. Dadurch liegt tendenziell ein grundsätzlicher Platzmangel für größere Zubauten vor.
- Die Schmelzwanne der brennstoffbasierten Produktionslinie dürfte aus prozessrelevanten Sicherheitsgründen nicht abkühlen, sodass eine parallele, vollelektrische Linie keinen flexiblen Energieträgereinsatz, sondern Zubau an Produktionskapazität bedeuten würde.
- Die gesamte Strominfrastruktur einer bestehenden Produktionsstätte müsste geändert werden, da mehrere Megawatt an zusätzlichem Strombezug anfallen würden.
- Das Risiko einer Produktionsstörung infolge einer Störung der Stromversorgung für vollelektrisch beheizte Prozesse wird tendenziell höher eingestuft als ein Ausfall des brennstoffbasierten Betriebes.
- Elektroden verschleiben und sind in regelmäßigen Abständen auszutauschen. Potenziell stellt ein Elektrodenwechsel ein höheres Sicherheitsrisiko dar, als ein brennstoffbasierter Betrieb ohne aktiven Komponententausch an der Schmelzwanne.
- Die Wirtschaftlichkeit für Hybridisierungsmaßnahmen des Glasschmelzprozesses in Bestandsanlagen ist in naher Zukunft nicht gegeben.

Im Fall der Floatglasherstellung wurden bereits erste Versuche für einen elektrischen Schmelzprozess unternommen, die eine maximale Tonnage von ca. 200 t/d erreichen konnten. Im Rahmen des Formgebungsprozesses ist in Deutschland jedoch eine Menge von 500-800 t/d erforderlich, sodass eine elektrifizierte bzw. hybride Fahrweise für den Flachglassektor zum aktuellen Zeitpunkt schwer vorstellbar ist. Des Weiteren weisen derzeit lediglich vier Flachglaswannen eine EZH auf, die im Normalfall für die reguläre Flachglasproduktion an anderen Wannen technologisch nicht benötigt wird. Infolge konstruktiver Maßnahmen des Schmelzaggregates wird das Glas bereits ohne EZH ausreichend und homogen erschmolzen. [29]

Eine Hybridisierung des Kühlrofens ist grundsätzlich möglich. Es gibt jedoch mehrere Aspekte, die auch bei diesem Prozessschritt als Hemmnis zu verstehen sind und infolgedessen gegen eine Hybridisierung sprechen.

Im Gegensatz zu einer Technologie- bzw. Verfahrensumstellung ist eine hybride Einbindung von Infrarotstrahlern in die bestehende Einhausung des auf den Brennstoffeinsatz optimierten Kühlprozesses aus platz- und prozesstechnischen Gründen nicht gegeben. Zudem werden inzwischen zur Beheizung der Kühlöfen im Sinne der Energieeinsparung auch Abwärmeströme aus dem Schmelzprozess verwendet oder die Kühlöfen bei geeigneten Glasprodukten rein mittels deren Eigenwärme betrieben [4]. Dadurch kann unter Umständen eine aktive Beheizung gänzlich entfallen [4].

Weiterhin existiert für jedes Glasprodukt eine charakteristische Abkühlkurve, die innerhalb eines definierten Temperatur-Zeit-Regimes zu durchlaufen ist, um Spannungen in der Glasstruktur zu vermeiden. Die Einhaltung der Prozessparameter gilt als essentiell zur Gewährleistung der Produktqualität. Eine theoretisch hybride Fahrweise an einem bestehenden Kühlrofen würde aufgrund von Latenzzeiten beim Einstellen des bivalenten Energieträgerverhältnisses auf der einen Seite ein zusätzliches Risiko für Abweichungen von prozesskritischen Parametern bedeuten. Auf der anderen Seite wäre infolgedessen analog zum Schmelzprozess eine zweite, vollelektrische Kühllinie mitzudenken. Im Sinne von realitätsnahen Hybridisierungsmaßnahmen auf Prozessebene erscheinen beide Varianten als nicht praktikabel.

1.4.2 Papierindustrie

Die Papierproduktion gliedert sich unabhängig von der Papierart übergeordnet in drei Abschnitte, siehe Abbildung 1.5. Die Stoffherstellung dient eingangs zur Herstellung von Primär- oder Sekundärfasern. Während letztere durch das Recycling von Altpapier gewonnen werden, fallen Primärfasern im Zuge der Zell- oder Holzstoffherstellung an. Nachdem in Deutschland nahezu kein Zellstoff für die Papierherstellung erzeugt [33], sondern maßgeblich importiert wird, setzen deutsche Papierfabriken hauptsächlich Altpapier als Rohstoff für die Papiererzeugung ein [34]. Die Papierherstellung findet anschließend in der Papiermaschine statt. Dabei werden sechs Prozessschritte durchlaufen.

Sofern es sich nicht um eine integrierte Papierproduktion – einer gemeinsamen Stoff- und Papierherstellung am gleichen Standort [35] – handelt, erfolgt in einem ersten Schritt die Stoffaufbereitung des trocken angelieferten Faserstoffs, der unter Zugabe von Wasser zu einer Fasersuspension aufbereitet wird. Im nächsten Schritt erzeugt der Stoffauflauf einen homogenen Suspensionsstrahl in Maschinenrichtung und Papierbahnbreite. In der Siebpartie wird der Wassergehalt der Suspension erstmals reduziert und ein endloses, gleichförmiges Bahnprofil eingestellt. Anschließend erfolgt in der Pressenpartie eine Verdichtung und Entwässerung des Papiergefüges, wodurch die Festigkeit der Papierbahn erhöht wird. Diese durchläuft daraufhin eine Vielzahl an dampfbeheizten Trockenzylindern, sodass das verbliebene Restwasser aus dem Papier über Kontakttrocknung verdampft und ein gewünschter Endtrockengehalt von 2 bis 10 % erreicht wird. Im Anschluss an die Trockenpartie folgt oftmals ein Glättwerk mit temperierten Kalandervalzen, wodurch die Papierbahn eine glatte Oberfläche und gleichmäßige Blattstärke erhält, bevor sie final aufgerollt wird [36], [37], [38].

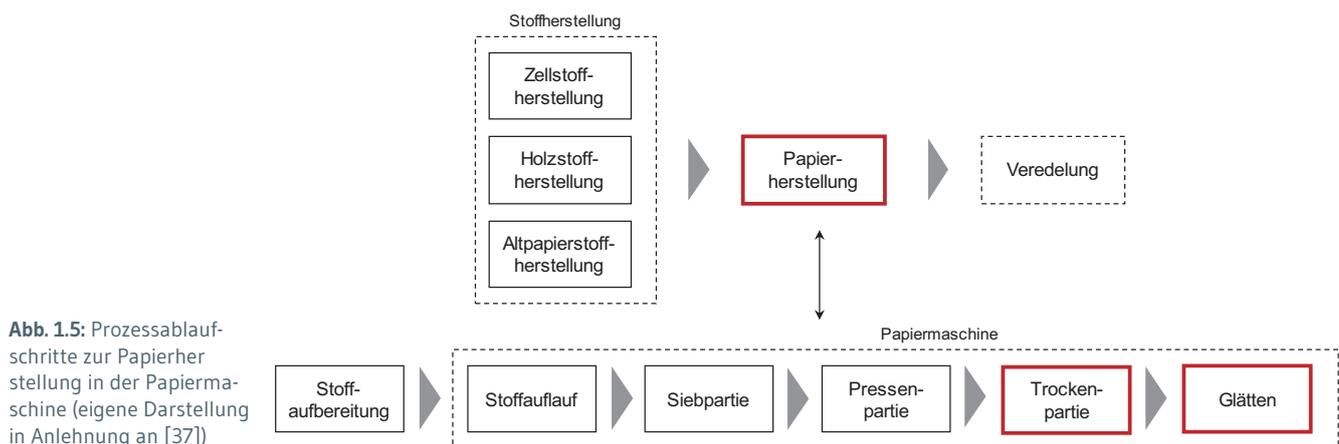


Abb. 1.5: Prozessablaufschritte zur Papierherstellung in der Papiermaschine (eigene Darstellung in Anlehnung an [37])

Relevante Prozesse

Dem Hybridisierungskriterium zufolge beschränkt sich bei der Papierherstellung der maßgebliche Einsatz an durch Brennstoffen bereitgestellter, thermischer Energie auf die Prozessschritte der Trockenpartie und dem konsekutiven Glättwerk – sofern vorhanden. Alle anderen Prozessschritte weisen entweder keinen direkten oder einen vergleichsweise verschwindend geringen Heizenergiebedarf auf.

Zur Trocknung der Papierbahn existieren mehrere praxisübliche Trocknungsverfahren. Davon stellt die Trocknung mittels dampfbeaufschlagten Trockenzylindern die gängigste Form dar. Je nach Maschinengröße werden ca. 50 und bis zu 100 Zylinder umlaufen. Die eingestellten Zylindertemperaturen liegen im Bereich von ca. 140 °C und sind maßgeblich abhängig von der Papiersorte und dem Fouling in den Trockenzylindern. Der brennstoffbasierte Energiebedarf für die Trockenpartie beträgt ca. 1.245 kWh pro Tonne Papier [38].

Zur Glättung der Papierbahn werden Kalandervalzen eingesetzt, die indirekt über ein gasbeheiztes Wärmeträgermedium oder Dampf temperiert werden. Die Temperaturen liegen üblicherweise zwischen 80 und 400 °C – je nach Anforderung und Papiersorte. Im Temperaturbereich bis 120 °C kommt Heißwasser oder Dampf zum Einsatz, bis 170 °C Dampf oder Thermoöl, bis 220 °C aus-

schließlich Thermoöl und bis 400 °C entweder Thermoöl mit induktiver Zusatzheizung oder eine direkt induktive Erwärmung der Kalandervalzen [37]. Der Energieeinsatz pro Tonne Papier liegt für diesen Veredelungsschritt schätzungsweise im Bereich von ca. 220 kWh/a bei einer Feuerungsleistung von ca. 10 kW. [38]

Technologieauswahl und Hybridisierungsoptionen

Unter Beachtung der Technologiecharakteristika aus Tabelle 1.1 und Verknüpfung mit den zuvor beschriebenen prozessrelevanten Parametern ergibt sich für die Papierherstellung eine mögliche Technologieauswahl zur hybriden Prozesswärmebereitstellung nach Abbildung 1.6.

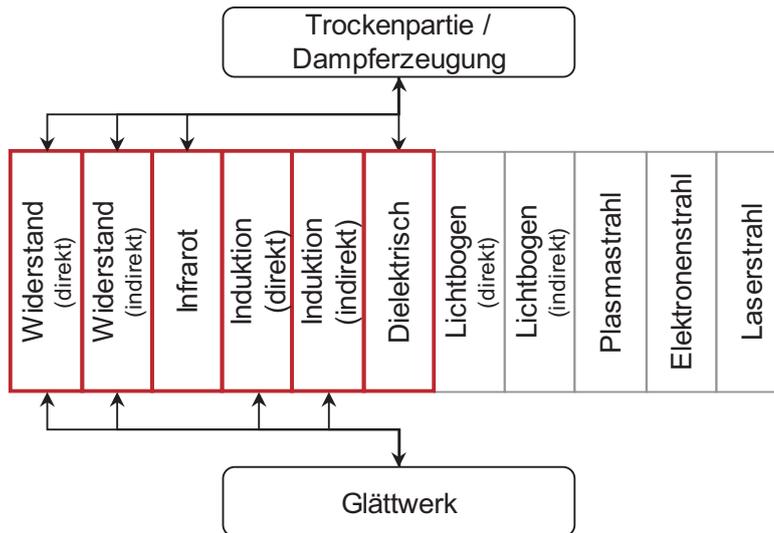


Abb. 1.6: Technologien zur hybriden Prozesswärmebereitstellung in der Papierindustrie

Nachdem der Trocknungsprozess in Bestandsanlagen bereits sehr effizient abläuft und Wärmerückgewinnungspotenziale weitgehend erschlossen sind, ist als primäre Hybridisierungsmöglichkeit eine übergeordnete Hybridisierung auf Versorgungsebene zu favorisieren [39], [40]. Neben einem hybriden Dampfkessel kann der Dampf entweder in einem weiteren Elektrokessel (indirekte Widerstandserwärmung mit Heizschwert) oder einem Elektrodenkessel (direkte Widerstandserwärmung des Wassers) erfolgen.

Eine weitere Möglichkeit zur Hybridisierung der Trockenpartie liegt darin, eine zusätzliche Infrarotheizung im Vorfeld der Trockenpartie zu integrieren: Für die der Trockenpartie vorgelagerten Prozessschritte gilt das Bestreben eines möglichst konstanten Temperaturniveaus um die 55 °C [40]. Die Integration einer elektrischen Infrarotheizung als zusätzliche Vortrocknung zur Trockenpartie würde sowohl eine Leistungssteigerung einer bestehenden Trockenpartie als auch eine flexible Reduktion der benötigten Dampfmenge in den Trockenzylindern bewirken [37]. Die Option einer dielektrischen Trocknung ist aufgrund der gleichmäßigen Papierbahngeometrie theoretisch ebenfalls möglich.

Die Thematik zur Umstellung auf eine hybride Dampfbereitstellung auf Versorgungsebene gilt analog für eine hybride Beheizung der Thermowalzen im Glättwerk: eine primärseitige Integration eines zusätzlichen elektrothermischen Erwärmungsverfahrens wie der zum Teil schon angewandten Induktionserwärmung des Thermoöls ist ohne Beeinflussung der Prozessparameter möglich. Gleiches gilt für die Erwärmung des Wärmeträgermediums mittels Widerstandsheizung. Eine weitere Option liegt im Einsatz von sogenannten vollelektrischen Tokuden-Walzen, bei denen sich die Walze direkt induktiv ohne ein zusätzliches Wärmeträgermedium erwärmt [37], [41].

Die weiteren Verfahren der Lichtbogen-, Plasma-, Elektronen- oder Laserstrahlerwärmung sind aufgrund ihrer technischen Restriktionen für keinen der beiden Prozessschritte möglich und finden prinzipiell nur für Hochtemperaturprozesse Verwendung.

Hybridisierungspotenzial

Als Hybridisierungspotenzial wird im Folgenden in Abbildung 1.7 das technische Substitutionspotenzial ausgewiesen, das unter der Bedingung einer gegebenen Integrationsmöglichkeit und eines zeitweise vollelektrischen Betriebes vorliegt.

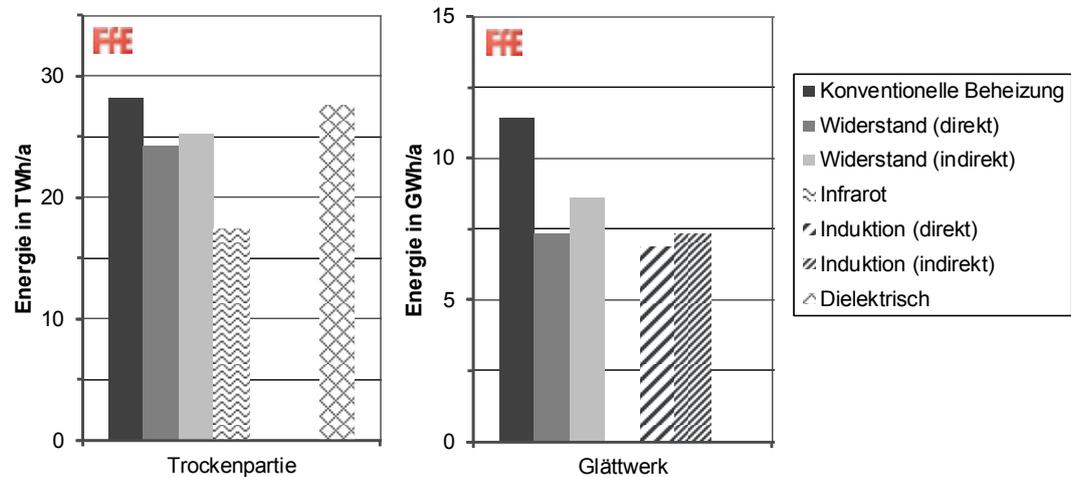


Abb. 1.7: Technisches Substitutionspotenzial nach Prozess und Erwärmungsverfahren in der deutschen Papierindustrie

Im Fall der Papierherstellung liegt für die konventionelle Dampfbereitstellung im Bereich der Trockenpartie ein Energiebedarf von über 28 TWh/a in Deutschland vor. Unter Einsatz eines Elektro- oder Elektrodenkessels resultiert für einen vollständig hybriden Einsatz des elektrischen Widerstandsverfahrens zur hybriden Dampferzeugung ein verminderter Energiebedarf von ca. 25 TWh/a. Je Werk in Deutschland entspricht dies einem zusätzlichen elektrischen Leistungsbezug von knapp 20 MW_{el} für eine hybride Dampfbereitstellung zur Versorgung der Trockenpartie. Im Vergleich dazu resultiert für eine zeitweise vollständige Infrarottrocknung ein um ca. 40 % verringerter Energiebedarf von ca. 17 GWh_{el}/a bei einem zusätzlichen elektrischen Leistungsbezug von ca. 14 MW_{el} je Werk. Eine temporär vollständig dielektrische Trocknung hätte aufgrund eines verhältnismäßig niedrigeren Wirkungsgrades nahezu den gleichen ursprünglichen Energiebedarf bei einem zusätzlichen elektrischen Leistungsbezug von knapp 22 MW_{el} je Werk.

Im Vergleich zur Trockenpartie ist der gesamte, konventionelle Energiebedarf für das Glätten mit ca. 11 GWh/a verschwindend gering. Sowohl ein Widerstands- als auch Induktionsverfahren zur Beheizung der Thermowalzen weist einen Energiebedarf von ca. 7 bis 9 GWh_{el}/a auf. Dies bedingt einen zusätzlichen elektrischen Leistungsbezug von ca. 6 bis 8 kW_{el} je Werk.

Hemmnisanalyse

Auf Basis der vorangegangenen Überlegungen und Ergebnisse wurde ein Brancheninterview [40] durchgeführt, mit dem Ziel, technische, prozessbezogene Restriktionen sowie mögliche Umsetzungshemmnisse aufzuzeigen. Diese werden im Folgenden erläutert.

In der Papierindustrie gibt es derzeit bereits konkrete Überlegungen und das Bestreben, die Dampferzeugung auf Versorgungsebene bivalent zu gestalten. Die Umbaumaßnahmen hierfür beschränken sich hauptsächlich auf den Tausch eines konventionellen mit einem hybriden Dampfkessel oder auf die Installation eines zusätzlichen vollelektrischen Dampfkessels. Dadurch ist die Option einer sowohl mono- als auch bivalenten Betriebsweise gegeben, sodass in Abhängigkeit der Energiepreise ein flexibler Betrieb im wirtschaftlichen Optimum ermöglicht wird. Beim Einstellen des Energieträgerverhältnisses ist darauf zu achten, mögliche Schwankungen in der Dampfbereitstellung zu vermeiden. Obwohl dies für die Prozessparameter der Trockenpartie als tendenziell unkritisch anzusehen ist, besteht bei Dampfschwankungen die Möglichkeit eines Bahnabrisses an vorgelagerten Prozessschritten, wie beispielsweise der Pressenpartie, was zu einem Produktionsausfall führen würde.

Die Anlagen laufen üblicherweise ca. 8.100 h/a und erreichen eine Lebensdauer von ca. 50 Jahren und mehr. Neben einem Sommer- und Weihnachtsstillstand von maximal 10 Tagen finden alle zwei bis drei Wochen für je vier bis acht Stunden reguläre Wartungs- und Instandhaltungsarbeiten statt. Längere Stillstandzeiten werden in der Regel aufgrund von Profitabilitätsverlusten nicht toleriert. Folglich ist wenig Toleranz für potenzielle Umbaumaßnahmen auf Prozessebene vorhanden. Darüber hinaus sind Amortisationszeiten für Investitionen von ca. einem Jahr gängige Praxis.

Eine allgemeine Umstellung des Trocknungsverfahrens auf beispielsweise reine Infrarot- oder dielektrischer Trocknung ist prinzipiell möglich [39], findet aber bisher keine Anwendung. Für Bestandsanlagen liegt das Hemmnis maßgeblich in der Unwirtschaftlichkeit bei dem aktuellen Energiepreisniveau. Erst mit deutlich veränderten Rahmenbedingungen im Energiesystem ist davon auszugehen, dass auch auf Prozessebene eine Wirtschaftlichkeit für Hybridisierungs- bzw. Elektrifizierungsmaßnahmen vorliegt und ein Anreiz für eine systemdienliche Produktionsfahrweise geschaffen wird. Ein weiteres Hemmnis liegt in der Gewährleistung der Produktqualität in Verbindung mit neuen und bivalenten Technologien auf Prozessebene. Ein noch geringer Forschungs- und Wissensstand zur praxisnahen Umsetzung begünstigen weiterhin den Einsatz bewährter, konventioneller Technologien.

1.4.3 Zementindustrie

Die Zementherstellung erfolgt primär in drei Abschnitten – der Rohstoffgewinnung inklusive aufbereitung, dem Ofenprozess und der Fertigstellung, siehe Abbildung 1.8.

Die abgebauten Rohstoffe Kalkstein, Ton und Quarz werden in einem ersten Schritt zerkleinert und für eine vordefinierte Zusammensetzung homogenisiert. Nach einem weiteren Zerkleinerungsschritt des Rohmaterials zu Rohmehl folgt der Ofenprozess bzw. das Brennen des Zementklinkers. Hierzu wird das Rohmehl über mehrere Zyklonstufen mit heißem Ofenabgas vorgewärmt, im Calcinator vorentsäuert und anschließend im Drehrohrofen zu sogenanntem Klinker gebrannt. Im Anschluss folgt die Klinkerkühlung auf einem Transportrost mittels konvektiver Luftkühlung. In einem letzten Schritt wird der gebrannte Klinker in einem abschließenden Mahl- und Mischprozess zu Zement fertiggestellt [33].

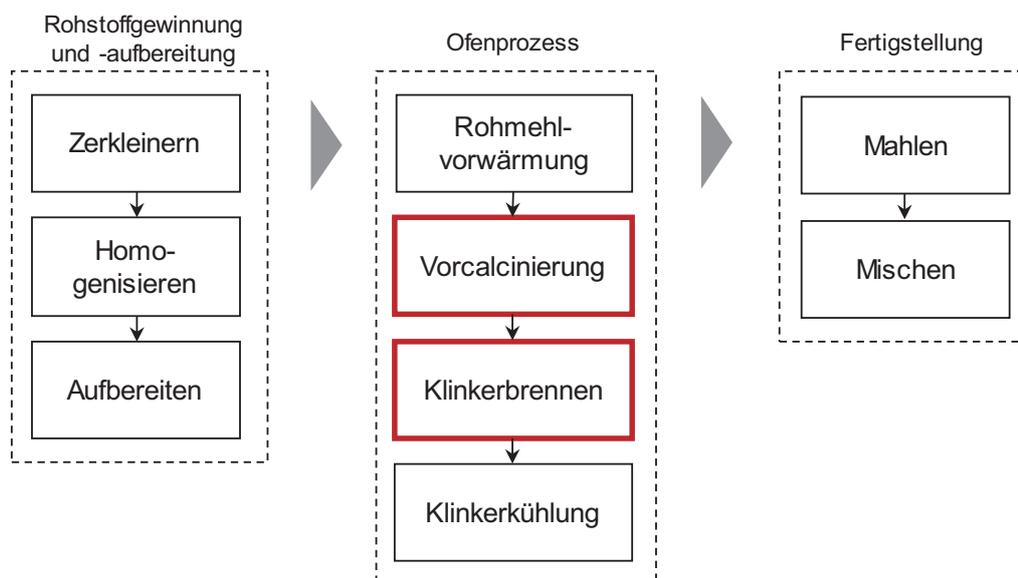


Abb. 1.8: Prozessablaufschritte zur Zementherstellung (eigene Darstellung in Anlehnung an [42], [43], [33], [49])

Relevante Prozesse

Infolge des Hybridisierungskriteriums ist die Betrachtung von Hybridisierungsmöglichkeiten für die Zementproduktion auf die zwei brennstoffbasierten Prozessschritte des Ofenprozesses – die Entsäuerung im Calcinator sowie dem Brennen im Drehrohrofen – limitiert.

Bei der Vorcalciniierung, d. h. Entsäuerung, wird Heißmehl aus der zweituntersten Zyklonstufe von der Ofen- oder Tertiärluft des Drehrohrofens mitgerissen und in den schachtförmigen Calcinator eingebracht. Dort reagieren die beiden Komponenten intensiv miteinander, sodass sich die Heißgastemperatur abrupt von ca. 1.200 °C auf das Niveau der Entsäuerungstemperatur bei ca. 830 °C abkühlt. Zur Aufrechterhaltung der endothermen Entsäuerungsreaktion werden an dieser Stelle oftmals Brennstoffe mit niedrigeren Heizwerten, wie zum Beispiel Altreifen, Tiermehle, Siedlungsabfälle und Klärschlamm [44], zugegeben. Je nach Ofenanlage kann der spezifische Wärmeeintrag bei Temperaturen zwischen 830 °C und 950 °C bis zu ca. 480 kWh je Tonne Zement bzw. 60 % des gesamten Brennstoffenergiebedarfs betragen [38], [45].

Das Brennen des vorgetrockneten und -entsäuerten Rohmehls im Drehrohrofen findet bei Temperaturen von ca. 1.450 °C statt. Der Durchmesser des feuerfest ausgekleideten Drehrohrs beträgt bis zu 6 m bei einem Länge-Durchmesser Verhältnis von 10-17. Durch die kontinuierliche Drehbewegung und einer Neigung von 3° bis 4° findet ein stationärer Massentransport vom Ofeneinlauf in Richtung des am Ofenauslauf installierten Brenners statt. Der spezifische Brennstoffenergieeinsatz für das Klinkerbrennen im Drehrohrofen beträgt ca. 180 kWh pro Tonne Zement, wenn, wie zuvor beschrieben, eine Vorcalciniierung stattfindet. Ohne den vorgelagerten Prozessschritt beträgt der spezifische Brennstoffeinsatz ca. 660 kWh/t [38] aufgrund der energieintensiven Trocknung, Aufheizung und Calciniierung des Rohmaterials im Drehrohr. [45]

Technologieauswahl und Hybridisierungsoptionen

Unter Beachtung der Technologiecharakteristika aus Tabelle 1.1 und Verknüpfung mit den zuvor beschriebenen prozessrelevanten Parametern ergibt sich für die Zementherstellung eine mögliche Technologieauswahl zur hybriden Prozesswärmebereitstellung nach Abbildung 1.9.

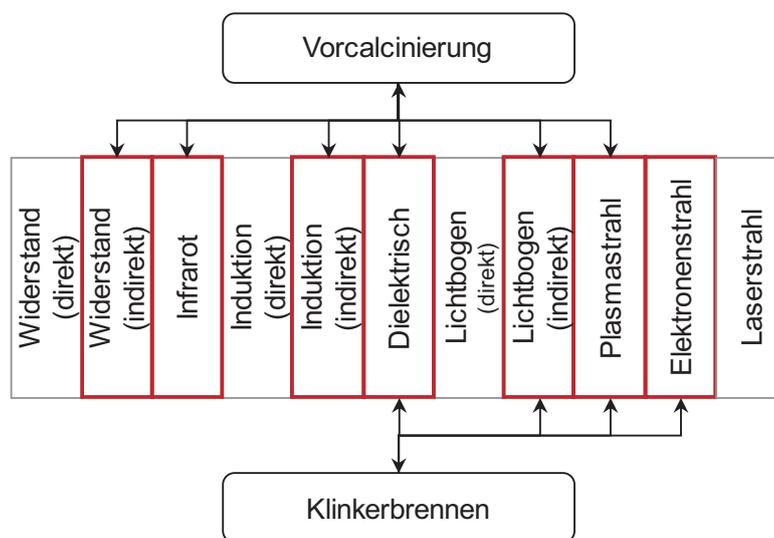


Abb. 1.9: Technologien zur hybriden Prozesswärmebereitstellung in der Zementindustrie

Da es sich bei der Zementproduktion maßgeblich um ein elektrisch nichtleitendes Erwärmungsgut im kontinuierlichen Transportprozess handelt, finden die direkte Widerstands-, Induktions- und Lichtbogenerwärmung zur Vorcalciniierung keine Anwendung. Ebenso auszuschließen ist eine Laserstrahlerwärmung, die nur zur punktuellen Erwärmung einsetzbar ist und sich zusätzlich nicht für grobkörniges Schüttgut eignet. Neben den indirekten Verfahren, der Infrarot- und der dielektrischen Erwärmung kann ebenso eine Plasmastrahlerwärmung zum Einsatz kommen.

Als Hybridisierungsmöglichkeit für das Klinkerbrennen besteht die Option einer dielektrischen Erwärmung sowie einer indirekten Lichtbogen-, Plasma- oder Elektronenstrahlerwärmung. Der Einsatz weiterer Verfahren ist aufgrund ihrer technischen Restriktionen für den Prozessschritt des Klinkerbrennens nicht gegeben.

Zum aktuellen Zeitpunkt sind die genannten Verfahren Gegenstand von Prototypentests zur strombasierten Zementproduktion. Sie finden bisher aber noch keine Anwendung in produzierenden Betrieben. [46]

Hybridisierungspotenzial

Als Hybridisierungspotenzial wird im Folgenden in Abbildung 1.10 das technische Substitutionspotenzial ausgewiesen, das unter der Bedingung einer gegebenen Integrationsmöglichkeit und eines zeitweise vollelektrischen Betriebes vorliegt.

Für die Potenzialermittlung ist die Struktur der deutschen Zementwerke nicht unerheblich: In Deutschland gibt es 53 Zementwerke, von denen 34 eine Klinkerproduktion im Drehrohrföfen betreiben. Dementsprechend ist der thermische Energieeinsatz zur Zementproduktion maßgeblich auf diese 34 Werke zurückzuführen. Davon wiederum betreiben 20 Werke bzw. knapp 60 % eine dem Drehrohrföfen vorgeschaltete Vorcalciniierung, die den Energieeinsatz im Drehrohrföfen deutlich reduziert [47].

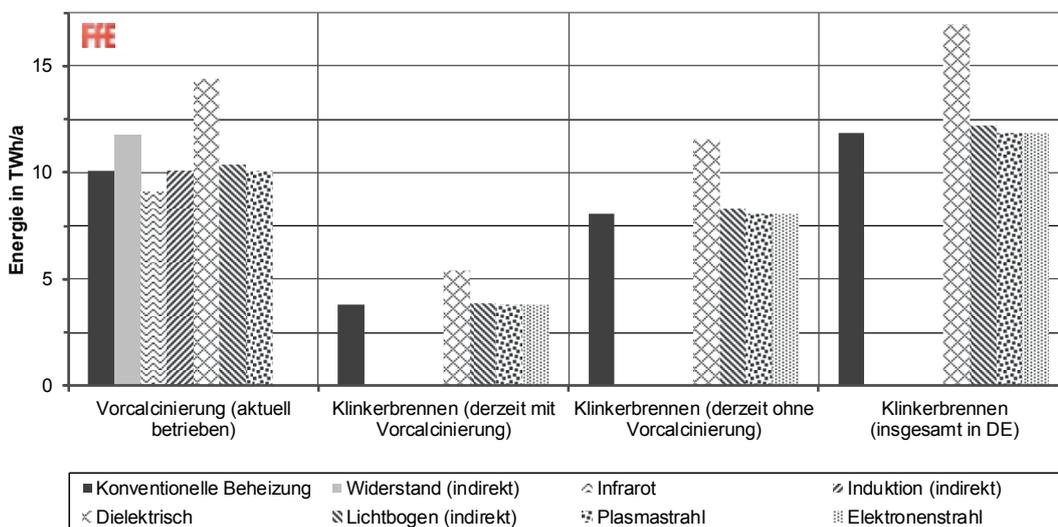


Abb. 1.10: Technisches Substitutionspotenzial nach Prozess und Erwärmungsverfahren in der deutschen Zementindustrie.

Demzufolge zeigt sich in Abbildung 1.10 für die konventionelle Beheizung der Vorcalciniierung ein thermischer Energiebedarf in Deutschland von ca. 10 TWh/a. Eine hybride Substitution des fossilen Energieträgers würde nur im Fall einer Infraroterwärmung aufgrund eines verbesserten Wirkungsgrades zu einem theoretisch verminderten Energiebedarf von ca. 9 TWh_{el}/a führen. Ein konträres Verhalten zeigt sich für die Anwendung einer indirekten Widerstandsheizung, die einen um ca. 2 TWh/a erhöhten Energiebedarf aufweist.

Prozessübergreifend ist folgender Sachverhalt ersichtlich: Sowohl für eine indirekte Induktions- oder Lichtbogen- als auch für eine Plasma- und gegebenenfalls Elektronenstrahlerwärmung liegt jeweils ein ähnlicher Energiebedarf im Vergleich zur konventionellen Beheizung vor. Zusätzlich weist insbesondere ein dielektrisches Erwärmungsverfahren für die Vorcalciniierung und das Klinkerbrennen einen um ca. 43 % erhöhten thermischen Energiebedarf auf. Dies ist maßgeblich auf signifikante Umwandlungsverluste (ca. 37 %) der elektrisch bezogenen Energie zur Erzeugung der elektromagnetischen Wellen zurückzuführen [6].

Unter der Annahme, beide Prozessschritte beispielsweise auf eine hybride Plasmastrahlerwärmung umzurüsten, ergibt sich für Werke mit aktuell betriebener Vorcalciniierung und Klinkerbrennen in Summe ein zusätzlicher elektrischer Leistungsbedarf von durchschnittlich über 90 MW_{el} je Werk in Deutschland. Für die verbleibenden Werke mit alleinigem Klinkerbrennen, die keine Vorcalciniierung betreiben, resultiert ein zusätzlicher elektrischer Leistungsbedarf von über 75 MW_{el} je Werk.

Hemmnisanalyse

Auf Basis der vorangegangenen Überlegungen und Ergebnisse wurde ein Brancheninterview [46] durchgeführt, mit dem Ziel, technische, prozessbezogene Restriktionen sowie mögliche Umsetzungshemmnisse aufzuzeigen. Diese werden im Folgenden erläutert.

In der Zementindustrie stellt eine anteilige Hybridisierung in Kombination mit dem brennstoffbasierten Erwärmungsverfahren eine Übergangslösung auf dem Weg zu einer vollständig strombasierten Zementproduktion dar. Auf diese Weise könnten theoretisch Zementwerke vor dem Hintergrund ihres erheblichen Leistungsbedarfes zur Stabilität des Stromnetzes beitragen. In diesem Zusammenhang ist es denkbar, insbesondere Plasmabrenner gegebenenfalls modular in bestehende Drehrohröfen zu integrieren, die aufgrund derzeitiger Leistungsklassen maximal 5 bis 20 % zur benötigten thermischen Leistung bereitstellen können. Im Fall einer hybriden Integration mit einem Plasmabrenner sind keine Auswirkungen auf die Produktqualität zu erwarten. Dennoch müsste die Calcinatorgeometrie aufgrund veränderter Abgasströme angepasst sowie eine zusätzliche Kühlung des Plasmabrenners realisiert werden.

Für eine hybride bzw. elektrifizierte Zementproduktion liegen darüber hinaus weitere potenzielle Hemmnisse vor, die auf Analysen und Einschätzungen des VDZ beruhen [48]:

- Unter der theoretischen Annahme eines CO₂-freien, strombasierten Klinkerbrennprozesses könnten brennstoffbedingte CO₂-Emissionen vermieden werden, die ca. ein Drittel der anfallenden CO₂-Emissionen darstellen. Die restlichen Emissionen stammen aus der Entsäuerung des Rohmaterials und sind prozessbedingt unvermeidbar. Dieser Sachverhalt entkräftet somit den Hebel zur Umsetzungsbereitschaft einer bivalenten oder rein strombasierten Fahrweise, da kein vollständig emissionsfreier Prozess möglich ist. Im Drehrohröfen könnten zudem alternative Brennstoffe eingesetzt werden. Die vollständige stoffliche und energetische Nutzung von Abfällen entspricht dem Ziel der Schonung von primären Ressourcen, Brennstoffen und Rohstoffen. In Deutschland wird ca. 65 % der benötigten Brennstoffenergie aus alternativen Brennstoffen bereitgestellt [44]. Der dadurch bereits erzielte positive Effekt zur Ressourcenschonung stellt ein Hemmnis für die Nutzung elektrischer Energie dar.
- Gegen den Einsatz von Elektrolichtbogenöfen beim Klinkerbrennprozess sprechen nach derzeitigem Kenntnisstand, dass nur verhältnismäßig geringe Mengen verarbeitet werden könnten. Zudem würde eine veränderte Ofenatmosphäre vorliegen, die Einfluss auf die Produktqualität haben kann. Eine für den Klinkerbrennprozess notwendige Ofengröße ist in absehbarer Zeit nicht gegeben.
- Ein allgemein technologisches Hemmnis liegt darin, dass das Rohmehl bzw. der Klinker nicht elektrisch leitend ist. Dadurch eignen sich prinzipiell nur indirekte elektrothermische Erwärmungsverfahren, die vor allem auf dem Prinzip der Wärmestrahlung basieren. Unter Einsatz der Elektrodenstrahltechnik ist beispielsweise keine homogene Erwärmung des Materials zu erreichen. Ebenso resultieren für eine dielektrische Materialerwärmung in einem Mikrowellenofen hohe Energieverluste und Investitionskosten.
- Für einen strombasierten Klinkerbrennprozess wären drastische Steigerungen der bisher eingesetzten Strommengen erforderlich, die über die lokale, bestehende Strominfrastruktur nicht zu Verfügung gestellt werden können. Demzufolge bedarf es für Hybridisierungsmaßnahmen einer weitreichenden Erneuerung der Strominfrastruktur auf Betriebsebene und dem lokalen Stromnetz.
- Eine vollständig hybride bzw. elektrische Zementproduktion würde im weitesten Sinne eine technologische Neuentwicklung des Klinkerbrennprozesses bedeuten. Beispielsweise ist nach derzeitigem Kenntnisstand davon auszugehen, dass ein rein strombasierter Prozess, nicht im bisher kontinuierlichen Betrieb, möglich ist.

1.5 Schlussfolgerungen und Ausblick

Die Recherche der zur Verfügung stehenden elektrothermischen Erwärmungstechnologien zeigt, dass je nach eingesetzter Technologie theoretisch alle in der Glas-, Papier- oder Zementindustrie benötigten Temperaturniveaus erreicht werden können. Welche elektrische Erwärmungsmethode sich für die Hybridisierung bestimmter Prozesse eignet, ist von den individuellen Prozess- und Umgebungsbedingungen abhängig. Dabei spielt die Integrierbarkeit in die bestehende Prozessführung sowie die Regelbarkeit der konventionellen Erwärmung eine große Rolle. Für die Industrie ist dabei wichtig, dass durch die hybride Wärmebereitstellung keine Produktionsprobleme, wie zum Beispiel Qualitätsverluste oder Verzögerungen, auftreten. Im Vergleich der drei durchgeführten Branchenanalysen wird Folgendes deutlich:

Eine „echte“ Hybridisierung an Bestandsanlagen des energieintensiven Schmelzprozesses für die Glasherstellung gestaltet sich problematisch bis nicht durchführbar. Eine deutliche Steigerung des elektrischen Energieeintrages über das Maß einer elektrischen Zusatzheizung hinaus würde eine neue Wannengeometrie, andere Feuerfestmaterialien sowie einen vollumfänglichen Umbau eines Glaswerkes bedeuten. Bei Wannenlaufzeiten von ca. 15 Jahren ist im laufenden Betrieb kein derartiger Eingriff in den laufenden Prozess gegeben. Vor diesem Hintergrund ist es wahrscheinlicher, dass in Bestandsanlagen bevorzugt synthetische, erneuerbar erzeugte Brennstoffe zum Einsatz kommen werden.

Die Branchenanalyse der Papierindustrie zeigt, dass Hybridisierungsmaßnahmen im Bereich der Wärmeerzeugung auf Versorgungsebene schon heute verhältnismäßig einfach umsetzbar sind. Beispielsweise kann für die Dampferzeugung ein hybrider Kesseltausch vorgenommen oder ein paralleler, elektrischer Kessel installiert werden. Dies hat zum Vorteil, dass eine Beeinflussung von Prozessparametern oder der Produktqualität auszuschließen ist. Eine Umsetzung von netzdienlichen Investitionen für Hybridisierungsmaßnahmen auf Prozessebene steht zum heutigen Zeitpunkt noch in starker Konkurrenz mit dem derzeitigen Energiepreisniveau bei üblichen Amortisationszeiten von ca. einem Jahr.

Für die Zementherstellung ist eine Hybridisierung des energieintensiven Ofenprozesses, beispielsweise mittels Plasmabrenner, möglich. Heute verfügbare Leistungsgrößen schränken allerdings bis auf Weiteres den Hybridisierungsgrad an elektrisch bereitgestellter Prozesswärme auf 5 bis 20 % ein, sofern keine modulare Integration möglich ist. Ein zusätzlicher elektrischer Leistungsbezug von ca. 75 bis 90 MW_{el} je Werk bedingt zudem bei Bestandsanlagen eine ganzheitliche Erneuerung der elektrischen Infrastruktur.

Branchenübergreifend wird ersichtlich, dass zum heutigen Zeitpunkt, der technische wie wirtschaftliche Aspekt ein Haupthemmnis darstellt, gefolgt von dem Risiko einer Beeinflussung der Produktqualität für Hybridisierungsmaßnahmen auf Prozessebene. Sowohl unzureichender Kenntnis-, Forschungs- als auch Entwicklungsstand für den Einsatz elektrothermischer Verfahren im Industriemaßstab begünstigen weiterhin den Einsatz konventioneller Technologien zur Prozesswärmebereitstellung. Ein drittes Hemmnis ist im Bereich der derzeit unzureichenden elektrischen Infrastruktur für Bestandsanlagen zu sehen, die für eine deutliche Steigerung des elektrischen Leistungsbezugs bei einer hybriden Fahrweise nicht ausgelegt ist.

1.6 Literatur

- [1] Dufter, Christa; Guminski, Andrej; Orthofer, Clara; von Roon, Serafin; Gruber, Anna: Lastflexibilisierung in der Industrie – Metastudienanalyse zur Identifikation relevanter Aspekte bei der Potenzialermittlung in: Paper und Vortrag bei der IEWT 2017 in Wien. München: Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH, 2017
- [2] Schüwer, Dietmar et al.: Electrification of industrial process heat: long-term applications, potentials and impacts. Wuppertal: Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH, 2018.
- [3] Technology Assessments - Chapter 6: Innovating Clean Energy Technologies in Advanced Manufacturing - Process Heating. Washington DC, USA: U. S. Department of Energy, 2015.
- [4] Ausfelder, Florian et al.: Flexibilitätsoptionen in der Grundstoffindustrie - Methodik | Potenziale | Hemmnisse. München, Frankfurt/Main, Stuttgart: Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH, DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), 2018.
- [5] Gruber, Anna; Biedermann, Franziska; von Roon, Serafin: Industrielles Power-to-Heat Potenzial in: Vortrag bei der IEWT 2015 in Wien. München: Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH, 2015
- [6] Rudolph, M.; Schaefer, H.: Elektrothermische Verfahren - Grundlagen, Technologien, Anwendungen. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH, 1989
- [7] De Wachter, Bruno: Introduction to Industrial Electrical Process Heating. Brüssel: European Copper Institute, 2015.
- [8] Was ist Induktionserwärmung?. Reichenbach: Inductoheat Europe GmbH, 2015.
- [9] Imenokhoyev, Ivan et al.: Mikrowellenerwärmungstechnik: Potentiale und Grenzen. In: DKG Vol. 89, No 11-12. Eschenfelden: Linn High Therm GmbH, 2012.
- [10] Imenokhoyev, Ivan et al.: Microwave Heating Technology: Potentials and Limits. Eschenfelden: LINN HIGH THERM GmbH, 2013.
- [11] Industrial microwave technology - High-performance solutions for your industrial processes. Marseille: IDCO, 2014.
- [12] Understanding the Benefits of Electric Arc Furnace Technology. Manchester: Washington Mills Electro Minerals Limited, 2015.
- [13] Handbuch Elektrische Energietechnik. Braunschweig/Wiesbaden: Liviu Constantinescu-Simon, 1996.
- [14] Pragnesh, Dave et al.: Plasma pyrolysis and gasification of plastics waste – a review. In: Journal of Scientific & Industrial Research Vol. 69. Neu Delhi: National Institute of Science Communication and Information Resources, 2010.
- [15] Center for Materials Production: Plasma Arc Technology. Pittsburgh: EPRI Center for Materials Production (CMP), 1991.
- [16] Wie heiß ist eigentlich der Laserstrahl?. In: <https://www.eurolaser.com/de/kunden-service/faq/wie-heiss-ist-eigentlich-der-laserstrahl/>. (Abruf am 2019-01-30); Lüneburg: eurolaser GmbH, 2019.
- [17] Lexikon Produktionstechnik Verfahrenstechnik. Düsseldorf: Heinz Hiersig, 1995.
- [18] Center for Materials Fabrication: Indirect Resistance Heating. In: Techapplication Vol.3, Nr.7. Columbus, Ohio: EPRI Center for Materials Fabrication (CMF), 1994.
- [19] 2012 ASHRAE Handbook - Heating, Ventilating, and Air-Conditioning Systems and Equipment. Tullie Circle, Atlanta: ASHRAE, 2012.
- [20] Gerhardt, Norman et al.: Potenziale für Strom im Wärmemarkt bis 2050 - Wärmeversorgung in flexiblen Energieversorgungssystemen mit hohen Anteilen an erneuerbaren Energien. Frankfurt am Main: VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V., 2015
- [21] Schmidt, Peter: Der Elektronenstrahl, ein faszinierendes Instrument für neue Perspektiven in der Schweiss-technik. Rudolfstetten: SwissBeam AG, 2015.
- [22] Schmitt, Bastian et al.: SolFood - Leitfaden zur Nutzung solarer Prozesswärme in der Ernährungsindustrie. Kassel: Universität Kassel, 2015.
- [23] Kleinertz, Britta et al.: Heat Dispatch Centre – Symbiosis of heat generation units to reach cost efficient low emission heat supply. In: Energy Procedia (2019). Munich: Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH
- [24] Langfeld, Roland; Schaeffer, Helmut A.: Werkstoff Glas - Alter Werkstoff mit großer Zukunft in: Technik im Fokus. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2014
- [25] Glas - Ein Werkstoff mit vielen Talenten. Düsseldorf: Bundesverband Glasindustrie e.V., 2014
- [26] Scalet, Bianca et al.: Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Manufacture of Glass. Sevilla: Joint Research Centre of the European Commission (JRC), 2013
- [27] Worrell, Ernst; Galitsky, Christina; Masanet, Eric; Graus, Wina: Energy Efficiency Improvement and Cost Saving Opportunities for the Glass Industry - An ENERGY STAR Guide for Energy and Plant Managers. Berkeley, Kalifornien: Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Lab, 2008
- [28] Herstellung von Floatglas. In: <https://www.glastroesch.ch/services/glaswissen/herstellung-und-physikalische-begriffe/herstellung-von-floatglas.html>. (Abruf am 2019-01-31); Bützberg, Schweiz: Glas Trösch Holding AG, 2019.

- [29] Fleischmann, Bernhard: Interview - Technische Aspekte zu Hybridisierungsmaßnahmen in der Glasindustrie; Interview, geführt von Gruber, Anna, Veitengruber, Frank; FfE GmbH, München: Hüttentechnische Vereinigung der Deutschen Glasindustrie e. V., 2019
- [30] Teschner, Roman: Glasfasern. Würzburg: Springer Vieweg, 2013.
- [31] Nacke, B.: Glasschmelzen ohne Tiegel am ETP - Induktives Skoll-Melting von Glas im Induktortiegel. In: Strom & Wärme 02/2004. Hannover: Institut für Elektrothermische Prozesstechnik und Vereinigung zur Förderung des Instituts für Elektrowärme der Universität Hannover e.V., 2004.
- [32] Anonym: Interview - Hybridisierungsmaßnahmen und -hemmnisse in der Glasindustrie; Interview, geführt von Veitengruber, Frank, Gruber, Anna; FfE GmbH, München: Anonym, 2019
- [33] Blesl, Markus; Kessler, Alois: Energieeffizienz in der Industrie in: Springer Verlag. Berlin Heidelberg: Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER), Universität Stuttgart, EnBW Energie Baden-Württemberg AG, Forschung und Innovation, Karlsruhe, 2013.
- [34] Vassiliadis, Michael; Wolf, Iris; Nieber, Tomas: Papiererzeugung in Deutschland – Eine Branchenanalyse. Hannover: Industriegewerkschaft Bergbau, Chemie, Energie, 2014
- [34] Glasindustrie in Deutschland - Eine Branchenanalyse. Hannover: Industriegewerkschaft Bergbau, Chemie, Energie (IGBCE), 2014.
- [35] Zellstoff- und Papierindustrie in: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/wirtschaft-konsum/industrie-branchen/holz-zellstoff-papierindustrie/zellstoff-papierindustrie> (Abruf: 24.09.2017) (Archived by WebCite® at <http://www.webcitation.org/6tmxnpEcR>). Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt, 2014
- [36] Papier machen - Industrielle Papierproduktion. Bonn: Verband Deutscher Papierfabriken e.V., 2015
- [37] Blechschmidt, Jürgen: Taschenbuch der Papiertechnik. München: Carl Hanser Verlag München, 2013
- [38] Laufendes, Projekt: Energiewende in der Industrie: Potenziale, Kosten und Wechselwirkungen mit dem Energiesektor (2018 - 2021). München: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), 2019.
- [39] The Annual Report of the Austrian Paper Industry - Jahresbericht der Papierindustrie 2013. Wien: Austropapier - Vereinigung der Österreichischen Papierindustrie, 2013.
- [40] Carda, Stephan: Interview - Hybridisierungsmaßnahmen und -hemmnisse in der Papierindustrie; Interview, geführt von Veitengruber, Frank, Gruber, Anna, Dufter, Christa; FfE GmbH, München: UPM GmbH, 2019
- [41] Heizen Sie schon induktiv?. Malente: Kendrion Kuhnke Automation GmbH, 2016.
- [42] Zement-Taschenbuch 51. Ausgabe. Düsseldorf: Verein Deutscher Zementwerke e.V., 2008
- [43] Schneider, Martin: Zementindustrie im Überblick 2016/2017. Düsseldorf: Verein Deutscher Zementwerke e.V., 2016
- [44] Umweltdaten der deutschen Zementindustrie. Düsseldorf: Verein Deutscher Zementwerke e.V., 2015
- [45] Schneider, M.: Zement - Taschenbuch 2002. Düsseldorf: Verein Deutscher Zementwerke e.V., 2002
- [46] Anonym: Interview - Hybridisierungsmaßnahmen und -hemmnisse in der Zementindustrie; Interview, geführt von Veitengruber, Frank, Gruber, Anna; FfE GmbH, München: Verein Deutscher Zementwerke e.V., 2019
- [47] Brunke, Jean-Christian; Blesl, Markus: Energy conservation measures for the German cement industry and their ability to compensate for rising energy-related production costs in: Journal of Cleaner Production. Amsterdam: Elsevier, 2014
- [48] Ruppert, Johannes et al.: Prozesskettenorientierte Ermittlung der Material- und Energieeffizienzpotentiale in der Zementindustrie: Entwurf Endbericht. Düsseldorf: VDZ gGmbH, 2018.
- [49] Hübner, Tobias: Simulation von Referenzprozessen zur Bestimmung von Flexibilitätspotenzialen und der Auswirkungen von Effizienzmaßnahmen in der Grundstoffindustrie. Masterarbeit. Herausgegeben durch Technische Universität München, betreut durch die Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH: München, 2017.
- [50] Treppe, Konrad et al.: Energetische Optimierung der Trockenpartie - Wärmetechnische Bewertung zur Steigerung der Energieeffizienz. Dresden: Technische Universität Dresden, 2012.

FLEXIBILITÄTSPOTENZIAL INDUSTRIELLER HYBRIDER WÄRMENETZE IN DEUTSCHLAND

Verantwortliche Autoren

Britta Kleinertz bkleinertz@ffe.de
Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH, Am Blütenanger 71, 80995 München

Anna Gruber agruber@ffe.de
Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH, Am Blütenanger 71, 80995 München

Frank Veitengruber fveitengruber@ffe.de
Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH, Am Blütenanger 71, 80995 München

Michael Kolb mkolb@ffe.de
Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH, Am Blütenanger 71, 80995 München

Serafin von Roon sroon@ffe.de
Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH, Am Blütenanger 71, 80995 München

2.1 Einleitung

Mehrere Studien zeigen, dass für die zukünftige Wärmeversorgung auf Basis erneuerbarer Energien die Bedeutung von Wärmenetzen zunehmen wird [1], [2]. So wird in [3] angenommen, dass im Jahr 2050 etwa 38 % der gesamten thermischen Energieversorgung über thermische Netze erfolgen wird, was eine Flexibilisierung dieser Netze zu einem hochinteressanten Forschungsgebiet macht.

Ziel dieser Analyse ist es, das aktuelle technische Flexibilitätspotenzial abzuschätzen, welches industrielle Wärmenetze dem Stromversorgungssystem durch eine Verbindung von brennstoffbasierten mit strombasierten Wärmeversorgungstechnologien bereitstellen können (Hybridisierung). Diese Hybridisierung ermöglicht es, dass die brennstoffbasierte Technologie bei fehlendem Strom im Versorgungssystem Wärme liefert, während dies bei hoher Stromerzeugung die strombasierten Technologien übernimmt. In einem vollständig CO₂-neutralen Energieversorgungssystem könnten dann brennstoffbasierte Technologien grüne Brennstoffe verwenden, wodurch die gesamte Energieversorgung erneuerbar wird.

Hier werden zunächst mögliche Verknüpfungen von Wärmeversorgungstechnologien zur Flexibilisierung aufgezeigt. Anschließend wird eine Top-down-Analyse des deutschen industriellen Wärmeenergiebedarfs vorgestellt, womit relevante Daten für die netzbasierte Wärmeversorgung gewonnen werden. Mit Hilfe weiterer Datensätze wird die jährlich über fossil beheizte industrielle Wärmenetze bereitgestellte Wärmemenge ermittelt sowie die potenzielle flexible Last abgeschätzt.

Eine detailliertere Darstellung der relevanten Randbedingungen für die Flexibilisierung industrieller Wärmenetze, der möglichen technologischen Verknüpfungen und eine Abschätzung des Flexibilitätspotenzials durch Netzüberhitzung ist in [4] dargestellt.

2.2 Geeignete Verknüpfung von Wärmeerzeugern für die hybride Wärmeversorgung

Fallstudien zeigen, dass zur Erreichung einer effizienten thermischen Energieversorgung eine Vernetzung mehrerer Wärmequellen in multivalenten (gleichzeitig arbeitenden) und multienergetischen (auf mehreren Energiequellen basierende) Verknüpfung erstrebenswert ist [5]. Beim Betrieb der vernetzten Anlagen besteht die Priorität, dass die zugeführte Energiequelle (auch Strom) zu jeder Zeit so effizient wie möglich genutzt wird.

Im Allgemeinen werden Wärmeerzeuger parallel oder in Reihe geschaltet. Während in der Reihenschaltung der gewünschte Temperaturhub auf die Erzeuger verteilt wird, wird im Parallelbetrieb der Volumenstrom aufgeteilt.

Wärmepumpen sind bei niedrigen Temperaturen deutlich effizienter als Elektro- und Elektrodenkessel, können aber voraussichtlich auch in Zukunft keine Temperaturen über 120 °C erreichen. Daher erscheint eine temperaturbedingte Kopplung der Niedertemperatur-Wärmequelle Wärmepumpe mit Hochtemperatur-Wärmequellen wie Elektrodenkesseln, Brennstoffkesseln oder Blockheizkraftwerken sinnvoll. Ein Überblick über sinnvolle hybride Wärmeerzeugungskonzepte in Abhängigkeit von der Vor- und Rücklaufauftemperatur ist in Tabelle 2.1 enthalten.

Tabelle 2.1: Überblick über geeignete Wärmeerzeugungskonzepte nach Soll-Temperaturniveau (Elektroden- und Elektrokessel werden als Elektrokessel zusammengefasst)

Zieltemperatur	Hybride Wärmeerzeugungskonzepte
Vorlauf < 120 °C	Wärmepumpe, fossil befeuerter Brenner KWK, fossil befeuerter Brenner
Vorlauf > 120 °C	Wärmepumpe, Elektrokessel, Dampfkessel Wärmepumpe, KWK, Elektro- und oder Dampfkessel KWK, Elektro- und oder Dampfkessel
Vorlauf > 120 °C und Rücklauf > 120 °C	KWK, Elektro- und oder Dampfkessel Dampfkessel, Elektrokessel

Der kostengünstigste Betrieb dieser hybriden Konzepte hängt vom Verhältnis der Wärmeerzeugungskosten aus Strom und Brennstoffen ab. Aus systemischer Sicht ist darüber hinaus zwischen Zeiten mit sehr hoher Stromerzeugung aus Erneuerbaren Energien und Zeiten mit hoher Last und geringer Stromerzeugung aus Erneuerbaren Energien zu unterscheiden. Einzelheiten zum Systembetrieb sind in [4] erläutert.

2.3 Industrieller Wärmeenergiebedarf und relevante Energiequellen

Im Jahr 2017 verbrauchte die deutsche Industrie 2.700 PJ Endenergie, von denen 2.040 PJ zur Bereitstellung von Wärmeenergie (22 % des deutschen Endenergiebedarfs) verwendet wurden [6]. Der Wärmeenergiebedarf teilt sich in Prozesswärme (89 %), Raumwärme (7 %), Warmwasser (1 %), Klimatisierung (1 %) und Prozesskühlung (2 %) [7]. Zur Bestimmung des Potenzials hybrider Wärmenetze, muss der Endenergieverbrauch in Nutzenergie umgewandelt werden. Setzt man vereinfacht je Endenergie (Aufschlüsselung siehe [7] bzw. [4]) einen durchschnittlichen Wirkungsgrad der energetischen Wandlung an, ergibt sich ein Nutzwärmebedarf von 1.780 PJ.

Für eine Analyse des Potenzials der netzbasierten thermischen Energieversorgung ist das Temperaturniveau des Prozesswärmebedarfs essenziell. Somit wird der Bedarf aus [7] mit der Aufschlüsselung des Prozesswärmebedarfs nach Temperaturniveau gemäß [8] verknüpft. Das Ergebnis ist in Abbildung 2.1 dargestellt.

Der thermische Energiebedarf bei Temperaturen über 240 °C ist für die netzbasierte thermische Energieversorgung nicht relevant. Somit sind etwa 24 % oder 396 PJ aus der gesamten Prozesswärmeversorgung das theoretische Potenzial für eine netzbasierte thermische Energieversorgung. Dieses Potenzial kann durch die Einbeziehung von Raumwärme (136 PJ) und Trinkwarmwasser (15 PJ) deutlich erhöht werden und erreicht ein Gesamtpotenzial von 547 PJ oder 31 % des gesamten Wärmeenergiebedarfs in der Industrie.

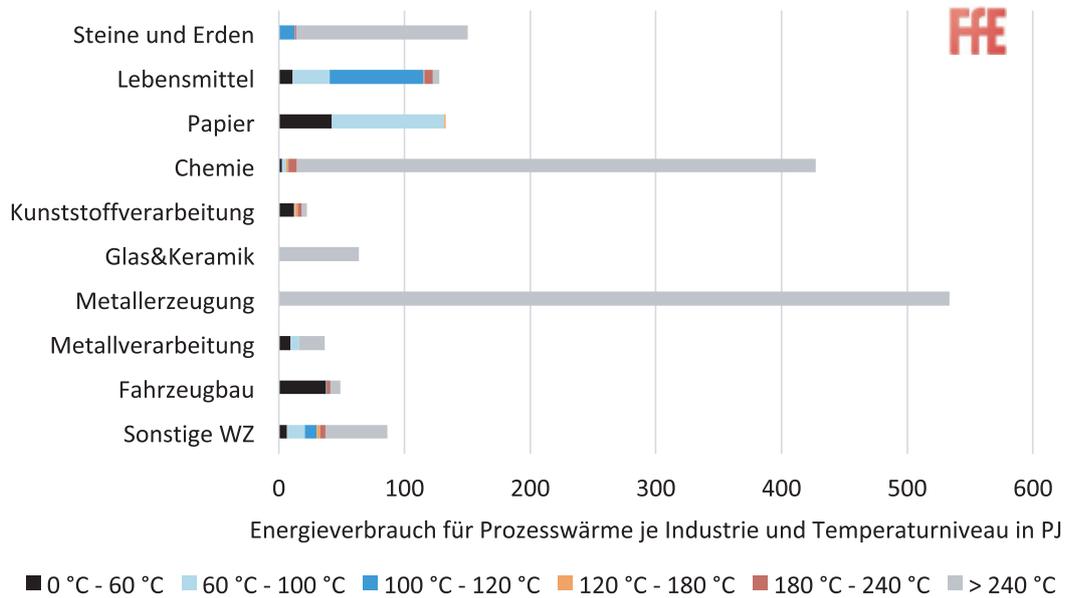


Abb. 2.1: Energiebedarf für Prozesswärme nach Branchen und Temperaturniveau, basierend auf Daten aus [7] und [8].

2.4 Hybridisierungs- und Flexibilitätspotenzial industrieller Wärmenetze

Die Berechnung des Hybridisierungspotenzial basiert auf der folgenden Idee: Alle derzeit installierten fossilen Wärmeerzeuger, die an ein industrielles Wärmenetz angeschlossen sind, werden mit einem strombetriebenen System verknüpft. Die elektrische Last dieser Einheiten ist das theoretische Potenzial für die Lastflexibilität. Daher muss vom bereits bestimmten Wärmebedarf 547 PJ, der sich

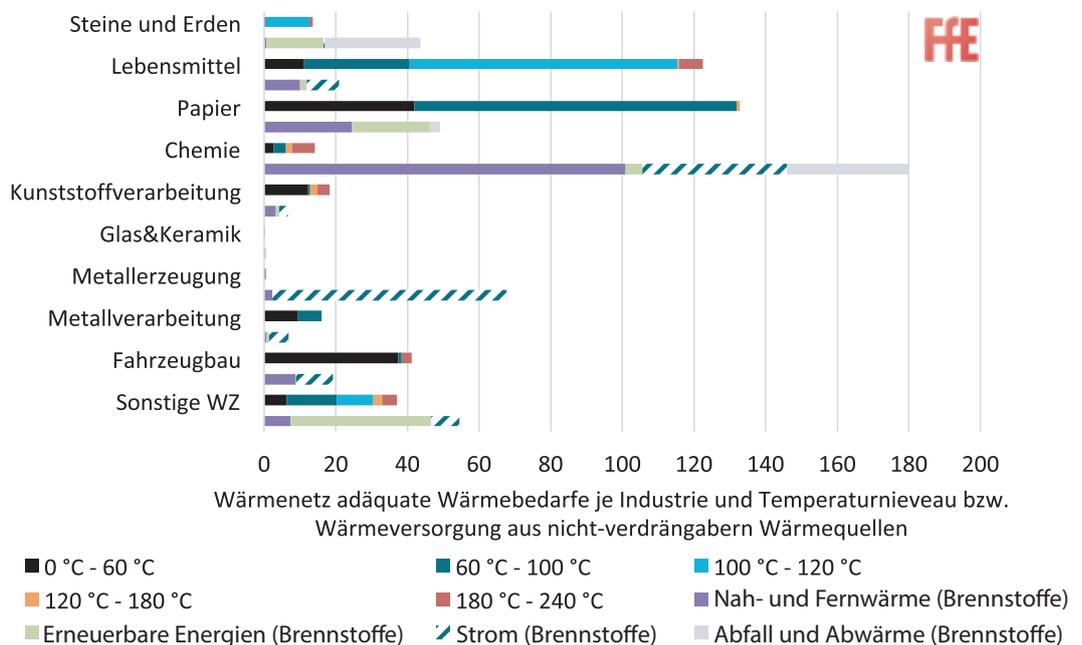


Abb. 2.2: Energiebedarf für Prozesswärme nach Branchen hinsichtlich Temperaturniveau und Energiebereitstellung aus erneuerbaren Energien, Strom und Fernwärme, abgeleitet aus [6], [7] und [8].

für die geeigneten Temperaturen ergibt, die durch Strom, Fernwärme, erneuerbare Wärmeerzeugung oder Abfall- und Abwärmanlagen bereitgestellte Wärme abgezogen werden.

In Abbildung 2.2 ist der Prozesswärmebedarf nach Industriebranche und Temperaturniveau bis zu einer Temperatur von 240 °C dargestellt sowie die Energiebereitstellung aus erneuerbaren Energien, Strom und Fernwärme [6]. Die Grafik zeigt, dass nach den vorliegenden Daten in mehreren Branchen die Energiebereitstellung aus den vier „nicht verdrängbaren Energiequellen“ höher ist als der tatsächliche Wärmebedarf bei Wärmenetz-geeigneten Temperaturniveaus. Diese Zweige werden von der weiteren Analyse ausgeschlossen.

Für die übrigen Branchen deckt die Energie aus erneuerbaren Energien und Fernwärme einen Energiebedarf bei Temperaturen unter 240 °C, die Wärmeversorgung aus elektrischer Energie und Abfall wird jedoch von allen Temperaturniveaus abgezogen.

Das verbleibende Potenzial für eine hybride industrielle Wärmeversorgung, erweitert um den Wärmebedarf für Raumwärme und Trinkwarmwasser, liegt bei 282 PJ und damit bei 16 % des gesamten Wärmeenergiebedarfs der Branche.

2.4.1 Ausschluss der dezentralen Wärmeversorgung – Analyse der thermischen Wärmeversorgung in realen Betrieben

Theoretisch könnte der gesamte Wärmebedarf auf Temperaturen bis 240 °C durch thermische Netze gedeckt werden. In vielen industriellen Anwendungen sind jedoch dezentrale Wärmeversorgungseinheiten bei diesen Temperaturen vorhanden und müssen daher vom Potenzial abgezogen werden.

An der FfE existiert ein umfangreicher Datensatz über die Eigenschaften der Energieversorgung in Industriebetrieben. Der für diese Studie analysierte Datensatz enthält Details zur verbrauchten Endenergie, installierten Energieerzeugungs- und verbrauchseinheiten sowie dem Versorgungssystem für Heizung und Kühlung. Tabelle 2.2 gibt einen Überblick über den Anteil der netzgebundenen Wärmeversorgung an der gesamten Versorgung in den untersuchten Unternehmen.

Tabelle 2.2: Übersicht über den Anteil der zentralbasierten Wärmeversorgung bei ausreichenden Temperaturen im analysierten Datensatz

Industriezweig	Anzahl Unternehmen	Unternehmen mit Wärmebedarf < 240 °C	Anteil über Wärmenetze bereitgestellter Prozesswärme	Anteil zentral bereitgestellter Raumwärme
Gummi- und Kunststoffwaren	3	3	65 %	90 %
Glas und Keramik bzw. Steine und Erden	3	2	90 %	0%
Papier	4	4	69 %	100 %
Metallerzeugung und -bearbeitung	8	5	38 %	83 %
Chemische Industrie	5	5	98 %	98 %
Maschinen- und Fahrzeugbau	13	8	62 %	95 %
Lebensmittel	11	11	99 %	96 %

Insgesamt verbleibt ein Potenzial von 202 PJ oder ein Anteil von 11 % des industriellen thermischen Energieverbrauchs als geeignet für die hybridisierte thermische Wärmeversorgung (Abbildung 2.3).

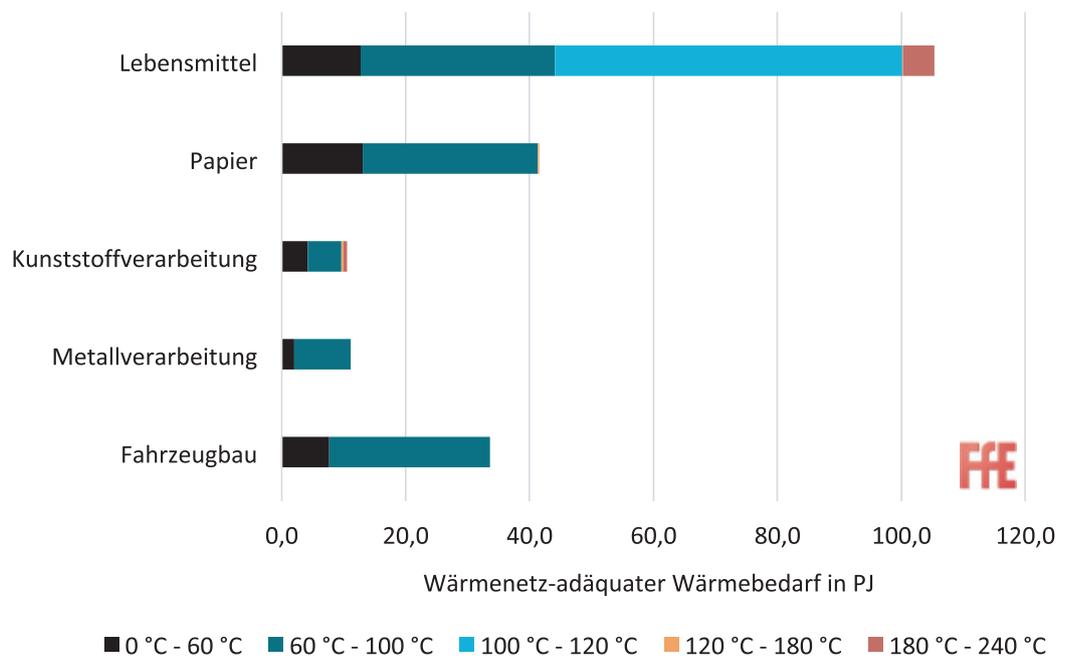


Abb. 2.3: Energiebedarf für Heizzwecke, zentral bereitgestellt durch fossile Brennstoffe, potenziell bereitgestellt durch hybride industrielle Wärmenetze

2.4.2 Installierte netzgekoppelte Wärmelast

In Tabelle 2.3 werden die berechneten Potenziale zu geeigneten Netztemperaturen aggregiert und mit dem elektrischen Wärmeerzeuger für das Basiszenario kombiniert. Im Basiszenario werden Wärmepumpen für einen Temperaturanstieg auf bis zu 120 °C eingesetzt und die weitere Temperaturerhöhung erfolgt über den Elektrokessel. Im Szenario der maximalen Flexibilität wird von einer Maximierung des installierten Stromverbrauchs ausgegangen, daher wird die gesamte Wärme von Elektrokesseln bereitgestellt.

Tabelle 2.3: Überblick über relevante Temperaturniveaus für die netzgebundene thermische Energieversorgung, geeignete Technologien und Flexibilitätspotenziale

Netztemperatur	Theoretisches Potenzial für netzbasierte Wärmeerzeugung in PJ	Angewendete Technologien im Basis Szenario
240 °C	7	Elektrokessel
180 °C	1	Wärmepumpe (COP = 3) + Elektrokessel
120 °C	180	Wärmepumpe (COP = 3)
60 °C	48	Wärmepumpe (COP = 4)

Aus den vorliegenden Daten kann die installierte Leistung der Wärmeerzeuger pro Wärmenetz abgeleitet werden. Ein erheblicher Teil der installierten Leistung dient jedoch nur als Reserveeinheit. Daher ist die maximale thermische Leistungsaufnahme des Netzes geringer als die Leistung der installierten Wärmeerzeuger. Da aus den vorliegenden Daten keine realistische Annahme über die Volllaststunden von Wärmenetzen abgeleitet werden kann, ist die flexible Leistung für beide Szenarien in Abbildung 2.4 für eine Variation der Volllaststunden dargestellt.

Bei 4.000 Volllaststunden ergibt sich somit im Basiszenario eine flexible Leistung von 4,7 GW und sogar 14,5 GW im Szenario mit maximaler Flexibilität. Dies entspricht einem Anteil an der mittleren Stromnachfrage in Deutschland von 59 GW von knapp 8 % (Basiszenario) bzw. fast 25 % (Szenario Maximale Flexibilität).

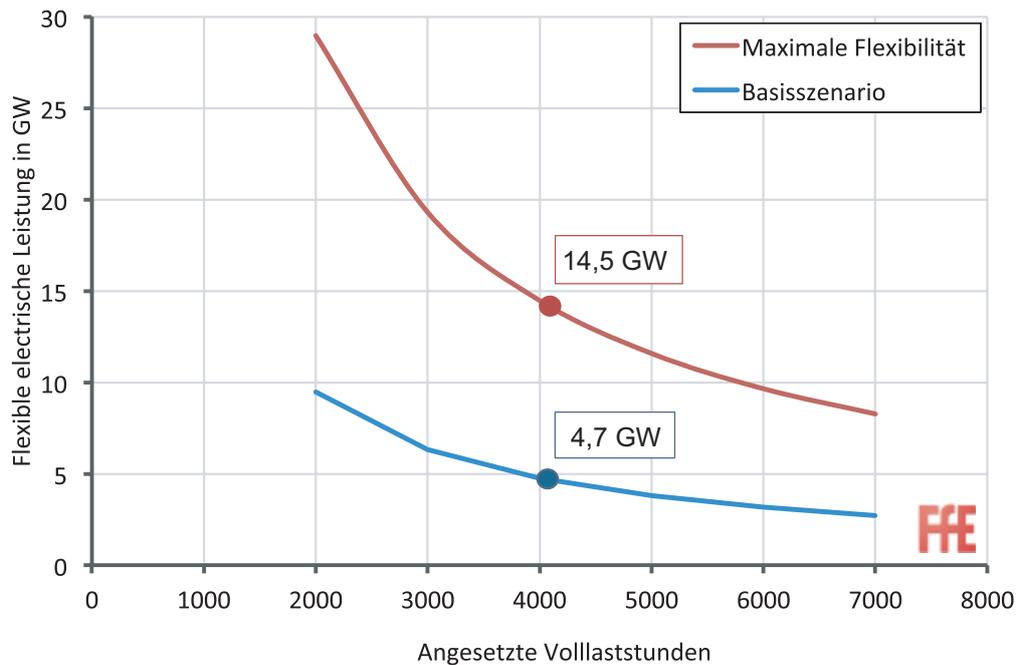


Abb. 2.4: Darstellung der flexiblen elektrischen Leistung, welche von hybriden Wärmenetzen in der Industrie bereitgestellt werden könnten.

2.5 Limitationen der Ergebnisse, Schlussfolgerung und Ausblick

Die wichtigste Einschränkung der Aussagekräftigkeit der Ergebnisse basiert auf der limitierten Datenverfügbarkeit. Zukünftige Untersuchungen zum Flexibilitätspotenzial sollten sich auf eine Validierung der Eingangsdaten, insbesondere den Wärmebedarf nach Temperaturniveau, konzentrieren.

In dieser Untersuchung wurde das Flexibilitätspotenzial nur für den Status quo berechnet. In Zukunft wird der thermische Bedarf in der Industrie jedoch sinken. Das hier genannte Potenzial könnte durch den Anschluss von weiteren Wärmeverbrauchern an das Wärmenetz erweitert werden. Dazu gehören Wärmeverbraucher auf dem Temperaturniveau des Wärmenetzes, aber auch darunter (ermöglicht durch Wärmetauscher) und darüber (ermöglicht durch dezentrale Wärmeverstärker).

Insgesamt ist das große Potenzial dieses branchenübergreifenden und landesweit vorhandenen Potenzials dieser Flexibilitätsoption weitere theoretische und praktische Untersuchungen wert.

2.6 Literatur

- [1] Connolly, David et al.: Heat Roadmap Europe: Combining district heating with heat savings to decarbonise the EU energy system. In: Energy Policy 65 (2014) 475-489. Amsterdam: Elsevier Ltd., 2014.
- [2] District energy in cities - Unlocking the Potential of Energy Efficiency and Renewable Energy. Paris, Frankreich: United nations Environmental Programm - Division of Technology, Industry and Economics, 2015
- [3] Nitsch, Joachim; et al.: Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global - Leitstudie 2011. Bonn: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Institut für Technische Thermodynamik, Abteilung Systemanalyse und Technikbewertung, 2012
- [4] Kleinertz, Britta et al.: Flexibility potential of industrial thermal networks through hybridization. München: Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft, 2019.
- [5] Kleinertz, Britta et al.: Heat Dispatch Centre – Symbiosis of heat generation units to reach cost efficient low emission heat supply. In: Energy Procedia (2019). Munich: Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH
- [6] Auswertungstabellen zur Energiebilanz Deutschland - 1990 bis 2017. Berlin: Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V. (AGEB), 2018.
- [7] Fraunhofer ISI: Erstellung von Anwendungsbilanzen für die Jahre 2013 bis 2017 - Studie für die Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V. (AGEB). Karlsruhe: Fraunhofer ISI, 2018.
- [8] Blesl, Markus; Kessler, Alois: Energieeffizienz in der Industrie in: Springer Verlag. Berlin Heidelberg: Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER), Universität Stuttgart, EnBW Energie Baden-Württemberg AG, Forschung und Innovation, Karlsruhe, 2013.

Verantwortliche Autoren

Philipp Bartsch philipp.bartsch@dlr.de
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) Institut für Technische Thermodynamik,
Pfaffenwaldring 38-40, 70569 Stuttgart

Stefan Zunft stefan.zunft@dlr.de
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) Institut für Technische Thermodynamik,
Pfaffenwaldring 38-40, 70569 Stuttgart

3.1 Einleitung

Thermische Energiespeicher kommen als Querschnittstechnologie in einem sehr breiten Anwendungsfeld zum Einsatz. Im Niedertemperaturbereich dient Wasser als kostengünstiges und effektives Speichermedium zur Pufferspeicherung im Gebäudebereich und in Fernwärmenetzen.

Für Hochtemperatur-Wärmespeicher gibt es einige seit langem etablierte Industrieanwendungen, etwa zur Effizienzsteigerung in Prozessen der Glas- oder Stahlindustrie. In den vergangenen Jahren haben sich außerdem Flüssigsalzspeicher für solarthermische Kraftwerke kommerziell durchgesetzt.

Weiterer Bedarf ergibt sich im Hochtemperaturbereich zur Nutzung von Abwärmepotenzialen in den Prozessen energieintensiver Industriebranchen. Fällt die Abwärme mit zeitlichem Versatz oder fluktuierend an, so ist eine Vergleichmäßigung mittels Wärmespeichern die Voraussetzung für Effizienzsteigerungen und Kostensenkung durch Reintegration oder Verstromung der Wärme.

Weitergehende Beiträge zur CO₂-Einsparung werden in diesem Umfeld nur durch eine Dekarbonisierung von Industriewärme leistbar sein. Entsprechende Power-to-Heat-Technologien erfordern speichergestützte Lösungen beim zeitlichen Ausgleich von Prozesswärmebedarfen und fluktuierend anfallendem Strom.

Auch Lösungen zur Flexibilisierung der Strom- und Wärmeerzeugung hängen häufig von Speichertechnologien für Hochtemperaturwärme ab, so etwa die Betriebsflexibilisierung von GuD- und Kohlekraftwerken, oder die Kraft-Wärmekopplung.

Schließlich können thermische Energiespeicher auch als Multi-Funktionsspeicher in bestimmten Prozessen einen Mehrfachnutzen – z.B. zur Effizienzsteigerung und Netzstabilisierung – erfüllen. Daraus lassen sich mehrfache Erlöse generieren, die sich kostenseitig positiv auswirken

Im Vergleich zu anderen Energiespeichertechnologien (Stromspeichern) profitieren thermische Energiespeicher generell von niedrigen, kapazitätsbezogenen Investitionskosten. Grund dafür ist unter anderem die Verwendung kostengünstiger Speichermaterialien.

Prinzipiell sind beim Einsatz von Speichern kostenseitig einerseits die Investitions- und Betriebskosten der Speicher anzusetzen. Diesen Kosten müssen andererseits die jeweiligen Erlöse im Nutzerprozess gegenübergestellt werden. Die Kosteneffizienz gegenüber einer Referenztechnologie oder einem Betrieb der Prozesse ohne Speicher lässt sich demnach nur unter Berücksichtigung beider Seiten beziffern.

Mit Blick auf die Wirtschaftlichkeit spielt vor allem die erreichbare Zyklenzahl des Speichers eine große Rolle. Da der Speicher nur während der Be- und Entladephasen Erlöse erzielen kann, wirken sich niedrige Zyklenzahlen bzw. lange Speicherdauern grundsätzlich negativ auf die Wirtschaftlichkeit aus. Um rentabel zu sein, müssen Speicher mit niedrigen Zyklenzahlen (z.B. saisonale Speicher) somit entsprechend niedrigere spezifische Investitionskosten aufweisen.

Die erlösoptimierte Auslegung des Speichers muss entsprechend den prozessgegebenen Zielgrößen und Randbedingungen erfolgen. Hier sind zum einen leistungs- und kapazitätsbezogenen Zielgrößen zu nennen, zum anderen Randbedingungen wie die erforderliche Entladetemperatur oder die Reaktionszeit des Speichers. Somit ist die letztendliche Speicherlösung immer stark vom betrachteten Fall abhängig.

Für weiterführende Informationen zu thermischen Energiespeichern wird hier auf einschlägige Literatur verwiesen [1, 2].

3.2 Speichertechnologien

Im Vergleich zu Strom lässt sich Wärme verhältnismäßig einfach speichern. Gegenüber anderen Speichertechnologien sind vergleichsweise niedrige Kosten, eine große Robustheit, lange Lebensdauern und geringe Ressourcenansprüche zu verzeichnen. Prinzipiell lassen sich drei Prinzipien zur Speicherung von thermischer Energie unterscheiden: sensible, latente und thermochemische Speicher.

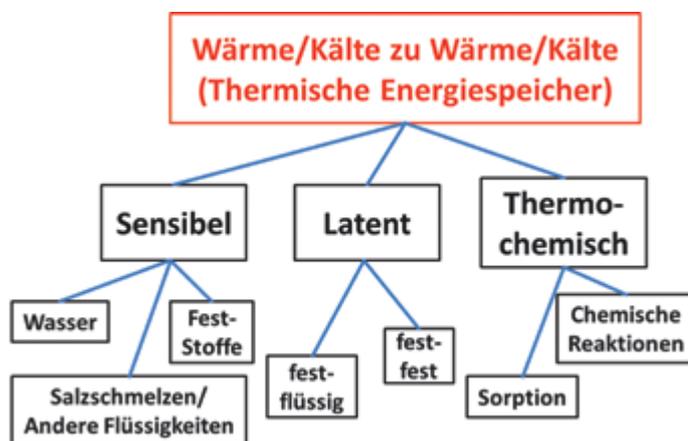


Abb. 3.1: Systematik Speichertechnologien

Im Fall **sensibler Speicherung** wird das Speichermedium erhitzt oder abgekühlt. Die gespeicherte Energiemenge hängt damit von der spezifischen Wärmekapazität des Speichermaterials, dessen Masse und der nutzbaren Temperaturänderung ab.

Als Speichermedien kommen Flüssigkeiten oder Feststoffe in Frage. Die Anwendungsbreite ist groß und reicht, abhängig vom benötigten Temperaturbereich, von der Brauchwasser- und Gebäudeheizung bis zur Kraftwerksanwendung mittels hochtemperatur-beständiger Flüssigkeiten oder Feststoffen im Gigawattstunden Maßstab.

Latentwärmespeicher nutzen den Enthalpieumsatz der Phasenänderung eines Speichermaterials. Meist handelt es sich dabei um den Übergang zwischen fester und flüssiger Phase. Damit kann eine große Energiemenge auf dem Temperaturniveau des Phasenwechsels zur Verfügung gestellt werden. Es werden verschiedene organische und anorganische Medien wie Paraffine, Salze oder

Metalle eingesetzt, die den Temperaturbereich von etwa -50 bis über 600 °C abdecken. Anwendung sind Kühl- und Pufferspeicher in Gebäudeanwendungen sowie Prozesswärme- und Kraftwerksanwendungen mit Dampf.

Thermochemische Speicher nutzen die Enthalpieänderung einer physikalischen Umwandlung (Sorption) oder einer reversiblen chemischen Reaktion zur Speicherung. Da die thermische Energie in chemischer Form gespeichert ist, bleibt diese verlustfrei über beliebige Zeiträume hinweg speicherbar. Gleichzeitig lassen sich mit diesem Speicherprinzip hohe Speicherdichten erreichen. Neben den teilweise noch komplexen Reaktoren stellt insbesondere die Bereitstellung des gasförmigen Reaktionspartners eine Herausforderung dar. Die Vorteile thermochemischer Speicher lassen sich insbesondere bei der Langzeitspeicherung unter Verwendung kostengünstiger Speichermaterialien und durch die Integration vorhandener Prozessgasströme schöpfen. Beispiele hierfür sind Trocknungsprozesse oder die saisonale Speicherung im Gebäudebereich. Darüber hinaus kann das Temperaturniveau bei der Umwandlung gezielt angehoben werden (Wärmetransformation), sodass eine Aufwertung von Niedertemperatur-Abwärme möglich wird. Daraus ergibt sich ein weiteres attraktives Anwendungsfeld für thermochemische Systeme.

Auf Grund der gekoppelten Vorgänge sind erreichbare Leistungs- bzw. Energiedichten von thermochemischen Speichern grundsätzlich stark von den gewählten Prozessbedingungen abhängig. Diese sollten daher mit angegeben werden. Insgesamt befinden sich die thermochemischen Technologien bis auf einzelne Ausnahmen noch in einem frühen, vorkommerziellen Entwicklungsstadium.

Ein Überblick der techno-ökonomischen Kenndaten der unterschiedlichen Wärmespeichertechnologien ist in Tabelle 3.1 dargestellt.

Tabelle 3.1: Techno-ökonomische Kenndaten unterschiedlicher Wärmespeichertechnologien (aus [2] und eigene Abschätzungen).

	Einheit	Feststoff-speicher	Flüssig-speicher	Latent-wärmespeicher	Thermochemischer Speicher
Betriebstemperatur	°C	300-1600	150-560	150-330	abh. vom Reaktionssystem
Spez. Energiedichte (abh. vom Anwenderprozess)	kWh _{th} /t	50-100	40-100	~ 50	100-400
	kWh _{th} /m ³	70-150	75-200	~ 100	100-400
Spez. Leistungsdichte	kW/m ³	20-400	Abh. vom Wärmeübertrager	15-80	abh. vom Reaktionssystem
Typ. realisierbare Speichergröße	MWh _{th}	1-1000	500-5000	0.1-500	abh. vom Reaktionssystem
Speicherwirkungsgrad	%	98	50-90	98	60-95
Verluste (% der Kapazität pro Tag)	%/d	2-4	1-5	0,5-2,5	0
Speicherdauer	Stunden bis Tage	Stunden bis Tage	Stunden bis Tage	Stunden bis Monate	unbegrenzt
Reaktionszeit	Minuten	Minuten	Minuten	Minuten	Minuten
Lebensdauer	Zyklen	>10000	100-10000	>10000	abh. vom Reaktionssystem
Lebensdauer	a	> 20	> 20	> 20	-
Investition	€/kWh	15-40	25-75	40-80	-

3.3 Elektrisch beheizte Speicher

Eine grundlegende Möglichkeit, um mit thermischen Speichern elektrische Flexibilität bereitzustellen zu können besteht darin, den Speicher elektrisch zu beladen. Der Speicher kann dann zeitlich flexibel beladen werden und bildet somit eine schaltbare Last für das Stromnetz. Die gespeicherte Wärme kann anschließend an einen Prozess abgegeben werden. Voraussetzung dafür ist, dass im Prozess eine entsprechende Wärmesenke existiert, die durch den Speicher bedient werden kann.

Zu elektrischen Beheizung des Speichers stehen unterschiedliche elektrothermische Verfahren zur Verfügung [3]. Zur Beheizung thermischer Speicher bieten sich vor allem zwei technologische Ansät-

ze an: Induktive und konduktive Verfahren, wobei letztere noch in indirekte und direkte Verfahren unterschieden werden können [4, 5, 6].

Induktive Verfahren erfordern ein elektrisch leitfähiges und idealerweise magnetisierbares Speichermedium. Durch Erzeugung eines oszillierenden Magnetfeldes werden im Speichermedium elektrische Ströme induziert, welche zur ohmschen Erwärmung des Speichermediums führen. Die Erwärmung findet somit direkt im Speichermedium statt. Vorteilhaft bei dieser Technologie sind die berührungslose Übertragung der Energie sowie hohe erreichbare Leistungen [7]. Viele Materialien verlieren jedoch oberhalb einer charakteristischen Temperatur (Curie-Temperatur) ihre magnetischen Eigenschaften. Eine Erwärmung über diese Temperatur hinaus ist zwar möglich, wird jedoch zunehmend ineffizient. Bei eisenhaltigen Werkstoffen liegt die Curie-Temperatur meist im Bereich von 600-768 °C.

Bei direkten, konduktiven Verfahren wird ebenfalls das Speichermedium elektrisch durchströmt. Es werden dazu elektrische Kontakte am Speichermedium angebracht und der Stromfluss durch eine elektrische Potenzialdifferenz zwischen den Kontakten erreicht. Eine Beschränkung durch die Curie-Temperatur entfällt somit, sodass prinzipiell höhere Temperaturen bei gleichzeitig hoher elektrothermischer Effizienz erreichbar sind als mit induktiven Verfahren. Herausforderungen bei dieser Technologie bestehen in der elektrischen Kontaktierung des Speichermediums für entsprechende Temperatur- und Leistungsbereiche, in der Handhabung der benötigten Stromstärken und in der Auswahl geeigneter Werkstoffe sowie deren geometrischen Struktur.

Bei indirekten, konduktiven Verfahren wird eine elektrisch leitende Struktur in den Speicher eingebracht, welche elektrisch durchströmt und erwärmt wird. Von dieser Struktur aus, wird die thermische Energie dann auf das restliche Speicherinventar übertragen. Das Inventarmedium kann somit aus elektrisch nicht leitfähigem und potenziell kostengünstigem Material bestehen. Insbesondere bei festen Inventarmedien bestehen die Herausforderungen bei diesem Ansatz in der thermischen Kontaktierung zwischen der Heizstruktur und dem Inventarmedium sowie in der übertragbaren Wärmeleistung.

3.4 Thermische Energiespeicher in der Elektrostahlerzeugung

Zur Effizienzsteigerung oder Prozessverbesserung bestehen thermische Speicher in der Stahlerzeugung bereits in unterschiedlicher Form. Beispiele sind der Cowper-Speicher im Hochofenprozess, thermo-chemische Stoffspeicher von Zwischenprodukten (z.B. Sinter) oder sensible Wärmespeicherung im Niedertemperaturbereich in Heiß- oder Kühlwasserkreisläufen. Hier soll dagegen untersucht werden, wie mit Hilfe thermischer Speicher ein flexiblierter Strombezug erreicht werden kann. Die Betrachtung beschränkt sich dabei weitestgehend auf die Elektrostahlerzeugung.

Im ersten Teil dieses Forschungsberichtes [8] wurde der (Elektro-) Stahlherstellungsprozess bereits beschrieben (siehe Abschnitt 2.4 und Abbildung 2.5 in [8]). Die wesentlichen Prozessschritte sind das Schmelzen des Schrotts im Elektrolichtbogenofen (EAF), metallurgische Prozessschritte im Pfannenofen und der Strang- bzw. Blockguss. Als weiterer Prozessschritt wird hier auch das Walzwerk mitbetrachtet, wo das Halbzeug (sog. Knüppel bzw. Brammen) weiterverarbeitet wird.

Entlang dieser Prozesskette ergeben sich im Wesentlichen drei größere Energieverbraucher bzw. Wärmesenken: Der EAF, die Pfannenöfen und im Warmwalzwerk ein Ofen zur Erwärmung der Knüppel vor dem Walzprozess.

Im Rahmen des Projekts wurde bewertet, inwieweit in den einzelnen Prozessschritten ein (teilweiser) Eintrag der erforderlichen Wärme aus thermischen Energiespeichern möglich ist. Da die Wärmezufuhr in den Pfannenöfen einem durch die metallurgischen Prozessschritte exakt vorgegebenen Profil folgen muss, und Abweichungen die Produktqualität stark beeinflussen würden, wurden diese Öfen als potenzieller Ansatzpunkt für eine Speicherintegration ausgeschlossen. Somit wurden die Betrachtungen auf den EAF und das Warmwalzwerk konzentriert.

Am **Elektrolichtbogenofen** erfolgt der Wärmeeintrag zum größten Teil auf elektrischem Weg. Ein geringer Anteil wird jedoch auch durch Gas-Sauerstoffbrenner zugeführt. Diese Brenner sorgen nicht nur für eine zusätzliche Wärmezufuhr sondern durch Impulseintrag auch für eine Durchmischung der Schmelze. Es wurde untersucht, ob sich die Funktion der Brenner auch durch einen Heißluftstrom bewerkstelligen lässt, welcher in einem elektrisch beheizten Speicher erwärmt werden könnte. Jedoch bilden die Abgase der Brenner mit der Schmelze im Ofen ein eng abgestimmtes Reaktionssystem, weshalb eine Substitution durch Heißluft nicht möglich ist. Auch können die bei einer Sauerstoffverbrennung erreichbaren Temperaturen aus einem thermischen Speicher nicht mit vertretbarem Aufwand zur Verfügung gestellt werden.

Ein weiterer Ansatzpunkt für eine Speicherintegration am EAF ist eine Vorwärmung des Schmelzgutes (Schrott) mit Hilfe eines elektrisch beheizten Speichers. Diese Möglichkeit wäre technisch zwar prinzipiell machbar, jedoch für Bestandsanlagen nicht nachrüstbar. Öfen mit Schrottvorwärmung sind bereits kommerziell verfügbar, nutzen für diesen Zweck jedoch das ohnehin anfallende Ofenabgas. Anlagen dieses Typs unterscheiden sich in ihrem Aufbau grundsätzlich von Anlagen ohne Vorwärmung, was beispielsweise auch erweiterte Maßnahmen zur Regulierung der Schadstoffemissionen (z.B. Dioxinbildung) beinhaltet.

Zusammenfassend kann somit am EAF derzeit kein Potenzial für die Integration eines thermischen Speichers zur Flexibilisierung des Strombezugs festgestellt werden.

Im **Warmwalzwerk** müssen meist erhebliche Mengen an Energie aufgewendet werden, um den zu walzenden Rohstahl auf die Verarbeitungstemperatur zu erwärmen. Grund dafür ist, dass Stranggussanlage und Walzwerk sich häufig nicht am gleichen Standort befinden, sodass die Brammen zwischen den beiden Bearbeitungsschritten auskühlen. Der Ofen zur Erwärmung der Brammen wird mit Gas betrieben und erwärmt die Brammen auf ca. 1250 °C. Die heißen Ofenabgase (≈ 900 °C) werden dazu genutzt, die Verbrennungsluft der Ofenbrenner mittels eines Rekuperators auf etwa 500 °C vorzuwärmen. Die Vorwärmtemperatur ist durch das Wärmekapazitätsstromverhältnis der beteiligten Wärmeträgermedien im Rekuperator limitiert. Höhere Temperaturen wären bei Verwendung von Regeneratoren möglich. Ein solcher Regenerator könnte prinzipiell durch elektrothermische Verfahren auf Temperaturen oberhalb von 500 °C erwärmt werden und anschließend eine weitere Erwärmung der Verbrennungsluft ermöglichen.

Bei einem solchen Konzept werden allerdings größere Umrüstungen und Investitionen an der Anlage notwendig, um die erhöhten Vorwärmtemperaturen aus materialtechnischer Sicht (z.B. Rohrleitungen) realisieren zu können. Des Weiteren würde ein entsprechender Speicher aufgrund der verhältnismäßig geringen Temperaturspreizung¹ im Speicher eine vergleichsweise geringe Energiedichte aufweisen, was zu hohen spezifischen Investitionskosten für den Speicher führt. Des Weiteren wäre bei Verwendung eines Regenerators anstelle einer elektrothermischen Beladung des Speichers auch eine direkte Beladung mit dem ohnehin zur Verfügung stehenden Ofenabgas möglich.

Aus den genannten Überlegungen heraus wird daher auch im Walzwerk derzeit kein sinnvoller Ansatzpunkt für die Integration eines (elektrisch beheizten) Speichers gesehen. Somit wird zusammenfassend festgestellt, dass derzeit keine vielversprechenden Möglichkeiten für einen flexiblen Strombezug mit Hilfe thermischer Speicher im (Elektro-)Stahlprozess gesehen werden. Es kann daher an dieser Stelle keine Flexibilisierungsperspektive ausgewiesen werden.

Neben der hier betrachteten Elektrostahlroute besteht als weiteres Verfahren die Eisenerzeugung im Hochofenprozess aus Eisenerz. Fester Bestandteil dieses Verfahrens sind bereits seit langer Zeit Regeneratorspeicher, sogenannte Winderhitzer oder Cowper-Speicher, welche der Vorwärmung der Frischluft am Hochofen dienen. Die thermische Beladung dieser Winderhitzer erfolgt mit heißem Abgas, welches durch die Verbrennung von Gichtgasen, gegebenenfalls angereichert mit Erdgas, erzeugt wird.

¹ Der Speicher würde elektrothermisch auf eine Temperatur von $T_H > 500$ °C erwärmt werden und würde mit dem vom Rekuperator kommenden Luftmassenstrom bei $T \approx 500$ °C entladen werden. Das nutzbare Temperaturgefälle ist somit aufgrund der hohen Entladetemperatur verhältnismäßig niedrig.

Eine prinzipielle Möglichkeit zur Integration eines thermischen Speichers könnte hier in der Vorwärmung des Brenngasgemisches durch einen elektrisch beheizten Speicher liegen. Dadurch könnte möglicherweise der Brenngaseinsatz reduziert werden. Sinnvoll erscheint dieser Ansatz in erster Linie dann, wenn dadurch der Einsatz von hochwertigem Erdgas reduziert werden kann, da die Gichtgase im Hochofenprozess ohnehin anfallen und meist alternative Verwendungsmöglichkeiten fehlen. Da der Fokus in diesem Projekt auf der Elektrostahlroute liegt, wurde diese Option zur Speicherintegration jedoch nicht näher untersucht.

3.5 Thermische Energiespeicher in der Glasherstellung

Der Glasherstellungsprozess ist in Abb. 9.1 und Abb. 9.2 in Kapitel 9 dargestellt. Etwa 85 % der eingetragenen Wärmemenge entfallen bei der im Projekt betrachteten Beispielanlage (Floatglasherstellung) auf das Glasschmelzaggregat. Weitere 10 % des Wärmeeintrags entfallen auf das formgebende Zinnbad. In der anschließenden Kühlstrecke wird zur Einhaltung der erforderlichen Abkühlprofile ebenfalls teilweise Wärme zugeführt, allerdings nur in vergleichsweise geringem Umfang ($\approx 3\%$ des Gesamtbedarfs).

Im Rahmen des Projektes wurde untersucht, in welchem Umfang der Wärmeeintrag an den beschriebenen drei Stellen (Abkühlstrecke, Zinnbad, Schmelzaggregat) durch den Einsatz (elektrisch beheizter) thermischer Speicher flexibilisiert werden kann. Darin implizit enthalten ist die Fragestellung, an welchen Stellen die Wärme dem Prozess durch einen Heißgasstrom zugeführt werden kann.

In der **Abkühlstrecke (Kühlofen)** erfolgt die Beheizung mit dem Ziel, eine gleichmäßige und kontrollierte Abkühlung des Produktes zu erreichen, um die bei der Herstellung entstandenen mechanischen Spannungen im Produkt abzubauen. Im Fall des betrachteten Flachglasprozesses bedeutet dies u.a., dass über der gesamten Breite des Glasbandes die Temperaturunterschiede nur $\pm 1\text{ °C}$ betragen dürfen. Abhängig von der (gemessenen) Temperaturverteilung im Band, wird dementsprechend lokal beheizt oder gekühlt. Da das Band an den Rändern mehr Wärme verliert, als im Zentrum, wird häufig an den Rändern des Bandes Wärme zugeführt, während im Zentrum gekühlt wird. Der Wärmeeintrag erfolgt elektrisch durch Strahlung und an den Rändern auch mit Gasbrennern, wobei sich die Glastemperatur zwischen 100 °C und 500 °C bewegt.

Bei einer Umstellung auf eine Beheizung durch Heißluft werden die Einhaltung des präzisen Temperaturprofils und die damit verbundene präzise Steuerung der lokalen Beheizung als schwer realisierbar eingeschätzt. Auch bleibt unklar, ob die erforderlichen Wärmestromdichten durch eine konvektive Beheizung überhaupt erreicht werden können. Unter diesen Aspekten erscheint in der Kühlstrecke eine Beheizung durch Heißluft aus einem elektrisch beheizten Speicher nicht als vielversprechend.

Ähnlich stellt sich die Situation im **Zinnbad (Floatbad)** dar. Auch dort erfolgt der Wärmeeintrag derzeit durch elektrisch beheizte Strahler. Das Temperaturniveau im Glas beträgt zwischen 1100 °C und 600 °C . Die Beheizung findet unter Schutzgasatmosphäre statt, um Oxidationsprozesse mit dem Zinn zu unterbinden. Gleichzeitig dient der Schutzgasstrom zur Kühlung der hinter den Strahlern liegenden, tragenden Strukturen. Für eine Umstellung der Beheizung auf Heißgas ergeben sich daraus die folgenden technischen Hemmnisse:

Auch im Zinnbad muss die Wärme lokal begrenzt und mit hoher Wärmestromdichte eingebracht werden, was wie auch bei der Kühlstrecke durch einen rein konvektiven Wärmeübergang schwer zu erreichen ist. Des Weiteren ist die elektrische Beladung eines thermischen Speichers auf Temperaturen über 1100 °C im großtechnischen Maßstab heute nur mit hohem technischen Aufwand und geringer Effizienz zu erreichen. In jedem Fall wären tiefgreifende Änderungen an der Floatkammer nötig. Beispielsweise würde die oben erwähnte Kühlung bestimmter Strukturen durch das Schutzgas entfallen, wenn dieses selbst erhitzt und für den Wärmeeintrag genutzt würde. Unter diesen Aspekten erscheint auch in der Floatkammer eine Speicherintegration derzeit als nicht sinnvoll.

Das **Schmelzaggregat** ist der mit Abstand größte Energieverbraucher in der Glasproduktion. Eine ausführliche Beschreibung des Schmelzaggregates wurde bereits im ersten Teil dieses Forschungsberichtes [8] gegeben. Der Wärmeeintrag erfolgt hauptsächlich durch Strahlung aus einer Gasflamme oberhalb der Schmelze sowie teilweise durch elektrische Zusatzheizungen (EZH) (in der Schmelze). Auch vollelektrische Schmelzwannen existieren und werden in Zukunft voraussichtlich an Bedeutung gewinnen.

Der Schmelzprozess ist sehr komplex und wird vor allem durch das Strömungsverhalten, die Chemie und die optischen Eigenschaften der Schmelze beeinflusst. Aus diesem Grund und wegen der sehr hohen Prozesstemperaturen (über 1400 °C in der Schmelze und ca. 1600 °C im Gasraum darüber) ist ein konvektiver Wärmeeintrag durch elektrisch erwärmte Heißluft nicht umsetzbar. Jedoch lässt sich der für den Schmelzprozess benötigte Brennstoffverbrauch durch Vorwärmung der Verbrennungsluft und des Schmelzgutes (Gemenge) reduzieren. Entsprechende Maßnahmen zur Effizienzsteigerung kommen zum Teil bereits seit 150 Jahren im Glasherstellungsprozess zum Einsatz. Prinzipiell bietet sich hier auch die Möglichkeit, die für die Vorwärmung benötigte Energie aus einem (elektrisch beheizten) thermischen Speicher zur Verfügung zu stellen. Zur Bewertung der daraus resultierenden Optionen, wurde ein separates Expertengespräch zum Glasschmelzaggregat geführt.

3.5.1 Verbrennungsluftvorwärmung mit Hilfe eines elektrisch beheizten Speichers

Die Vorwärmung der Verbrennungsluft mit Hilfe eines Regenerators ist für Glasschmelzaggregate bereits seit langem Stand der Technik. Die heißen Abgase werden aus dem Ofen abgezogen und erwärmen ein keramisches Speichermaterial und werden selbst dabei auf Temperaturen von etwa 450-550 °C abgekühlt. Der Vorgang dauert etwa 20 Minuten. Danach wird in entgegengesetzter Richtung die Verbrennungsluft durch den Speicher geleitet und von Umgebungstemperatur auf etwa 1250 °C erwärmt. Um einen kontinuierlichen Betrieb der Schmelzwanne zu gewährleisten, werden immer zwei Regeneratoren im Wechsel betrieben.

Im Rahmen des Projekts wurde untersucht, inwiefern dem Regenerator eine weitere Vorwärmstufe (elektrothermisch beheizt) vorgelagert und damit eine zusätzliche Brennstoffersparnis erreicht werden kann. Das bedeutet, dass die Luft dann bereits angewärmt (z.B. auf 120 °C) in den Regenerator eintritt. Die entscheidende Frage bei diesem Ansatz ist, inwiefern die Erhöhung der Luft Eintrittstemperatur ($T_{L,in}$) auch zu einer Erhöhung der heißseitigen Vorwärmtemperatur (Luftaustrittstemperatur, $T_{L,out}$) und damit zu einer Erhöhung der Flammentemperatur führt.

Die Untersuchung wurde mit Hilfe eines vereinfachten 1D-Modells des Regenerators (keine Berücksichtigung von Wärmeverlusten, axialer Wärmeleitung etc.) durchgeführt.

Es zeigt sich, dass bei einer Erhöhung von $T_{L,in}$ um 100 °C die Vorwärmtemperatur um weniger als 10 °C erhöht. Die resultierende Brennstoffersparnis ist deutlich geringer als 1 %. Eine zusätzliche Vorwärmung der Verbrennungsluft erweist sich daher als nicht zielführend.

3.5.2 Gemengevorwärmung mit Hilfe eines elektrisch beheizten Speichers

Auch eine Vorwärmung des Gemenges vor Eintritt in das Schmelzaggregat ist bereits Stand der Technik. Erste Untersuchungen dazu wurden bereits Anfang 1980 durchgeführt [9]. In diesem Fall wird für die Vorwärmung der vom Schmelzofen kommende Abgasstrom verwendet. Im Vorwärmer bewegt sich das Gemenge als dichte Schüttung langsam in vertikale Richtung. Das Abgas wird im Kreuzgegenstrom durch die Schüttung geleitet und erwärmt dabei das Gemenge.

Zu berücksichtigen ist dabei, dass nicht alle Gemengearten gleichermaßen für eine Vorwärmung geeignet sind, da sich u.U. Bindephasen bilden können, die die Fließfähigkeit des Gemenges verschlechtern. Unproblematisch sind in der Regel Gemenge mit einem hohen Scherbenanteil.

Zur Gemengevorwärmung kann anstelle von Abgas auch problemlos Heißluft verwendet werden, welche in einem elektrisch beheizten Speicher erwärmt wird. Diese Option ist auch vor dem Hinter-

grund interessant, dass bei vollelektrischen Glaswannen, die in Zukunft voraussichtlich an Bedeutung gewinnen werden, kein nutzbarer Abgasstrom für diesen Zweck zur Verfügung steht.

Abbildung 3.2 zeigt ein Schaltbild zur Integration eines thermischen Energiespeichers (TES) mit elektrischer Beheizung zum Zweck der Gemengevorwärmung in den Glasherstellungsprozess. Um Abwärmeverluste zu minimieren, wird ein Teil der Abluft aus dem Vorwärmer wieder durch den Speicher geführt. Der andere Teil wird über einen Bypass dem Heißluftstrom am Speicheraustritt zugemischt, um die erforderliche Eintrittstemperatur am Vorwärmer bereitstellen zu können. Dabei ist zu berücksichtigen, dass sich während des Entladevorgangs die Speicheraustrittstemperatur und somit auch das Mischungsverhältnis der beiden Luftmassenströme ändern.

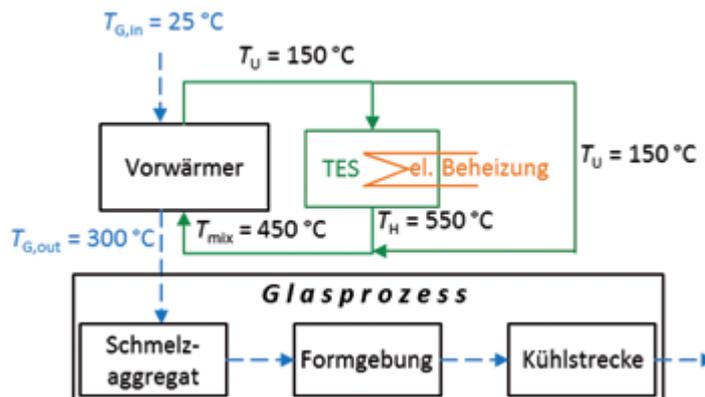


Abb. 3.2: Wärmetechnische Verschaltung zwischen Gemengevorwärmer und thermischem Energiespeicher (TES) mit Bypass zur Erreichung der gewünschten Mischtemperatur T_{mix} am Vorwärmereintritt.

Mit Hilfe eines vereinfachten 1D-Modells (keine Berücksichtigung von Wärmeverlusten, axialer Wärmeleitung etc.) wurde eine überschlägige Auslegung des in Abbildung 3.2 dargestellten thermischen Speichers durchgeführt. Die für die Berechnung verwendeten Parameter sind in Tabelle 3.2 dargestellt.

Zur Definition der angestrebten Entladedauer wurde das Anforderungsprofil 2 – wie im ersten Teil dieses Forschungsberichtes [8] definiert – herangezogen und entsprechend eine Entladedauer von drei und zwölf Stunden (τ_1 und τ_2) zu Grunde gelegt. Wie in Abschnitt 3.2 erläutert, geben diese Entladedauern noch keine Auskunft über eine wirtschaftlich optimierte Speicherdimensionierung. Bei einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung muss außerdem berücksichtigt werden, dass der Vorwärmer auch bei entlademem Speicher weiter beheizt werden muss. Dies beinhaltet vor allem das Design und die Auslegung der elektrischen Speicherbeheizung, was über den Rahmen dieses Projekts jedoch hinausgeht.

Tabelle 3.2: Parameter zur überschlägigen Speicherauslegung entsprechend Abbildung 3.2.

Bezeichnung	Größe	Einheit	Betrag
Austrittstemperatur Luft Vorwärmer/Eintrittstemperatur Speicher ¹	T_U	°C	150
max. Temperatur im Speicher	T_H	°C	550
Eintrittstemperatur Vorwärmer ²	T_{mix}	°C	450
Eintrittstemperatur Gemenge am Vorwärmer	$T_{G,\text{in}}$	°C	25
Austrittstemperatur Gemenge am Vorwärmer ³	$T_{G,\text{out}}$	°C	300
Entladedauer (1) ⁴	τ_1	h	3
Entladedauer (2) ⁵	τ_2	h	12
Gemengemassenstrom ⁵	M_G	kg/s	3,17
Verhältnis zwischen Speicherhöhe und Speicherdurchmesser	H/D	-	3

¹ Bei einer detaillierten Auslegung ist T_U entsprechend einer wirtschaftlichen Apparategröße zu optimieren.

² Typische Rauchgastemperatur in konventionellen Schmelzaggregate.

³ Die maximale Vorwärmtemperatur wird durch die zu vermeidende Erweichung des Gemenges begrenzt.

⁴ Entspricht Anforderungsprofil 2 im ersten Teil dieses Forschungsberichtes („Lastverschiebung über 3-12 Stunden“), wobei ggf. auch kurzfristige Anpassung entsprechend Anforderungsprofil 1 möglich sind. Unter dem Aspekt der Wirtschaftlichkeit muss die Entladedauer auf die statistischen Schwankungen des Strompreises hin optimiert werden.

⁵ Typische Schmelzleistung (geschmolzenes Glas) einer Behälterglasanlage: $\dot{M}_{\text{melt}} = 240 \text{ t/d}$ [3]. Entspricht einem Gemengemassenstrom von $M_G = 1,14 \cdot \text{melt} = 3,17 \text{ kg/s}$.

Tabelle 3.3 zeigt die Ergebnisse der Speicherauslegung für die beiden genannten Entladedauern. Die Flexibilisierungsperspektive hängt von der Dimensionierung der elektrischen Beheizung ab. Unter der Annahme, dass diese um 100 % überbaut wird – d.h. dass die Heizung den momentanen Wärmebedarf decken und gleichzeitig mit gleicher Leistung den Speicher beladen kann – ist die Entladedauer gleich der Beladedauer. Die Flexibilisierungsperspektive bei vollständig be-/entladene Speicher beträgt dann $\pm 0,6$ MW über drei bzw. zwölf Stunden. Unter Annahme eines zur Hälfte beladenen Speichers als Ausgangszustand halbiert sich die Be-/Entladedauer entsprechend. Die Daten beziehen sich auf eine Schmelzwanne von statistisch, mittlerer Größe⁶ in der Behälterglasindustrie [10].

Bezogen auf die gesamt in Deutschland installierte Kapazität an Schmelzanlagen in der Behälterglasindustrie (4 Mio. t/a (2015) [11], verkaufsfähiges Glas) ergibt sich eine Flexibilisierungsperspektive von $\pm 32,3$ MW. Die Gemenge in der Flachglasherstellung (2,2 Mio. t/a (2015) [11], verkaufsfähiges Glas) sind aufgrund des geringeren Scherbenanteils grundsätzlich weniger für eine Vorwärmung geeignet und werden deshalb an dieser Stelle nicht mitbetrachtet.

Es ist zu berücksichtigen, dass die umsetzbare elektro-thermische Beladeleistung am Speicher grundsätzlich von der verfügbaren stromnetzseitigen Infrastruktur abhängt. Sind die entsprechenden Voraussetzungen gegeben, können technisch auch deutlich höhere Beladeleistungen realisiert werden, was zu einer entsprechend größeren (negativen) Flexibilisierungsperspektive führt (bei entsprechend verkürzter Beladedauer).

Tabelle 3.3: Ergebnis der Speicherauslegung entsprechend der Parameter in Tabelle 3.2.

Bezeichnung	Größe	Einheit	τ_1	τ_2
Kapazität	Q	MWh	1,8	7,4
Speichermaterial	–	–	Wabenkörper	Wabenkörper ²
Speichermasse	M_s	t	20	73
Speichervolumen	V_s	m ³	21	76
Speicherdurchmesser	D	m	2,1	3,2
Speicherhöhe	H	m	6,2	9,5

3.6 Thermische Energiespeicher im Klinker-Prozess der Zementindustrie

Im ersten Teil dieses Forschungsberichtes [8] wurde der Zementprozess bereits ausführlich beschrieben (Abbildung 4.1 in [8]). Gegenstand dieser Betrachtung ist der thermische Teil des Prozesses (Brennprozess) bestehend aus Rohmehlvorwärmung, (Vor-)Kalzinierer, Drehrohrofen und Klinkerkühler. Zentraler Bestandteil des Rohmehls ist Kalkstein (CaCO_3), welches im Kalzinierer und im Drehrohrofen zu (gebranntem) Kalk (CaO) umgewandelt. Das Brennen des Zementklinkers findet anschließend im heißesten Teil des Drehrohrofens statt. Der Gesamtwärmeeintrag von ca. 3500 kJ/kg Klinker [12, 13] wird zu 35-40 % am Hauptbrenner und zu 60-65 % im Kalzinierer zugeführt [14, 15].

Im Rahmen des Projekts wurde bewertet, inwiefern der Wärmeeintrag in Vorwärmer, Kalzinierer und Hauptbrenner die Integration thermischer Energiespeicher für einen flexiblen Strombezug zulässt. Dies beinhaltet die Frage, inwiefern der Einsatz von (fossilen) Brennstoffen durch elektrothermische Verfahren substituiert werden kann. Mögliche Verfahren für eine solche strombasierten Klinkerzeugung sowie mögliche Hemmnisse für deren Umsetzung wurden bereits in einer Studie von Ruppert et al. [15] dargestellt.

Demnach ist sowohl am Hauptbrenner als auch am Kalzinierer eine elektrothermische Beheizung prinzipiell möglich. Alle Ansätze befinden sich jedoch in einem frühen Forschungsstadium und eine mögliche Umsetzung wird für nach 2030 erwartet.

² Für diese relativ kleinen Speicherkapazitäten wurde ein Inventarmaterial (Wabenkörper) mit hoher spezifischer Oberfläche ($a_v = 270 \text{ m}^2/\text{m}^3$) und Porosität ($\epsilon = 60 \%$) gewählt, um eine bessere Speicherausnutzung zu erreichen.

Unter der Voraussetzung, dass es zur Realisierung eines elektrothermisch beheizten Kalzinierers kommt, besteht die Möglichkeit, das erzeugte Kalziumoxid (CaO) als thermochemisches Speichermedium zu verwenden. Dieses könnte in einem (Material-)Speicher vorgehalten und nach Bedarf dem Brennprozess zugeführt werden. Damit wäre eine flexible Fahrweise des Kalzinierers und somit ein flexibler Strombezug prinzipiell möglich.

Technische Hemmnisse für dieses Konzept sind zum einen die Realisierung der elektrothermischen Beheizung des Kalzinierers. Hier wird bei einer externen Beheizung vor allem die Effizienz der Wärmeübertragung als Herausforderung gesehen [16], sowie die Materialstandzeiten der Wärmeübertragenden Oberflächen unter den harschen Prozessbedingungen im Kalzinierer.

Zum anderen bestehen derzeit noch keine Erfahrungswerte hinsichtlich der Lagerfähigkeit von Kalziumoxid bei hohen Temperaturen. Beispielsweise liegen keine Kenntnisse zu möglichen unerwünschten chemischen Nebenreaktionen während der Lagerung vor, welche die Produktqualität beeinflussen würden. Auch können keine Aussagen hinsichtlich der Transportfähigkeit des Materials beim Speicheraustrag getroffen werden.

Aufgrund des frühen Entwicklungsstandes der beteiligten Technologien und der Unsicherheiten einer möglichen Umsetzbarkeit wird hier keine Flexibilitätsperspektive für eine solche thermochemische Wärmespeicherung ausgewiesen.

Für andere Speichertechnologien, wie elektrothermisch beheizte Feststoffspeicher, ergeben sich im Zementprozess aufgrund der hohen Prozesstemperaturen und der großen zur Verfügung stehenden Abwärmemengen keine Ansatzpunkte.

3.7 Thermische Energiespeicher zur Flexibilisierung der Stromerzeugung in Dampfnetzen

Abbildung 3.3 zeigt eine allgemeine Darstellung eines Dampfnetzes mit der entsprechenden Erzeugungsstruktur.

Der Dampf wird auf hohem Druckniveau (HD) durch einen Abhitzedampferzeuger (AHDE) bereitgestellt, welcher durch eine Gasturbine bedient wird. Um eine flexible Fahrweise der Gasturbine zu gewährleisten, kann alternativ auch Dampf aus einem Zusatzkessel (GK), bereitgestellt werden. Der HD-Dampf wird dann in einer Dampfturbine auf ein niedrigeres Druckniveau (ND) entspannt, und damit das Dampfnetz bedient. In einem Dampfnetz sind meistens mehrere der genannten Kompo-

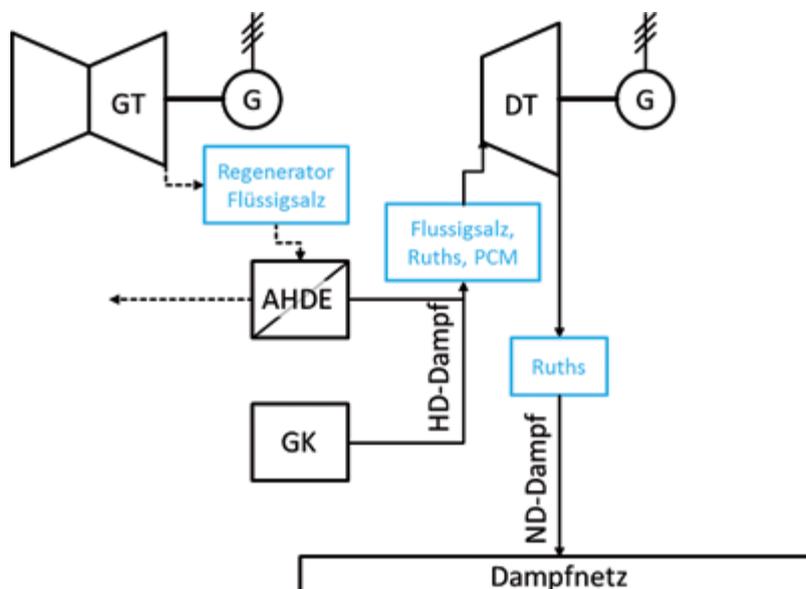


Abb. 3.3: Prozessskizze der Erzeugungsstruktur für ein Dampfnetz. Farbig eingefügt sind prinzipielle Optionen für die Integration thermischer Speicher sowie die in Frage kommenden Speichertechnologien.

nenten (Gas-, Dampfturbine, Abhitzedampferzeuger etc.) verschaltet. Im nachfolgenden Abschnitt wird jedoch stets der Singular der entsprechenden Komponente verwendet.

Zusätzlich zu der konventionellen Erzeugerstruktur sind in Abbildung 3.3 drei prinzipielle Möglichkeiten für die Integration eines thermischen Speichers abgebildet:

- Im Rauchgasstrang der Gasturbine.
- Im Hochdruckteil des Dampfnetzes.
- Im Niederdruckteil des Dampfnetzes.

Speicher im Rauchgaspfad der Gasturbine: Bei dieser Variante erfolgt die Beladung des thermischen Energiespeichers (TES) mit dem heißen Abgas der Gasturbine. Diese kann somit unabhängig vom Dampfbedarf flexibel betrieben werden. Die Entladung des Speichers erfolgt mit Umgebungsluft. Grundvoraussetzung für die Speicherintegration ist eine Überbauung der Gasturbine, d.h. dass die Gasturbinenleistung ausreicht um den momentanen Dampfbedarf zu decken und gleichzeitig den Speicher zu beladen. Je größer die Überbauung der Gasturbine, desto größer ist die erreichbare Flexibilität und die Rentabilität des Speichers.

Diese Speicheroption hat generell den Vorteil, dass der TES eine große Temperaturspreizung und damit auch eine hohe Energiedichte aufweist. Prinzipiell ist hier entweder ein Flüssigsalzspeicher oder ein Feststoff-Regeneratorspeicher denkbar.

Der Regenerator erscheint besonders geeignet, da er aufgrund seiner hohen spezifischen Oberfläche besonders für die Be- und Entladung mit einem gasförmigen Wärmeträgermedium geeignet ist. Bei der Entladung kann für die Dampferzeugung der bereits existierende Abhitzedampferzeuger genutzt werden.

Bei der Verwendung von Flüssigsalz ist prinzipiell ein zusätzlicher Wärmeübertrager notwendig, um die Wärme zwischen dem gasförmigen Medium (GT-Abgas, Luft) und dem Salz zu übertragen. Aufgrund der verhältnismäßig niedrigen Wärmeübergangskoeffizienten auf der Gasseite, werden dafür vergleichsweise große wärmeübertragende Oberflächen und Apparatedimensionen benötigt, was zu erhöhten Investitionen führt.

Speicher im Hoch- und Niederdruckteil des Dampfnetzes: Die zweite Option besteht in einer Beladung des TES mit HD- (ND-) Dampf aus dem Dampfnetz. Zur Entladung des Speichers kann entweder Kondensat oder ND-Dampf verwendet werden. Somit entspricht ein solcher Speicher einer zusätzlichen, flexiblen Dampfsenke-/quelle welche wiederum eine flexible Fahrweise der Gasturbine ermöglicht. Als Speichertechnologien sind zu diesem Zweck entweder sogenannte Ruths-Speicher oder Salzspeicher möglich.

Ein Ruths-Speicher ist ein Druckbehälter, der als Dampfspeicher dient. Diese Speicher sind jedoch nur zu Speicherung kleiner Dampfmengen geeignet, da die hohen Behälterinnendrucke das Behältervolumen begrenzen. Des Weiteren kann ein Ruths-Speicher lediglich Sattedampf liefern, was eine anschließende Verstromung in einer Dampfturbine erschwert. Aus diesen Gründen ist ein Ruths-Speicher am ehesten im Niederdruckteil des Dampfnetzes einsetzbar.

Salzspeicher können im Gegensatz zum Ruths-Speicher sehr große Energiemengen aufnehmen und beim Entladen auch überhitzten Dampf bereitstellen. Um eine hohe Speichereffizienz zu erreichen, ist eine Kombination eines sensiblen Flüssigsalzspeichers mit einem latent³-Wärmespeicher (PCM-Speicher) sinnvoll. Beim Entladen des Speichers stellt der Latentspeicher die Verdampfungswärme bei konstanter Temperatur bereit, während der sensible Speicher zur Überhitzung des Dampfes dient.

³ Bei einer „sensiblen“ Wärmespeicherung durchläuft das Speichermedium keinen Phasenwechsel. Im Gegensatz dazu wird bei einem „latent“-Wärmespeicher die Schmelzenergie beim Phasenwechsel des Speichermediums genutzt.

Insgesamt ist der apparatetechnische Aufwand bei dieser Speicheroption vergleichsweise groß, da der Speicher beim Entladen prinzipiell als ein zusätzlicher Dampferzeuger fungieren muss. Des Weiteren müssen die beim Be-/Entladen des Speichers anfallenden/benötigten Dampfmassenströme wieder ins System zurückgeführt werden, was einen höheren Integrationsaufwand bedeutet.

3.71 Detaillierte Untersuchung: Regenerator im Abgaspfad der Gasturbine

Im Rahmen des Projektes wurde die Integration eines Feststoff-Regeneratorspeichers im Rauchgaspfad der Gasturbine untersucht, da sich diese Variante am einfachsten in das bestehende System integrieren lässt. Es wurde dazu die Erzeugungsstruktur eines exemplarischen Industrieparks in einem numerischen Modell abgebildet und die Auswirkung einer Speicherintegration auf die Erlös-/Kostensituation untersucht.

Das grundlegende Modell ohne Speicherintegration wurde bereits von Ausfelder et al. [17] beschrieben. Es sieht folgende grundsätzliche Betriebsstrategie vor:

Zu Zeiten hoher Strompreise erfolgt die Dampferzeugung soweit wie möglich aus der installierten Gasturbinenkapazität. Reicht diese nicht aus, um den Gesamtdampfbedarf zu decken, wird der verbleibende Anteil durch Gaskessel bereitgestellt.

Fällt der Strompreis unter einen Schwellwert, wird die Gasturbine auf Mindestlast heruntergefahren und die Dampferzeugung verstärkt durch die Gaskessel gedeckt.

Der Strompreis liegt anhand einer Preiszeitreihe für das Jahr 2030 mit stündlicher Auflösung vor (siehe [17]). Erlöse werden sowohl aus dem Betrieb der Gasturbine als auch durch nachgeschaltete Dampfturbinen erzielt. Kosten entstehen durch das verbrauchte Erdgas zum Betrieb der Gasturbine und der Gaskessel.

Das Modell wurde dahingehend erweitert, dass durch die Integration eines thermischen Speichers eine erlösoptimierte Fahrweise der Gasturbine ermöglicht wird. Es wurde dazu folgendermaßen vorgegangen:

Die Preiszeitreihe wurde in Hoch- und Niederpreisphasen unterteilt. Während einer Hochpreisphase wird der thermische Speicher soweit wie möglich beladen. Voraussetzung dafür ist, dass die Gasturbinenkapazität den momentanen Dampfbedarf übersteigt und somit mit der verbleibenden Über-

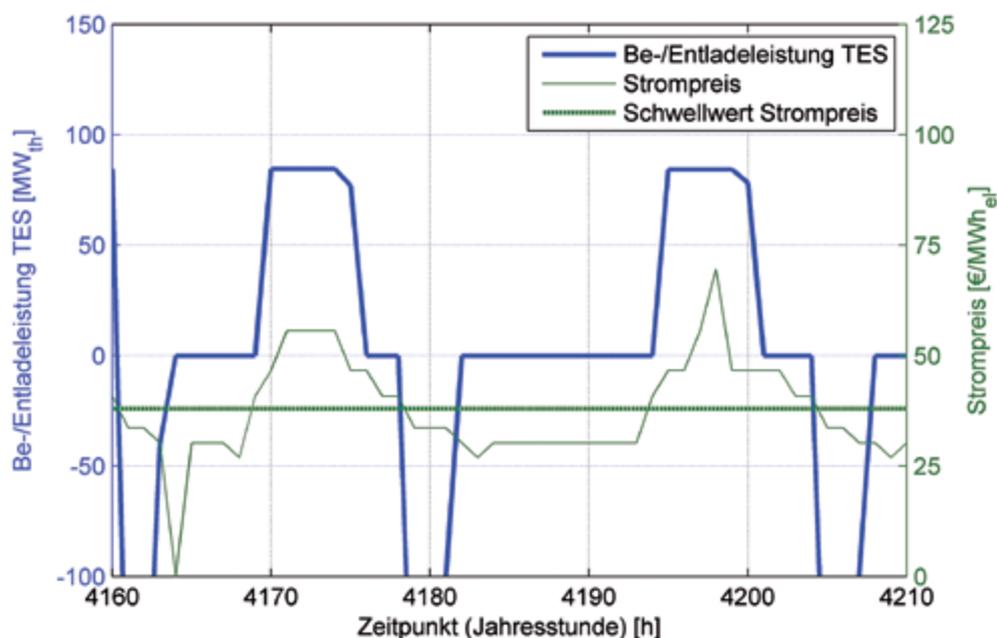


Abb. 3.4: Beispielhafter Verlauf des Strompreises und der Be-/Entladeleistung des Speichers.

4 Es wird also angenommen, dass der Strompreis für die komplette Phase im Voraus bekannt ist („perfect foresight“).

kapazität den Speicher beladen kann. Die Beladung erfolgt dabei erlösoptimiert innerhalb der Hochpreisphase. Während einer Hochpreisphase⁴ erfolgt keine (Teil-)Entladung des Speichers.

In der anschließenden Niedrigpreisphase wird die Gasturbine auf Mindestlast zurückgefahren und der Speicher soweit wie möglich entladen. Dadurch reduziert sich der Gasverbrauch und die Kosten für den Betrieb der Gaskessel, welche ansonsten während der Niedrigpreisphase den verbleibenden Dampfbedarf decken müssen.

Abbildung 3.4 zeigt exemplarisch den Verlauf des Strompreises während einer Hochpreisphase. Ebenfalls dargestellt ist der Verlauf der Be-/Entladeleistung des Speichers (Speicherkapazität QTES = 500 MWh).

Es wurde eine Variation der Speicherkapazität durchgeführt und die kumulierten Erlöse (Kostensparnis) über das Jahr hinweg ermittelt. Abbildung 3.5 (links) zeigt den Verlauf der Kostensparnis bei variiertem Speicherkapazität. Je größer der Speicher, desto größer die zwischengespeicherten Energiemengen und desto größer die Kostensparnis.

Die Kostensparnis muss der Speicherinvestition gegenübergestellt werden, um die Amortisationsdauer der Investition abzuschätzen. In Abbildung 3.5 (mittig) ist der Quotient aus Speicherinvestition und Kostensparnis für drei unterschiedliche, spezifische Investitionskosten dargestellt, wobei eine Abzinsung und die Betriebskosten des Speichers vernachlässigt sind. Abbildung 3.5 (rechts) zeigt eine Abschätzung für die Amortisation unter Berücksichtigung von Abzinsung und Betriebskosten.

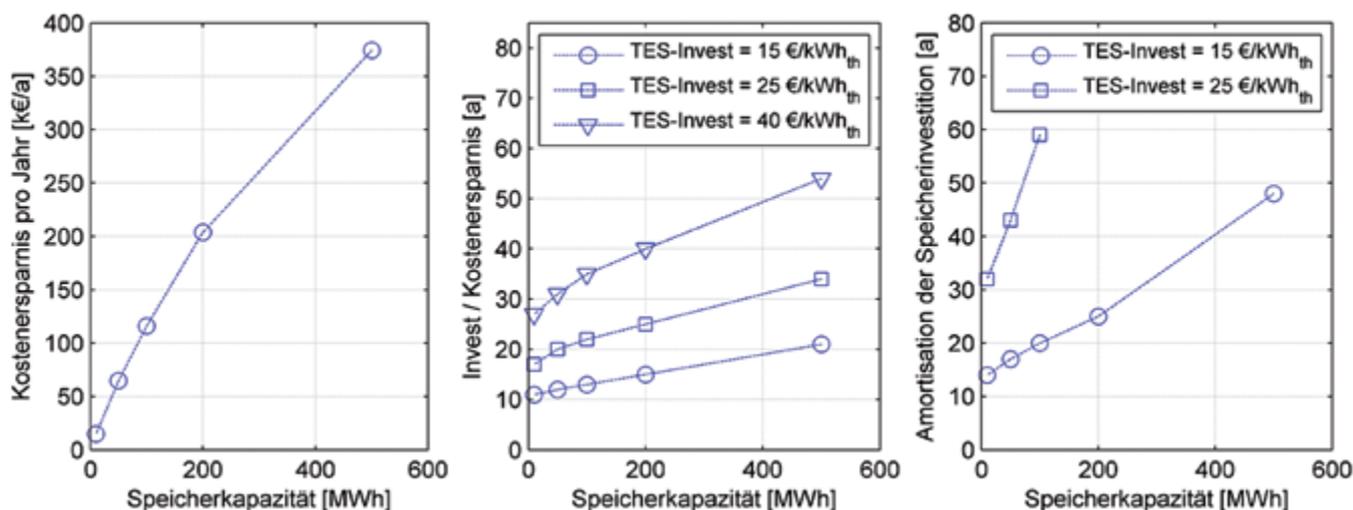


Abb. 3.5: Links: Kostensparnis pro Jahr durch thermischen Speicher in Abhängigkeit der Speicherkapazität.

Mitte: Quotient aus Investition für Speicher und Kostensparnis pro Jahr (keine Verzinsung und Betriebskosten berücksichtigt).

Rechts: Amortisation mit Verzinsung ($p = 3\%$) und Betriebskosten (1 % der Investkosten).

Kleine Speicher amortisieren sich dabei schneller, weil diese (innerhalb einer Hochpreisphase) nur zu den Zeitpunkten maximaler Strompreise beladen werden und somit in dieser Zeit maximalen Erlös erzielen. Je größer der Speicher, desto mehr wird die Beladung auch in Zeiten geringerer Strompreise verlagert, was den Erlös pro eingespeicherte Energiemenge reduziert.

Die Amortisationszeiten sind im betrachteten Fall größer als zehn Jahre, sodass eine Speicherintegration unter den gegebenen Bedingungen als nicht wirtschaftlich erscheint. Dies ist neben dem Strom- und Gaspreisniveau auch auf spezielle Gegebenheiten im betrachteten Dampfnetz zurückzuführen. So kann im betrachteten Fall der Speicher nur in den Sommermonaten betrieben werden und somit nur in dieser Zeit Erlöse erzielen. Grund dafür ist, dass die installierte Gasturbinenkapazität nur im Sommer ausreicht, um den Dampfbedarf vollständig zu decken und zusätzlich den Speicher zu beladen. In den Wintermonaten ist die Dampflast höher und übersteigt die Gasturbinenleistung, sodass keine Kapazität für die Beladung des Speichers zur Verfügung steht und dieser in dem entsprechenden Zeitraum nicht genutzt werden kann. Bei einer zusätzlichen Überbauung der Gasturbinen sind somit wesentlich geringere Amortisationszeiten zu erwarten.

3.7.2 Flexibilisierungsperspektive

Nachfolgend soll eine Abschätzung der Flexibilisierungsperspektive durch den Einsatz von thermischen Speichern im Dampfnetz erfolgen. Es wird an dieser Stelle nicht berücksichtigt, dass eine flexibilisierte Stromerzeugung auch durch eine „hybride“ Dampferzeugung im Verbund mit Gaskesseln und Elektrodenkesseln erreicht werden kann.

Die momentane Flexibilisierungsperspektive des Dampfnetzes hängt vom momentanen Lastzustand der Gasturbine ab.

Positive Flexibilität (Erhöhung der Stromerzeugung) kann nur bereitgestellt werden, wenn die Gasturbine in Teillast betrieben wird (eine Abschaltung der Gasturbine ist nicht vorgesehen). Voraussetzung dafür ist ein Speicher, der die zusätzliche Dampferzeugung bei einem Anheben der Gasturbinenleistung aufnehmen kann.

Negative Flexibilität (Reduzierung der Stromerzeugung) kann nur bereitgestellt werden, wenn die Gasturbine nicht bereits auf Mindestlast gefahren wird. Die fehlende Dampferzeugung bei einem Absenken der Gasturbinenleistung muss dann aus einem Speicher gedeckt werden.

Tabelle 3.4 zeigt eine Abschätzung der Speichergröße, wenn dieser den Dampfbedarf für das beispielhaft betrachtete Dampfnetz für drei Stunden (τ_1) bzw. zwölf Stunden (τ_2) decken soll. Diese Entladedauern entsprechen Anforderungsprofil 2, wie in [18] definiert. Es wird außerdem angenommen, dass die Gasturbine zu jeder Zeit auf Mindestlast weiterbetrieben wird.

Die angegebenen Daten für die Speichergröße wurden auf Basis von Erfahrungswerten abgeschätzt. Die tatsächliche Größe muss in einer Einzelfallbetrachtung unter Beachtung der Randbedingungen wie beispielsweise der zulässigen Eintrittstemperatur am Abhitzedampferzeuger geklärt werden. Bei sehr großen Speicherkapazitäten ist außerdem ein modularer Aufbau der Speicher zu erwarten.

Tabelle 3.4: Abschätzung der Speichergröße zur Pufferung des Dampfbedarfs über 3 h bzw. 12 h.

Bezeichnung	Größe	Einheit	τ_1	τ_2
Entladedauer	τ	h	3	12
Kapazität ⁵	Q	MWh _{th}	400-880	1600-3500
Speichermasse	M_s	1000-t	5-10	20-45
Speichervolumen	V_s	1000-m ³	4-9	16-37
Speicherdurchmesser	D	m	12-16	22-29
Speicherhöhe	H	m	36-47	44-57

Aus den Angaben in Tabelle 3.4 kann folgendes, maximales Flexibilisierungspotenzial abgeleitet werden: Die Gasturbine wird auf ein externes Signal hin von Voll- auf Mindestlast heruntergefahren und die reduzierte Dampferzeugung aus dem (voll beladenen) Speicher ausgeglichen. In diesem Fall ergibt sich, entsprechend der installierten Gasturbinenleistung, ein maximales (negatives) Potenzial von 230 MW_{el} über drei bzw. zwölf Stunden.

Unter der Voraussetzung, dass die Gasturbine zu Beginn der Flexibilitätsabfrage auf Mindestlast gefahren wird und der Speicher vollständig entleert ist, kann analog auch ein maximales positives Potenzial von 230 MW_{el} über drei bzw. zwölf Stunden bereitstellen.

Unter der Annahme, dass die Gasturbine zu Beginn der Flexibilitätsabfrage bei 75 % Last betrieben und der Speicher zu 50 % beladen ist, kann eine positive Flexibilität von 75 MW_{el} über etwa sechs bzw. 24 Stunden geliefert werden, oder eine negative Flexibilität von ca. 150 MW_{el} über eineinhalb oder sechs Stunden.

⁵ Die Spanne für die benötigte Kapazität ergibt sich aus der saisonalen Schwankung der Dampflast.

- Die Trocknungswärme.
- Die Vorwärmung der Verbrennungsluft.
- Der momentan durch Impulsbrenner realisierte Wärmeeintrag in der Vorwärmzone.

Abbildung 3.6 zeigt eine mögliche Integration eines TES in einen Ofenprozess mit Vortrocknung. Der TES dient als eine Art „Energy-Hub“, welches die Brennluftvorwärmung und den Wärmeeintrag in der Vorwärmzone versorgt. Die Trocknung wird im Wesentlichen mit dem Heißluftstrom aus der Kühlzone des Ofens bedient. Zusätzlich kann auch Wärme für die Trocknung aus dem TES zur Verfügung gestellt werden, falls der Abwärmestrom aus der Kühlzone des Ofens nicht ausreichend ist.

Das dargestellte Konzept hat den Vorteil, dass die Verbrennungsluftvorwärmung vom Ofenprozess entkoppelt wird. Dies ist vor allem bei Produktwechseln sowie bei An-/Abfahrvorgängen relevant.

Zur Auslegung des Speichers wird der Wärmebedarf einer exemplarisch betrachteten Schamotte-Herstellungsprozesses herangezogen. Genaue Daten zur Verteilung der einzelnen Wärmebedarfe in Vorwärm- und Hauptbrennzone sowie im Trockner liegen nicht vor. Des Weiteren variieren diese Anteile auch in Abhängigkeit des hergestellten Produkts, beispielsweise aufgrund von schwankendem Feuchtegehalt des Rohmaterials.

Für die Auslegung wurde vereinfachend angenommen, dass der Speicher die Verbrennungsluftvorwärmung abdecken muss und dass 5 % des Gesamtwärmebedarfs im Ofen durch Heißluft in der Vorwärmzone zugeführt werden kann.

Mit Hilfe eines vereinfachten 1D-Modells (keine Berücksichtigung von Wärmeverlusten, axialer Wärmeleitung etc.) wurde eine überschlägige Auslegung des in Abbildung 3.6 dargestellten thermischen Speichers (Feststoff-Regeneratorspeicher) durchgeführt. Die für die Berechnung verwendeten Parameter sind in Tabelle 3.5 dargestellt.

Tabelle 3.5: Parameter zur überschlägigen Speicherauslegung entsprechend Abbildung 3.6.

Bezeichnung	Größe	Einheit	Betrag
max. Temperatur im Speicher	T_H	°C	550
Zielwert Vorwärmtemperatur ¹	T_{VW}	°C	550
Eintrittstemperatur Luft am Speicher	$T_{L,in}$	°C	25
Minimal zulässige Vorwärmtemperatur ²	$T_{VW,min}$	°C	450
Entladedauer (1) ³	τ_1	h	3
Entladedauer (2) ³	τ_2	h	12
Erdgasmassenstrom ⁴	V_{EG}	Nm ³ /d	2000
Luftzahl am Brenner	λ	–	1.05
Spezifische Oberfläche des Speicherinventarmaterials ⁵	a_v	m ² /m ³	270
Porosität des Speicherinventarmaterials ⁵	ε	%	60
Verhältnis zwischen Speicherhöhe und Speicherdurchmesser	H/D	–	3

1 Maximale wirtschaftliche Vorwärmtemperatur.

2 Zum Ende des Entladeprozesses sinkt die Entladetemperatur ab.

3 Entspricht Anforderungsprofil 2 im ersten Teil dieses Forschungsberichts („Lastverschiebung über 3-12 Stunden“), wobei ggf. auch kurzfristige Anpassung entsprechend Anforderungsprofil 1 möglich sind. Unter dem Aspekt der Wirtschaftlichkeit muss die Entladedauer auf die statistischen Schwankungen des Strompreises hin optimiert werden.

4 Erdgasverbrauch des beispielhaft betrachteten Schamotte-Herstellungsprozesses.

5 Wert für ein typisches Inventarmaterial (Wabenkörper). Aufgrund der verhältnismäßig kleinen Speicherkapazität wurde ein Inventarmaterial mit großer spezifischer Oberfläche gewählt, um die Speichermasse besser ausnutzen zu können.

Zur Spezifikation der angestrebten Entladedauer des Speichers wurde das Anforderungsprofil 2 – wie im ersten Teil dieses Forschungsberichtes [18] definiert – herangezogen und entsprechend eine Entladedauer von drei und zwölf Stunden (τ_1 und τ_2) zu Grunde gelegt. Wie in Abschnitt 3.2 erläutert, geben diese Entladedauern noch keine Auskunft über eine wirtschaftlich optimierte Speicherdimen-

sionierung. Bei einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung muss außerdem berücksichtigt werden, dass die Wärmeversorgung für Verbrennungsluftvorwärmung und Ofen zu jedem Zeitpunkt sichergestellt werden muss, also auch bei vollständig entladener Speicher. Dies beinhaltet vor allem das Design und die Auslegung der elektrischen Beheizung, was jedoch über den Rahmen dieses Projekts hinausgeht.

Tabelle 3.6 zeigt die Ergebnisse der Speicherauslegung für die beiden genannten Entladedauern. Die Flexibilisierungsperspektive hängt von der Dimensionierung der elektrischen Beheizung ab. Unter der Annahme, dass diese um 100 % überbaut wird – d.h. dass die Heizung den momentanen Wärmebedarf decken und gleichzeitig mit gleicher Leistung den Speicher beladen kann – ist die Entladedauer gleich der Beladedauer. Die Flexibilisierungsperspektive bei vollständig be-/entladener Speicher beträgt dann ± 193 kW über drei bzw. zwölf Stunden. Unter Annahme eines zur Hälfte beladenen Speichers als Ausgangszustand halbiert sich die Be-/Entladeleistung entsprechend. Die Daten beziehen sich auf das exemplarisch betrachtete Schamottewerk.

Der Gesamtenergieeinsatz in der Feuerfestindustrie beträgt 4 PJ pro Jahr (2015) [18]. Dabei liegt der Anteil von Gas bei 82,5 % (2015) [19], was einem verbrauchten Gasvolumen von ca. 92 Mio Nm³/a entspricht. Bei Skalierung der Ergebnisse aus der Betrachtung der Beispielanlage auf dieses Gasvolumen ergibt sich somit eine Flexibilisierungsperspektive von $\pm 24,3$ MW.

Es ist zu beachten, dass die umsetzbare elektro-thermische Beladeleistung am Speicher grundsätzlich von der verfügbaren stromnetzseitigen Infrastruktur abhängt. Sind die entsprechenden Voraussetzungen gegeben, können technisch auch deutlich höhere Beladeleistungen realisiert werden, was zu einer entsprechend größeren (negativen) Flexibilisierungsperspektive führt (bei entsprechend verkürzter Beladedauer).

Tabelle 3.6: Ergebnis der Speicherauslegung entsprechend der Parameter in Tabelle 3.5.

Bezeichnung	Größe	Einheit	τ_1	τ_2
Kapazität	Q	MWh	0,58	2,36
Speichermasse	M_s	t	4,7	17,0
Speichervolumen	V_s	m ³	3,8	13,7
Speicherdurchmesser	D	m	1,2	1,8
Speicherhöhe	H	m	3,5	5,4

3.9 Literatur

- [1] Fisch, N. und Bodemann, M. BINE-Informationspaket - Wärmespeicher. Köln : TÜV-Verlag GmbH, 2005.
- [2] Seitz, Antje und Hoyer-Klick, Carsten. Technologiebericht 3.3b Energiespeicher (thermische, thermo-chemische und mechanische). [Hrsg.] Wuppertal Institut, ISI, IZES. Technologien für die Energiewende. Teilbericht 2 an das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi). Wuppertal, Karlsruhe, Saarbrücken : s.n., 2018.
- [3] Potenzialanalyse zur Hybridisierung von Prozessen in der Grundstoffindustrie. Veitengruber, Frank, Dufter, Christa und Gruber, A. Wien : s.n., 2019. 11. Internationale Energiewirtschaftstagung (IEWT).
- [4] Dreissigacker, Volker. Power-to-heat in adiabatic compressed air energy storage power plants for cost reduction and increased flexibility. *Heat and Mass Transfer*. 2018, Bd. 54, S. 955-962.
- [5] Power-to-Heat in Hochtemperatur-Feststoffwärmespeichern: Untersuchung von Flexibilitätsoptionen im Verbundvorhaben „Energy Lab 2.0“. Dreissigacker, Volker, Belik, Sergej und Zunft, Stefan. Dresden : s.n., 2018. *Kraftwerkstechnik 2018 - Power Plant Technology*. 50. Kraftwerkstechnisches Kolloquium.
- [6] Belik, Sergej, Dreissigacker, Volker und Dieterich, V. Thermal Energy Storage Systems: Power-to-Heat Concepts in Solid Media Storage for High Storage Densities. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*. 2017, Bd. 5, S. 285-294.
- [7] Numerical modelling of an induction heating process for packed rods with adjacent airflow. Belik, Sergej. Hannover : s.n., 2017. XVIII International UIE-Congress - Electrotechnologies for Material Processing.
- [8] Ausfelder, Florian, Seitz, Antje und von Roon, Serafin. Flexibilitätsoptionen in der Grundstoffindustrie – Methodik, Potenziale, Hemmnisse. Frankfurt am Main : s.n., 2018.
- [9] Barklage-Hilgert, Hansjürgen und Trier, Wolfgang. Berechnungen zum Einfluss der Rohstoffvorwärmung auf den Wärmehaushalt von Glasschmelzöfen. *Glastechnische Berichte*. 1983, Bd. 56, 10, S. 269-279.
- [10] Hüttentechnische Vereinigung der Deutschen Glasindustrie e.V. (HVG). 2019.
- [11] Bundesverband Glasindustrie e.V. (BV Glas). <https://www.bvglas.de>. [Online] [Zitat vom: 27. Juni 2019.] https://www.bvglas.de/media/Facts_and_figures_Jahresberichte/Produktion_von_Glas.pdf.
- [12] Verein Deutscher Zementwerke e.V. gGmbH, Forschungsinstitut der Zementindustrie. Umweltdaten 2017. Düsseldorf : s.n., 2018. <https://www.vdz-online.de/publikationen/umweltdaten>.
- [13] Process characteristics and heat management in the cement industry. Ruppert, Johannes. 2017. IEA Thermal Energy Storage Workshop, (Frankfurt, 3 May 2016).
- [14] Verein Deutscher Zementwerke e.V. Zement-Taschenbuch. Düsseldorf : s.n., 2008.
- [15] Ruppert, Johannes, et al., et al. Prozesskettenorientierte Ermittlung der Material- und Energieeffizienzpotentiale in der Zementindustrie: Entwurf Endbericht (UFOPLAN FKZ 3716 36 320 0). Düsseldorf : VDZ, 2018 (in Vorbereitung, 18.12.2018). <https://www.vdz-online.de/forschung/aktuelle-projekte/prozesskettenorientierte-ermittlung-der-material-und-energieeffizienzpotentiale-in-der-zementindustrie/>
- [16] Calciner Technology for Oxyfuel Process. Paneru, M., et al., et al. s.l. : Ed. Presentations and Posters of the ECRA/CEMCAP/CLEANER Workshop 2018 on Carbon Capture Technologies in the Cement Industry (Brussels, 17 October 2018). European Cement Research Academy, ECRA; Research Group CEMCAP; Research Group CLEANER. Available at: <https://ecra-online.org/research/ccs/presentations-and-posters/>
- [17] Ausfelder, Florian und Fischer, Tobias. Prozesswärme in der chemischen Industrie – Flexibilitätspotenziale durch gekoppelte Dampf- und Stromerzeugung in „Energieflexibilität der deutschen Industrie“, Alexander Sauer, Eberhard Abele, Hans Ulrich Buhl (Hrsg.), Fraunhofer Verlag, 2019.
- [18] Rhode, C., FhG ISI. Erstellung von Anwendungsbilanzen für die Jahre 2013 bis 2016 Studie für die Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V. (AGEB) – Entwurf. Karlsruhe : s.n., 2017.
- [19] Verband der Deutschen Feuerfest-Industrie e.V.

4

GASVERSORGUNG IM WANDEL

Vor welche technischen Herausforderungen Power-to-Gas die Industrie stellt

Verantwortliche Autoren

Kirstin Ganz k ganz@ffe.de

Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH, Am Blütenanger 71, 80995 München

Christa Dufter cdufter@ffe.de

Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH, Am Blütenanger 71, 80995 München

Tobias Hübner thuebner@ffe.de

Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH, Am Blütenanger 71, 80995 München

Timo Kern tkern@ffe.de

Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH, Am Blütenanger 71, 80995 München

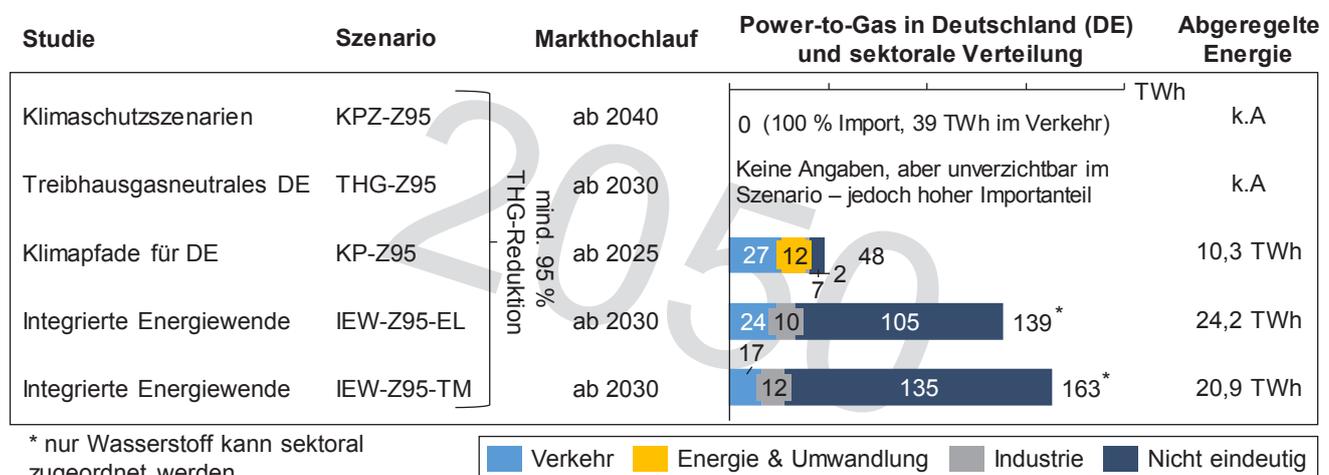
Serafin von Roon sroon@ffe.de

Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH, Am Blütenanger 71, 80995 München

4.1 Hintergrund und Motivation

In Zukunft werden weitreichende Veränderungen in der Gasversorgung erwartet. Wird das Erdgas gegenwärtig in Deutschland vor allem aus Russland, Norwegen und den Niederlanden importiert, kommt in Zukunft aufgrund sinkender Produktion in den Niederlanden und Norwegen Flüssiggas aus aller Welt hinzu. Auch Biogas wird in der zukünftigen Gaszusammensetzung enthalten sein. Die größten Veränderungen und Herausforderungen für die Gasbereitstellung werden jedoch durch die Einspeisung von auf PtG basierten Wasserstoff ins Erdgasnetz hinzukommen. Hauptsächlich Treiber für PtG sind die energiesystemische Notwendigkeit flexibler Energie, das klimapolitische Ambitionsniveau und das individuelle Bestreben der Marktteilnehmer zum Klimaschutz.

Abb. 4.1: PtG in Deutschland im Jahr 2050 [1] ¹



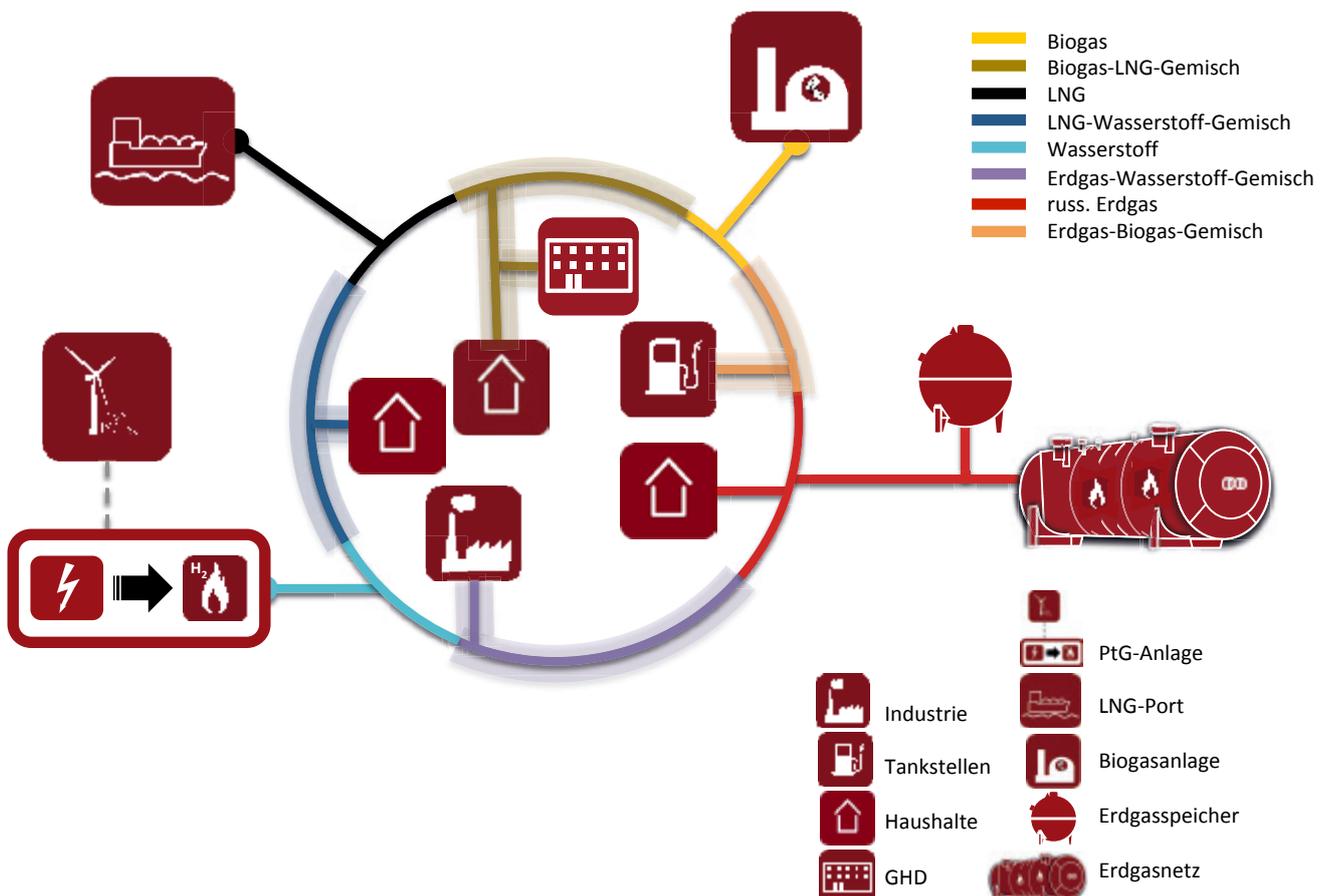
1 Die hier aufgeführten strombasierten Brennstoffe umfassen hauptsächlich H₂ und strombasiertes Methan. Biomassebasierte Energieträger sind nicht inkludiert.

Durch die volatile Energiebereitstellung wird zunehmend vom bestehenden Modus Operandi einer dem Verbrauch folgenden Erzeugung abgewichen. PtG offeriert infolge der flexiblen Produktion, des Verbrauchs und der Speicherung strombasierter Brennstoffe kurzfristige und langfristige Flexibilität. Auf diese Weise ist es möglich, Schwankungen im Energiesystem durch den zunehmenden Einsatz nicht-disponibler Energieerzeugungsanlagen auszugleichen, die Stromnetzinfrastuktur zu entlasten und die Versorgungssicherheit zu erhöhen [1]. Abbildung 4.1 zeigt das Ergebnis einer Metastudienanalyse energie- und klimapolitischer Szenarien hinsichtlich PtG. Es werden die tatsächlich erzeugte PtG Menge, der Markthochlauf von PtG und die abgeregelte Energie der Szenarien im Jahr 2050 herangezogen.

Im Jahr 2050 werden bis zu 163 TWh strombasiertes Gas oder darauf basierende Energieträger (bspw. Fischer-Tropsch-Kraftstoffe) in Deutschland durch PtG-Anlagen produziert. Die zunehmende Marktdurchdringung (Markthochlauf) beginnt je nach Szenario zwischen 2025 und 2040. Ein entscheidendes Kriterium für die Skalierung von PtG ist die Verfügbarkeit von sog. Überschussstrom (2017: 5,5 TWh [2]), der mittels Einspeisemanagement in Deutschland abgeregelt wird. Umwandlungsverluste, wie sie durch den Einsatz von PtG im Unterschied zur Elektrifizierung entstehen, sind bei der Nutzung von Überschussstrom als zweitrangig anzusehen. Zusätzliche elektrische Verbraucher im Verkehrs- (EMobilität), Industrie- (Power-to-Heat) und Haushaltssektor (Wärmepumpen) sowie Speicherkapazitäten führen dazu, dass die abgeregelte Energie zukünftig nicht maßgeblich ansteigen wird. Die genannten Flexibilitätsoptionen sind darüber hinaus meist deutlich günstiger als PtG [3].

Es wird deutlich, dass der Überschussstrom bei weitem nicht ausreichen wird, um strombasierte Brennstoffe inländisch in größerem Maßstab erzeugen zu können (vgl. Abbildung 4.1) [1]. Ein höherer Bedarf an erneuerbarer Energieerzeugung ist die Folge. Die Gesamteffizienz des Energiesystems sinkt im Vergleich zur Elektrifizierung [4]. PtG unterliegt demgemäß folgendem Grundsatz: Für den Klimaschutz und das Energiesystem so viel wie nötig, aus Effizienz- und Kostengründen so wenig wie möglich [5].

Abb. 4.2: Die Gasversorgung der Zukunft



Getrieben wird der erzeugungsseitige Ausbau von PtG Anlagen maßgeblich durch die Nachfrage in den Endenergiesektoren. Der Einsatz strombasierter Brennstoffe verspricht die bestehende Energienutzung beizubehalten. Aufgrund mangelnder Alternativen ist die Anwendung strombasierter Brennstoffe hauptsächlich im Verkehr und der Industrie zu erwarten [1, 6]. Um die langfristige Flexibilität elektrischer Energie durch saisonale chemische Speicherung zu gewährleisten, ist zudem der Einsatz im Energie- und Umwandlungssektor denkbar [1]. Eine Übersicht zu neuen Erzeugern, der veränderten Gasversorgung sowie betroffene Stakeholder ist in Abbildung 4.2 dargestellt.

Die Endverbraucher Industrie, Tankstellen, Haushalte und Gewerbe, Handel und Dienstleistung (GHD) werden in Zukunft nicht nur mit reinem Erdgas versorgt, sondern durch ein Gemisch verschiedener Gase. Zeitlich und geografisch abhängig weist das Gas eine unterschiedliche Charakteristik auf, da vor allem H₂ teilweise stark verschiedene Eigenschaften besitzt. So sinkt durch die Beimischung von H₂ z. B. der volumenbezogene Brennwert, wie auch der Wobbe-Index [7].

Auch heute sind bereits leichte Schwankungen der Gasqualität durch die unterschiedliche Erdgaszusammensetzung von englischem, niederländischem, norwegischem und russischem Erdgas vorhanden. Außerdem wird bereits an einigen Standorten konditioniertes Biomethan ins Erdgasnetz eingespeist, wobei durch die Konditionierung sehr ähnliche Gaseigenschaften zu Erdgas erreicht werden. Heutige Schwankungen sind demnach viel geringer als sie durch die H₂-Einspeisung zu erwarten sind.

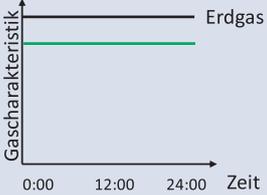
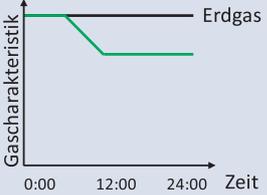
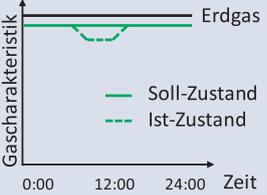
Hinsichtlich des Einsatzes strombasierter Brennstoffe kommt der Industrie eine besondere Rolle zu, da deren Anlagen stark sensitiv auf die Energieträgerzusammensetzung reagieren können. Spezialisierte Maschinen zur Steigerung der Effizienz und Prozessstabilität und zur Senkung der Schadstoffemissionen sind ein ausschlaggebender Faktor [7]. Zur Erzeugung strombasierter Brennstoffe auf Kohlenstoffbasis stellen die in der Industrie verfügbaren CO₂-Ströme zudem ideale Punktquellen dar [8], die aufgrund des wachsenden EE-Anteils im Energie- und Umwandlungssektor nicht mehr zur Verfügung stehen. Daher werden Industriestandorte besonders von H₂-Einspeisungen betroffen sein.

4.2 Methodik

In dem vom BMBF geförderten Kopernikus-Projekt SynErgie (mit mehr als 80 Partnern aus Wissenschaft, Industrie und Zivilgesellschaft) beschäftigt sich die FfE mit der Flexibilisierung von Industrieprozessen. Im Rahmen des Projekts wurden zunächst Anforderungsprofile für die Bereitstellung von Flexibilität aus Sicht des Strommarkts entwickelt [9]. In weitergehenden Analysen werden nun auch die Anforderungen durch die sich wandelnde Gasversorgung systematisiert.

Um Anforderungsprofile erstellen zu können, muss vorab untersucht werden, inwiefern die Industrie mit den Herausforderungen der H₂-Einspeisung zurechtkommt. Um diese für die Industrie zu systematisieren, wurden drei Anforderungsprofile entwickelt, welche mögliche Szenarien der H₂-Einspeisung darstellen und den Handlungsbedarf der Industrie analysieren. In einem zweiten Schritt wurden die Anforderungsprofile mit verschiedenen Vertretern der Industrie diskutiert und validiert.

Das erste Anforderungsprofil stellt die Situation für eine konstante H₂-Einspeisung und damit einen konstanten Volumenanteil von erneuerbarem Gas im Gasgemisch dar. Dies repräsentiert die Einspeisung einer PtG- oder Biogas-Anlage, welche konstant in Volllast betrieben wird. Im zweiten Anforderungsprofil wird von schwankendem, aber planbarem Volumenanteil erneuerbarer Gase im Gasgemisch ausgegangen. Hier wird also von wechselnden Gaszusammensetzungen ausgegangen, beispielweise durch die volatile Einspeisung einer PtG-Anlage in der Nähe eines Windparks, welche überschüssigen Strom in H₂ umwandelt. Das letzte Anforderungsprofil stellt die größten Herausforderungen an die Industrie, da hier von nicht planbaren Schwankungen ausgegangen wird, welche z. B. durch die Erbringung von Regelleistung durch PtG-Anlagen oder Prognosefehlern für EE-Erzeugung auftreten können.

	Anforderungsprofil 1	Anforderungsprofil 2	Anforderungsprofil 3
Vorankündigungszeit	nicht relevant	2-5 Tage	Minuten bis Stunden
Zeit bis Erreichen	–	1 h / 36 km	1 h / 36 km
Dauer	nicht relevant	bis mehrere Tage	kurze Zeiträume
max. Gradienten	nicht relevant	Gradient des H ₂ -Speichers	Gradient des H ₂ -Speichers
wesentlicher Handlungsbedarf	Umrüstung Messtechnik	Messtechnik alternative Produktionspfade Hybridisierung	Messtechnik Hybridisierung Abschaltung
zusätzliche Kosten	Investition in Umrüstung	Investition in Alternativtechnologien, höhere Betriebskosten	Investition in Alternativtechnologien, höhere Betriebskosten; mögl. Produktionsausfall
Graphische Darstellung			

4.3 Die drei Anforderungsprofile

Die Anforderungsprofile sind folgendermaßen aufgebaut. Zuerst werden die Rahmenbedingungen vorgestellt, welche den energiewirtschaftlichen Hintergrund sowie die energiewirtschaftliche Bedeutung heute und in Zukunft beinhalten. Danach folgen technische Daten, wie die Vorankündigungszeit bis zur Einspeisung, die Dauer der Einspeisung sowie der maximale Gradient der Gasqualität. Zuletzt folgen der wesentliche Handlungsbedarf für die Industrie mit den daraus resultierenden Kosten sowie ein Beispiel, wo dieses Anforderungsprofil auftritt.

Das Anforderungsprofil 1 weist einen konstanten Volumenanteil von erneuerbaren Gasen im Gasgemisch auf. Daraus ergeben sich im Vergleich zu heute veränderte Gascharakteristiken, die jedoch über die Zeit konstant bleiben. Aufgrund der konstanten Gasqualität sind Vorankündigungszeit, Dauer und maximale Gradienten nicht relevant. Als Handlungsbedarf für die Industrie ergibt sich vor allem ein Umrüsten der Anlagen auf die veränderte Gasqualität bzw. Anpassung der Regelstrategien. Zusätzliche Kosten sind Investitionen für die Umrüstung der Anlagen. Ein Beispiel für das Anforderungsprofil 1 ist eine Biogasanlage mit konstanter Einspeisung, welche sich in der Nähe eines Industrieparks befindet. Schon während der Planungs- und Bauphase der Anlage wird bekannt, wie viel Biogas konstant ins Erdgasnetz eingespeist werden wird, sodass der Industrie eine lange Reaktionszeit gegeben ist, ihre Anlagen auf die veränderten Gaseigenschaften einzustellen.

Das Anforderungsprofil 2 beschreibt den Fall von einem schwankenden, aber geplanten Volumenanteil von erneuerbaren Gasen im Gasgemisch. Die Vorankündigungszeit bis zur Einspeisung ist abhängig von Wetterprognosen und liegt zwischen 2-5 Tagen. Zuzüglich dieser Vorankündigungszeit ergibt sich noch eine weitere Dauer basierend auf der Distanz des Industriestandortes zur PtG-Anlage. Die Gas-Strömungsgeschwindigkeit in Fernleitungen beträgt ca. 36 km/h [10]. Die Dauer der Einspeisung hängt wiederum vom Wetter ab. Der maximale Gradient entsteht auf Grundlage der Auslegung des H₂-Speichers sowie ggf. von Restriktionen des Erdgasnetzes, je nachdem welche Gradienten regulatorisch zugelassen werden. Als Handlungsbedarf ist zuerst die Anpassung der Mess-, Steuer- und Regeltechnik zu nennen. Außerdem kommen je nach Möglichkeit der Industrie alternative Produktionspfade – also Änderung im Produktionsprozess – sowie Hybridisierung hinzu. Kostentechnisch entstehen sowohl Investitionen für die Alternativtechnologien (Hybridisierung) als auch höhere Betriebskosten durch geringere Effizienz der Anlagen bzw. der alternativen Produktionspfade sowie die Kosten für Strom statt Erdgas.

Abb. 4.3: Wichtige Parameter der verschiedenen Anforderungsprofile im Vergleich

Nachfolgend ist ein Beispiel für das Anforderungsprofil 2 dargestellt: Für die kommende Woche werden aufgrund der Wettervorhersage hohe Einspeisungen aus Photovoltaik- und Windenergieanlagen prognostiziert. Daher entscheidet der Betreiber eines Windparks mit integrierter H₂-Einspeiseanlage, in der folgenden Woche den Windstrom in größeren Mengen in H₂ umzuwandeln und ins Erdgasnetz einzuspeisen.

Die meisten Herausforderungen hält das Anforderungsprofil 3 bereit. Hier wird von einem schwankenden, nicht planbaren Volumenanteil von erneuerbaren Gasen im Gasgemisch ausgegangen. Dies tritt z. B. bei Regelleistungserbringung oder Prognosefehlern auf. Hierdurch ändert sich kurzfristig das Einspeiseprofil des H₂-Elektrolyseurs. Dies führt zu nicht planbaren Schwankungen der Gasqualität. Die Vorankündigungszeit bis zur Einspeisung hierbei beträgt wenige Minuten zuzüglich der Zeit bis zum Erreichen des Standortes. Es handelt sich hierbei um kurze Einspeise-Zeiträume im Gegensatz zu Anforderungsprofil 2. Zuzüglich zu dem Handlungsbedarf von Anforderungsprofil 2 kommt als weitere Möglichkeit das kurzfristige Herunterfahren von Anlagen, falls dies möglich ist, hinzu. Dies resultiert ebenfalls in zusätzlichen Kosten.

Die Kernaussagen der drei Anforderungsprofile sind in Abbildung 4.3 noch einmal zusammenfassend dargestellt.

Die oben beschriebenen Anforderungsprofile wurden mit Branchenvertretern als auch mit direkten Industriewerken besprochen [11]. Am Beispiel der Glasindustrie werden die Herausforderungen der einzelnen Anforderungsprofile erörtert:

Die Diskussion hat ergeben, dass das Anforderungsprofil 1 mit der konstanten Gasveränderung bei geringen H₂ Anteilen für die meisten Industrien möglich sein wird. Aufgrund von Versprödung und ähnlich Effekten ist eine Umstellung auf 100 % H₂ jedoch nicht möglich, auch wenn dies ebenfalls eine konstante Gasveränderung wäre.

Das Anforderungsprofil 2 setzt Messtechnik zwingend voraus, um auf die Veränderungen reagieren zu können. Heutzutage liegen vielen Industriebetrieben noch gar keine oder nur gemittelte Werte ihrer bezogenen Gasqualität vor, sodass hier ein Anpassungsbedarf besteht [7]. Die lange Vorankündigungszeit des Anforderungsprofils 2 von mehreren Tagen erlaubt es selbst trägen Systemen wie Glaswannen, sich auf die Veränderungen einzustellen bzw. mechanische Umbautätigkeiten durchzuführen, sodass das Anforderungsprofil 2 für viele Industrien als technisch machbar eingeschätzt wird.

Aufgrund der trägen Systeme in vielen Industrieprozessen ist das Anforderungsprofil 3 für die meisten Industrien nicht möglich. Das Abschalten beispielsweise einer Glaswanne ist nicht vorgesehen und würde Tage in Anspruch nehmen. Auch die Hybridisierung als Maßnahme für Anforderungsprofil 3 ist momentan in dem Maße in vielen Industrien nicht möglich. In der Glasindustrie beispielsweise ist eine vollständige Hybridisierung/Elektrifizierung von Floatglaswannen großtechnisch noch nicht umgesetzt worden und zum aktuellen Zeitpunkt aus verschiedenen Gründen schwer vorstellbar (siehe dazu [12]). Allgemein geht bei vielen Prozessen jede Veränderung im Prozess erst einmal mit Qualitätsschwankungen einher. Daher ist es für die Industrie wünschenswert, dass synthetisches, strombasiertes Methan und nicht H₂ in das Erdgasnetz eingespeist wird, da dies ohne nennenswerte Einschränkungen Erdgas ersetzen kann, es sind kaum Anpassungen der industriellen Prozessspezifika notwendig.

4.4 Fazit

Bereits die heutigen Entwicklungen führen dazu, dass Messtechnik immer mehr an Bedeutung in der Industrie gewinnt, um Schwankungen der Gasqualität zu erkennen. Die größten Herausforderungen sind unbekannte Veränderungen, da dann die Regelung bzw. Steuerung nicht reagieren kann. Außerdem wäre eine Kommunikation zwischen den Industriebetrieben und der PtG-Erzeugung bzw. den Gasnetzbetreibern von Vorteil, da so frühzeitig Veränderungen der Gasqualität antizipiert werden können.

Generell gilt, dass die Industrie vor ganz unterschiedlichen Herausforderungen steht. Jeder Prozess reagiert unterschiedlich empfindlich auf Schwankungen, sodass eine allgemeine Aussage über die Herausforderungen für die Industrie nicht zu treffen ist. Mit diesen Anforderungsprofilen wurde ein Beitrag geleistet, die verschiedenen Herausforderungen, vor welche die Industrie steht, zu systematisieren und herunterzubrechen, sodass ein leichter Zugang zu der Thematik PtG und H₂-Einspeisungen erreicht wird.

4.5 Literatur

- [1] Hübner, T. et al.: Die Rolle synthetischer Brennstoffe zur Erreichung der klimapolitischen Ziele – Bedeutung im Jahr 2050. In: BWK (Brennstoff, Wärme, Kraft) – Das Energie-Fachmagazin 10/2018. Düsseldorf: Springer-VDI-Verlag GmbH & Co. KG, 2018.
- [2] Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen: Monitoringbericht 2018. Bonn, 2019.
- [3] Deutsch, M. et al.: Die zukünftigen Kosten strombasierter synthetischer Brennstoffe. Berlin: Agora Energiewende, 2018.
- [4] Pfluger, B. et al.: Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland. Karlsruhe: Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (Fraunhofer ISI), 2017.
- [5] Vorholz, F. et al.: Strombasierte Brennstoffe: Für den Klimaschutz so viel wie nötig, aus Effizienzgründen so wenig wie möglich. Berlin: Agora Verkehrswende, 2018.
- [6] Pichlmaier, S. et al.: Modelling the Transport Sector in the Context of a Dynamic Energy System, 41st IAEE conference Groningen. Research Center for Energy Economics, Munich. 2018.
- [7] Leicher, J. et al.: Natural gas quality fluctuations--surveys and statistics on the situation in Germany. In: Energy Procedia 120/2017. Amsterdam: Elsevier, 2017.

5 WAS IST SYNTHETISCHES GAS?

Verantwortliche Autoren

Karin Arnold karin.arnold@wupperinst.org
 Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH, Döppersberg 19, 42103 Wuppertal
 Georg Holtz georg.holtz@wupperinst.org
 Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH, Döppersberg 19, 42103 Wuppertal
 Ansgar Taubitz ansgar.taubitz@wupperinst.org
 Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH, Döppersberg 19, 42103 Wuppertal

Im Zuge der Energiewende und der Dekarbonisierung der Industrie werden folgende Gase als besonders essentiell angesehen:

- Wasserstoff (H₂),
- Synthetisches Erdgas bzw. EE-Methan und
- Biomethan,

welche aus diesem Grund im Zuge dieser Arbeit berücksichtigt werden.

5.1 Ausgewählte Kenndaten synthetischer Gase

Die Gasbeschaffenheiten der genannten Gase sind in Tabelle 5.1 abgebildet.

Tabelle 5.1: Gasbeschaffenheitskennwerte für verschiedene Erdgase, Bio- und SNG Methan sowie Wasserstoff [1,2,3,4].

Gasbestandteile	Einheit	Erdgas Holland-L	Erdgas Nordsee-H	Erdgas Russland-H	Biomethan	Synthetisches Erdgas***	Wasserstoff
Methan	%	83,16	86,25	97,79	96,15*	94 – 98	
Stickstoff		10,08	0,93	0,82	0,75	2 – 3	
CO ₂		1,57	1,91	0,09	2,90	0,2 – 2	
Ethan		4,04	8,56	0,88			
Propan		0,81	1,89	0,29			
n-Butan		0,23	0,39	0,1			
n-Pentan		0,06	0,05	0,02			
n-Hexan		0,05	0,02	0,01			
Wasserstoff		0,00	0,00	0,00		0,05 – 2	>99,9**
Brennwert	kWh/m ³	10,34	11,90	11,12	10,6	10,6	3,54
Normdichte	kg/m ³	0,834	-	-			
Relative Dichte		0,645	0,645	0,568	0,587		0,0695
Wobbeindex	kWh/m ³	12,88	14,83	14,75	13,9		13,43
Methanzahl		86,0	75,3	94,5	103		0
* Der Methangehalt des Biogases variiert und ist abhängig von der Substratbeschickung und Prozessführung ** Weitere Bestandteile sind Sauerstoff, Stickstoff und Wasserdampf *** Es handelt sich hierbei um das Methanisierungsverfahren Tremp™							

5.2 Welche Herstellungsverfahren gibt es?

5.2.1 Wasserelektrolyse

Es existieren verschiedene Verfahren zur Herstellung von Wasserstoff, von denen die meisten heute angewandt auf fossilen Energieträgern basieren. Das gängigste und auch ökonomischste Verfahren ist die Dampfreformierung von Erdgas. Im Kontext der Energiewende und der damit einhergehenden Dekarbonisierung der Industrie wird aber vorausgesetzt, dass der Wasserstoff mittels Elektrolyse produziert wird, wobei ausschließlich erneuerbarer Strom eingesetzt wird. Auf diesem Weg wird ein wirklich treibhausgasneutraler Energieträger zur Verfügung gestellt.

Diese Erzeugungsrouten von Wasserstoff bildet im Weiteren auch die Grundlage für die Umwandlung in synthetisches Methan.

Abbildung 5.1 zeigt eine schematische Darstellung der Prozesskette Wasserelektrolyse (angelehnt an [5, 6, 7]). Die angegebenen Wirkungsgrade geben einen Überblick über den technischen Stand an, wobei jede einzelne Angabe auch unterschiedlich diskutiert werden kann und keinen Anspruch auf Absolutheit erhebt.

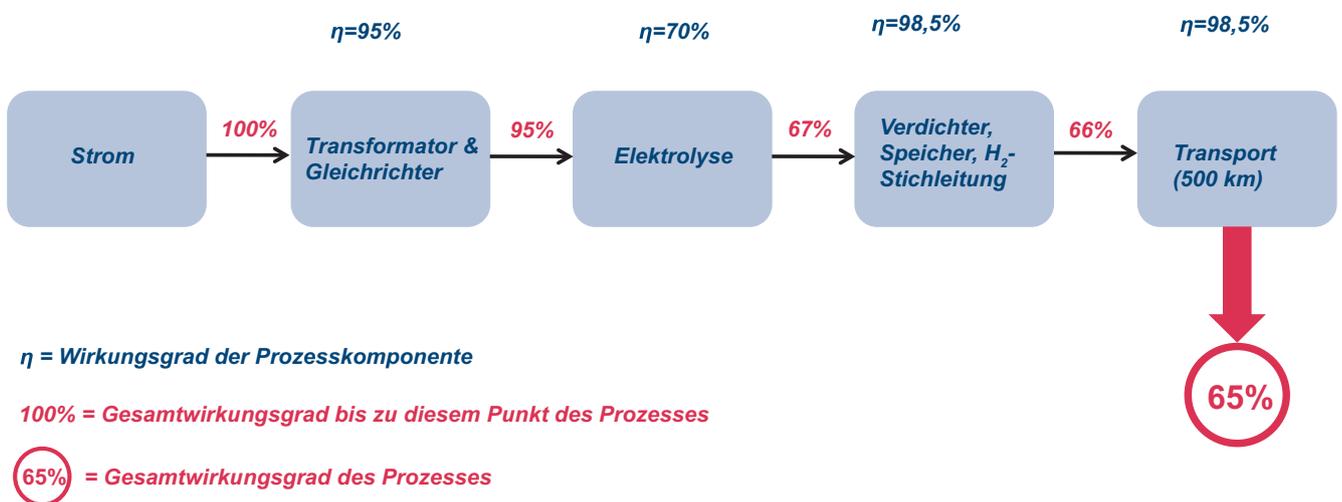


Abb. 5.1: Schematische Abbildung der Prozesskette Wasserstoffherzeugung über Wasserelektrolyse.

Der per PV- oder Windanlage produzierte Strom wird über Transformatoren und Gleichrichter auf die richtige Spannungsebene aufbereitet. Damit wird in der Elektrolyseeinheit Wasser in die Bestandteile Wasserstoff (H_2) und Sauerstoff (O_2) gespalten. Die Verdichtung auf den entsprechenden Druck, mit dem es ins Gasnetz eingespeist werden kann, gehört mit zur technischen Prozesskette, da dies ein relevanter Schritt zur Nutzbarmachung des Energieträgers ist.

Wie aus der Abbildung 5.1 ersichtlich, stehen im Energieträger Wasserstoff noch rund zwei Drittel der Energie zur Verfügung, die als Strom (100%) in den Prozess eingegangen ist.

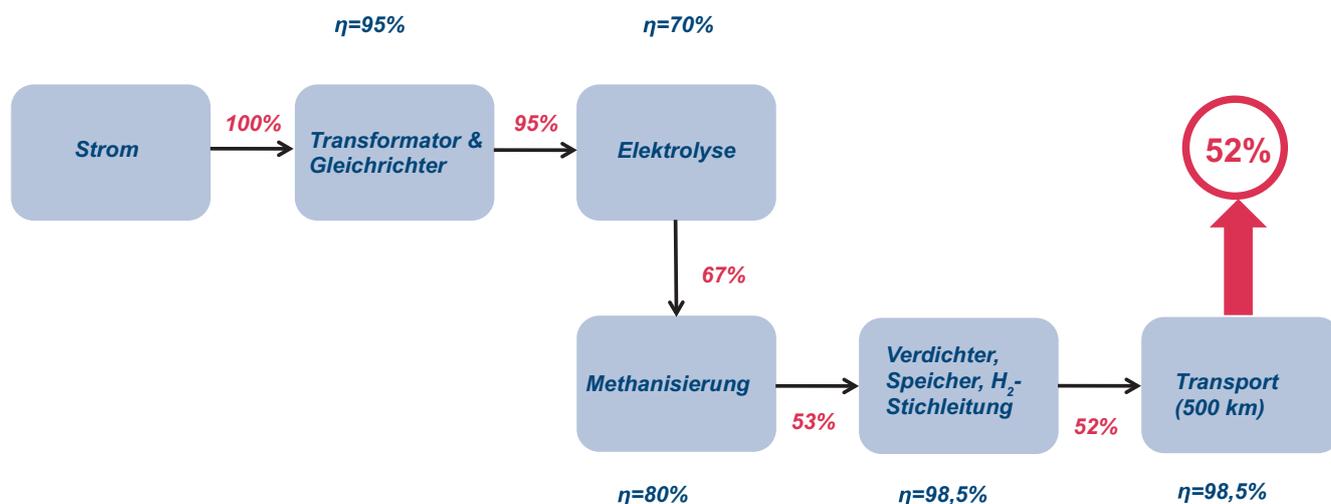
5.2.2 Power-to-Gas: EE-Methan

Die Erzeugung von synthetischem Methan (EE-Methan) setzt wie erwähnt auf der Wasserstoff-Produktion auf. Wie für den ersten Prozess, gilt auch hier, dass der Bezug von erneuerbarem Strom als Input gesetzt ist, damit ein treibhausgasneutraler Energieträger entsteht, der zur Dekarbonisierung der Industrie eingesetzt werden kann.

Die Prozesskette ist bis zur Elektrolyse identisch zum oben beschriebenen Verfahren. Das Produkt Wasserstoff wird jedoch aus der Elektrolyse in die Methanisierung weitergeleitet. Dort wird H_2 unter Zugabe von CO_2 nach der Sabatier-Gleichung zu Methan (CH_4) und Wasser (H_2O) reagiert.

Eine schematische Darstellung zeigt Abbildung 5.2, angelehnt an [5, 6, 8]. Aus dieser wird ersichtlich, dass die erweiterte und damit komplexere Prozesskette im Vergleich zur Wasserstoff-Produktion

tion einen geringeren Wirkungsgrad aufweist. Damit wird systemisch allerdings der Vorteil erreicht, dass das produzierte Gas ausschließlich aus Methan besteht und damit dem Erdgas im Netz in seiner Gasbeschaffenheit sehr ähnlich ist.



η = Wirkungsgrad der Prozesskomponente

100% = Gesamtwirkungsgrad bis zu diesem Punkt des Prozesses

52% = Gesamtwirkungsgrad des Prozesses

Abb. 5.2: schematische Abbildung der Prozesskette EE-Methan.

Zu beachten ist, dass als Input neben (erneuerbarem) Strom und Wasser auch CO_2 benötigt wird. Dieses in ausreichender Menge und Qualität (Reinheit) bereit zu stellen, kann eine logistische und auch ökonomische Herausforderung darstellen.

Auch wenn schon die Elektrolyse zu Wasserstoff technisch einen „Power-to-Gas“ Prozess darstellt, wird vor allem die Herstellung von Methan auf der beschriebenen Route als PtG verstanden.

5.2.3 Biomethan

Als dritte Option wird Biomethan als alternatives Gas betrachtet, obwohl es sich dabei um eine grundsätzlich andere Prozesskette handelt als die beiden zuvor beschriebenen. Biomethan beruht nicht auf Strom als Input, sondern kann auf Basis unterschiedlicher Rohstoffe durch Fermentation oder Vergasung erzeugt werden. Es handelt sich um Biogas, dem durch Aufbereitung (im Wesentlichen die Abtrennung des CO_2 -Anteils) die annähernd selbe Gasbeschaffenheit wie Erdgas gegeben wird.

Derzeit hat die Vergasungsrouten weniger Relevanz; in Deutschland wird Biomethan vor allem auf Basis nachwachsender Rohstoffe und zu geringen Teilen auf Abfall- und Reststoffen erzeugt. Im Gegensatz zu strombasierten Gasen, die auf der Annahme eines massiven Ausbaus von erneuerbarem Strom in großen Mengen produziert werden können, sind dem Potential von Biomethan Grenzen gesetzt, da die verfügbare Biomasse bzw. die Anbaufläche als zugrunde liegende Ressource begrenzt ist und zudem vielfältigen Nutzungskonkurrenzen unterliegt.

Es ist zudem zu beachten, dass im Gegensatz zu den oben beschriebenen Pfaden, Biomethan auf Basis nachwachsender Rohstoffe nicht treibhausgasneutral bereitgestellt werden kann. Nur bei Verwendung von recht hohen Anteilen an Gülle im Substrat ist es unter Umständen möglich, die Emissionen aus der Bereitstellung von Biomethan zu senken, so dass unter gewissen Umständen sogar eine Senke von CO_2 zu erzielen ist. Aussagen über die Treibhausgasbilanz von Biomethan können nicht vereinfacht und zusammengefasst werden, da diese grundlegend von den verwendeten Substraten und deren Herstellung sowie von der Prozessführung und Anlagenauslegung abhängig ist. Für einen Einstieg in die Problematik wird etwa auf [9, 10] verwiesen.

Trotzdem wird Biomethan eine gewisse Bedeutung für die Energiewende, insbesondere für die Dekarbonisierung des Gasnetzes zugeschrieben.

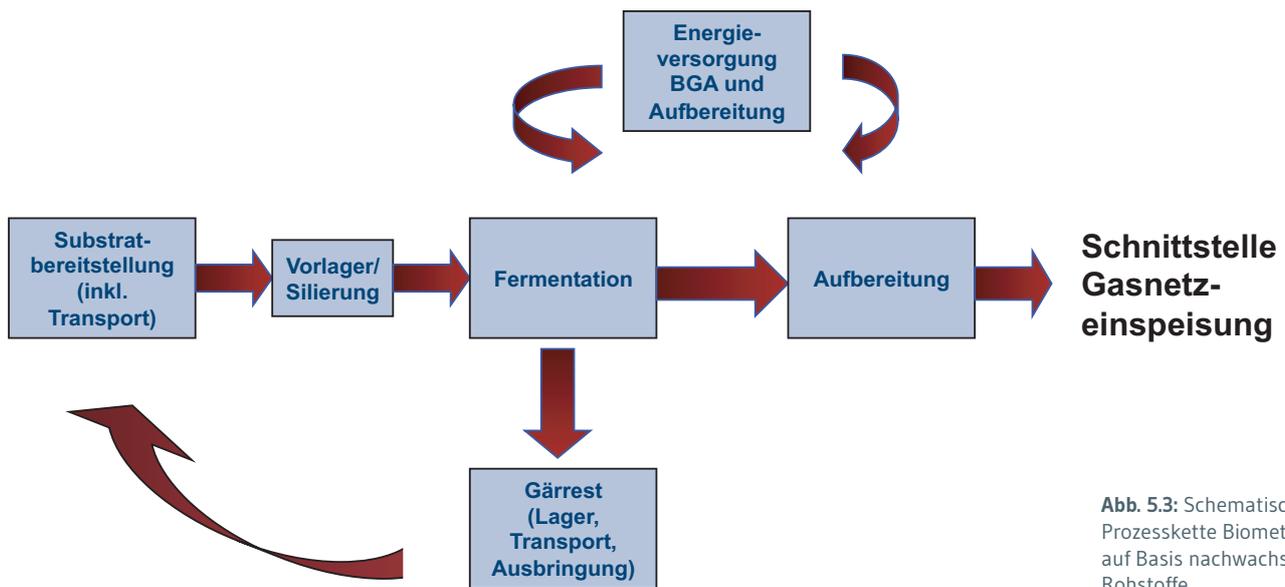


Abb. 5.3: Schematische Prozesskette Biomethan auf Basis nachwachsender Rohstoffe.

Abbildung 5.3 zeigt die schematische Prozesskette von Biomethan auf Basis nachwachsender Rohstoffe. Von besonderer Bedeutung ist die Aufbereitung, in der das zuvor erzeugte Biogas in Biomethan umgewandelt wird. Dazu wird das Gas zunächst entschwefelt und getrocknet. Der hohe Anteil von rund 47 % CO_2 im Biogas wird entweder abgetrennt, so dass Methan in hoher Reinheit (zuzüglich von biogenen Minoranteilen) übrig bleibt. In einem vergleichsweise neueren Prozess kann dem Biogas Wasserstoff beigegeben werden, so dass das CO_2 im Bioreaktor methanisiert wird und ebenfalls hohe Methananteile erreicht werden.

Als letzter Schritt der Aufbereitung kann das Biomethan konditioniert werden, um besser die Gasbeschaffenheit, die an der Einspeisestelle im Netz vorliegt, zu erreichen. Zur Konditionierung kann etwa LPG oder Sauerstoff zugegeben werden, je nachdem, ob der Wobbe-Index des Biomethans niedriger oder höher ist als der des Erdgases [2].

5.3 Synthetische Gase im Gasnetz

5.3.1 Regelwerk und derzeitige Situation

Alle technischen Unternehmungen mit Bezug auf die Gaswirtschaften, also die Ein- und Ausspeisung von Gasen ins und aus dem Gasnetz, die Durchleitung, sowie auch die Verwendung des Gases in Endgeräten, werden durch das Regelwerk des Deutschen Verein des Gas- und Wasserfaches (DVGW) geregelt. Diese technischen Regeln und DIN Normen bilden damit die Grundlage dessen, was auch in Bezug auf alternative Gase in Deutschland zulässig ist.

Die **G 260** regelt die Gasbeschaffenheit im Netz. Im Sinne des Verbrauchers soll die Gasbeschaffenheit, durch welche z.B. die verbrennungstechnischen Eigenschaften des Gases bestimmt sind, möglichst einheitlich sein. Die Gasbeschaffenheit wird durch Kennzahlen definiert, die durch ihr Zusammenspiel ein Kennfeld aufspannen, innerhalb dessen sich das Gas befinden muss, um dem Regelwerk zu genügen. Das Regelwerk sieht unterschiedliche Bereiche bzw. Bandbreiten für nieder- und hochkalorische Gase vor.

Die wesentlichen Kennzahlen sind der Wobbe-Index (gebildet durch den Brennwert und die Quadratwurzel der relativen Dichte) sowie die Dichte und der Brennwert als absolute Größen. Ebenfalls eine Rolle spielt die Methanzahl als Maß für die Klopfestigkeit in der Verbrennung.

Die Einspeisung von alternativen Gasen – eigentlich biogenen Gasen, aber auch Wasserstoff und synthetische Gase aus verschiedenen Quellen – wird durch das DVGW Arbeitsblatt **G 262** zur Beschaffenheit von Gasen aus regenerativen Quellen geregelt.

Von Bedeutung ist ebenfalls die **G 685** zur Gasabrechnung, da hier festgelegt ist, dass sich aus eichrechtlichen Gründen der Brennwert des eingespeisten Gases nicht um mehr als 2 % vom Abrechnungsbrennwert (innerhalb des Abrechnungszeitraums) unterscheiden darf. So wird sichergestellt, dass der Endkunde für die bezogene Energiemenge angemessen bezahlt.

Zusätzlich zu beachten ist die **DIN 51624** „Erdgas als Kraftstoff“. Diese gibt nochmal Kennwerte (Methanzahl und Dichte) vor, die gewährleisten, dass der Endverbraucher im Fahrzeug keine technischen Probleme an Motor und Tank bekommt.

Auf europäischer Ebene werden derzeit ebenfalls Anstrengungen unternommen, ein einheitliches Regelwerk für die Mitgliedsländer zu schaffen. In Arbeit bzw. in Abstimmung ist die **EN 16726** „Gasinfrastruktur - Gasbeschaffenheit Gruppe H“ in ihrer zweiten Version, nachdem in der ersten Fassung aufgrund fehlender Einigung keine brenntechnischen Kenndaten enthalten waren¹.

Neben den bereits genannten Kennwerten wie Wobbe, Dichte, Heizwert und Methanzahl spielen auch noch andere Komponenten wie Schwefel und Sauerstoff in der europäischen Diskussion eine Rolle.

Im deutschen Gasnetz befinden sich rund 860 Mrd. m³ Gas, das zu ca. 37 % aus Russland, 26 % aus Norwegen, 18 % aus den Niederlanden sowie rund 15 % aus inländischer Förderung stammt [11]. Je nach Herkunft unterscheiden sich die relevanten Kennzahlen der Gase voneinander, so dass die Gasbeschaffenheit unterschiedlich ist. Vor der Liberalisierung des Gasmarktes sind die Regionen in Deutschland zum überwiegenden Teil konstant mit jeweils einer Gasart versorgt worden, so dass die Endverbraucher sich auf die jeweilige Gasbeschaffenheit eingestellt haben. Seitdem diese Marktgebiete nicht mehr nur von einem Versorger betrieben werden, findet dementsprechend auch eine unterschiedliche Belieferung mit verschiedenen Gasarten statt. Die Gasarten bewegen sich in „Paketen“ durchs Gasnetz, so dass eine Änderung der Gasbeschaffenheit innerhalb weniger Minuten (beim Wechsel von einem „Paket“ zum anderen) vorliegen kann. Auch wenn sich alle Kennzahlen dabei innerhalb der vom Regelwerk vorgegebenen Kennfelder befinden, können solche Schwankungen z.B. für die zum Teil hoch sensiblen und spezialisierten Industrie-Brenner problematisch sein. Bei Haushaltsgeräten werden dagegen normalerweise keine Schwierigkeiten verursacht.

Auch durch die derzeit laufende Umstellung von L- auf H-Gas werden Änderungen bzw. Schwankungen in der Gasbeschaffenheit ausgelöst. Diese Umstellung hat im Jahr 2015 begonnen und soll bis 2029 abgeschlossen sein.

Nach [12] sind in 2018 rund 10.000 GWh Biomethan ins Erdgasnetz eingespeist worden. Damit hat im Vergleich zu den Vorjahren zwar weiterhin ein Zubau stattgefunden, dieser ist jedoch deutlich abgeflacht.

Die derzeit ins Erdgasnetz eingespeisten Mengen an Wasserstoff sind statistisch noch nicht erfasst, sie liegen wahrscheinlich aber auch noch unterhalb der Wahrnehmungsschwelle (wobei die lokale Situation davon abweichen kann, wenn konkrete Projekte durchgeführt werden).

5.3.2 Auswirkungen der Einspeisung von alternativen Gasen

Von den genannten alternativen Gasen Wasserstoff, Biomethan und EE-Methan dreht sich die Diskussion um mögliche Auswirkungen einer Einspeisung wesentlich um Wasserstoff, da dieses Gas in den brenntechnischen Eigenschaften teils erheblich vom Grundgas Erdgas abweicht (siehe Tabelle 5.1).

¹ <https://www.dvgw.de/themen/gas/gase-und-gasbeschaffenheit/erdgas>

Für Biomethan, das in der Gasbeschaffenheit dem russischen Erdgas recht ähnlich ist, ist es vergleichsweise einfach, die Anforderungen des DVGW Regelwerks zu erfüllen. Zum Teil wird mit LPG konditioniert; und auch wenn durch diese Zugabe das Gas nicht mehr als rein regenerativ angesehen werden kann, stellt es doch eine technisch (und ökonomisch) machbare Option dar.

EE-Methan besteht ausschließlich aus Methan (bis auf Minorkomponenten, die durch das CO₂, abhängig von seiner Herkunft, eingebracht werden könnten; diese sind aber in diesem Kontext zu vernachlässigen). Schwankungen in der Gasbeschaffenheit treten daher nicht auf.

Die folgenden Ausführungen beziehen sich daher ausschließlich auf Wasserstoff. Als Vorbemerkung sei gesagt, dass eine Konditionierung von Wasserstoff zum Einhalten der Kennwerte, analog zur LPG Konditionierung von Biomethan, in der Regel nicht zielführend ist, da die Effekte auf Dichte, Heizwert und Methanzahl gegenläufig sind, was eine Konditionierung sehr komplex und damit auch teuer macht.

Bei der Einspeisung ins Gasnetz ist das geltende Regelwerk einzuhalten, das einzuspeisende Gas muss sich also innerhalb des Kennfelds bewegen, das durch das im Netz befindliche Gas vorgegeben ist. Damit besteht die erste Herausforderung darin, dieses Kennfeld zu kennen und zu wissen, mit welcher der verschiedenen, im Netz befindlichen Gasarten man es zu tun hat.

Aufgrund der unterschiedlichen Eigenschaften kann Wasserstoff in unterschiedlichen Konzentrationen eingespeist werden. Der zuerst limitierende Wert der Gaskennwerte ist die relative Dichte. Ausgehend von russischem Erdgas H als Grundgas, würden schon kleinere Zumischungen (ca. 3-4 Vol.-%) zum Verlassen des Erdgas-H-Kennfeldes nach DVGW Arbeitsblatt G 260 führen [2]. Für Erdgas Holland-L und Norwegen-H sind dagegen bis zu 15 Vol.-% hinsichtlich der relativen Dichte realisierbar.

Zusätzlich zu den Kennfeldern des Regelwerks müssen Auswirkungen auf einzelne Komponenten des Gasnetzes sowie der Verbraucher berücksichtigt werden, um mögliche Auswirkungen einer Wasserstoff-Beimischung abzuschätzen. Die wesentlichen Elemente sind

- Gas Verdichter,
- Regel- und Messstellen,
- Gasspeicher,
- Gasturbinen
- Tanks von Erdgasfahrzeugen

Wie oben bezüglich der DIN Norm „Erdgas als Kraftstoff“ schon erwähnt, gelten die Tanks von Erdgasfahrzeugen (insbesondere die noch in Betrieb befindlichen älteren Modelle) als die derzeit sensitivsten Endanwendungen. Auf die Besonderheiten bei der Anwendung in industriellen Brennern wird im Kapitel 6 eingegangen.

Transportleitungen und Verdichter:

Transportleitungen sind nur geringen dynamischen Belastungen ausgesetzt, so dass das Material der Rohrleitung nur wenig strapaziert wird. Daher wird die Beimischung von Wasserstoff im Transportnetz bis zu 50 % als unproblematisch angesehen [3]. Aufgrund der geringeren Energiedichte von Wasserstoff führt die Beimischung allerdings zu Effizienzverlusten des Gasnetzes.

Gasturbinen:

Je nach Ausführung der Turbine und abhängig vom Hersteller sind Gasturbinen nur begrenzt mit Wasserstoff zu beaufschlagen, so dass die Nutzung „Verstromung per Gasturbine“ eine Grenze für

die prozentuale Beimischung von Wasserstoff ins Erdgas darstellt. Während Gasturbinen mit modernen Vormischbrennern Mischgase aus Erdgas und Wasserstoff mit bis zu 10 Vol.-% oder sogar 15 Vol.-% an Wasserstoff verwenden können [3], gibt es andere, zumeist ältere Ausführungen, die eine maximale Zuschmischgrenze von 1 Vol.-% aufweisen. Die Erhöhung des H₂-Anteils im Brenngas bringt eine Erhöhung der Flammenausbreitungsgeschwindigkeit sowie einer Änderung der Flammgeometrie mit sich. Die Flamme wird instabil, so dass Flammverlust droht, der zur unplanmäßigen Abschaltung der Anlage führt. Erhöhte Temperaturspitzen verursachen zudem höhere Emissionswerte. Im Extremfall kann es zu einem sogenannten Flammenrückschlag kommen, welcher eine thermische Überlastung bis zur Zerstörung der Brennkammer auslösen kann [3].

Kavernen- und Porenspeicher:

Die saisonale Speicherung von Erdgas erfolgt in Deutschland in unterirdischen Kavernen- und Porenspeichern mit einer aktuellen Kapazität von ca. 28 Mrd. m³ Arbeitsgas, wobei die Kavernenspeicher deutlich überwiegen [13]. Hinsichtlich der Einspeicherung von Wasserstoff und oder Mischgas kann auf die Erfahrungen mit Stadtgas mit seinem hohen Wasserstoffanteil von rund 55 Vol.-% aus den 1970er Jahren zurückgegriffen werden. Demnach sind Kavernenspeicher recht unproblematisch zu nutzen, während in Porenspeichern mit hoher Wahrscheinlichkeit Sulfat-reduzierende Bakterien vorkommen. In der Folge wird Wasserstoff mit dem Sulfat des Schichtwassers zu Schwefelwasserstoff umgesetzt. Das führt zum einen zum Speicherverlust, zudem muss der korrosive Schwefelwasserstoff bei der Ausspeicherung wieder abgetrennt werden, was negativ für die Betriebskosten ist [3]. Kavernenspeicher verfügen über eine deutlich kleinere Oberfläche, auf welcher das oben beschriebene Bakterienwachstum stattfinden kann.

Für beide Speichertypen muss im Einzelfall untersucht werden, welche Werkstoffe, Bauteile und Zemente verwendet worden sind und inwiefern diese sich für Wasserstoff und Mischgas eignen oder ob und in welchem Umfang nach- bzw. umgerüstet werden muss. Tonsteinschichten, die im Porenspeicher teilweise vorkommen, sind zwar für Erdgas ausreichend dicht, für Wasserstoff aber durchlässig, so dass diese Speicher nicht für Mischgase genutzt werden können.

Gasmessung:

Ein wesentlicher zu beachtender Aspekt hinsichtlich der Wasserstoffeinspeisung bzw. der Beimischung zum Erdgas ist die Gasmessung bzw. Bestimmung des Brennwertes. Durch die Zumischung von H₂ wird der Brennwert des Erdgases verringert. So führt beispielsweise bei Beimischung von 1 Vol.-% Wasserstoff eine ungefähre Brennwertminderung des Mischgases von 0,7 % nach sich [3]. Die Eichfehlergrenze nach Eichverordnung liegt für Wasserstoff bei 0,2 %, d.h. mit dieser Messgenauigkeit müssen Gasmessgeräte den Wasserstoffanteil bei der Gaseinspeisung messen können. Aktuell können die meist auf Helium basierenden eingesetzten Prozess-Gaschromatographen (PGC) den Wasserstoffanteil nicht genau genug messen. Zum Teil liegt das daran, dass die Messgeräte nicht speziell für die Erkennung von H₂ konstruiert worden sind, sondern diesen nur als Störgröße erfassen. Folglich müssten die PGC nachgerüstet oder neue Gasmessgeräte installiert werden, welche für den Anwendungsfall ausgelegt sind.

Die Brennwertmessung ist zudem Grundlage für die Gasabrechnung und daher auch unabhängig von technischen Aspekten für wirtschaftliche Aspekte beim Endverbraucher relevant.

5.4 Literaturverzeichnis

- [1] Wuppertal Institut; ISI; IZES (2018): Technologien für die Energiewende. Teilbericht 2 an das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi). Wuppertal, Karlsruhe, Saarbrücken.
- [2] Krause, H.; Wersch, M.; Franke, S.; Giese, A.; Benthin, J.; Dörr, H. (2014): Untersuchungen der Auswirkungen von Gasbeschafftheitsänderungen auf industrielle und gewerbliche Anwendungen. Herausgeber DVGW. Freiberg, Essen, Karlsruhe: GWL; BDI; DVGW Forschungsstelle.
- [3] Müller-Syring, G.; Henel, M.; Köppel, W.; Mlaker, H.; Sterner, M.; Höcher, T. (2013): Entwicklung von modularen Konzepten zur Erzeugung, Speicherung und Einspeisung von Wasserstoff und Methan ins Erdgasnetz. DVGW Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches eV, Bonn.
- [4] Nitschke-Kowsky, P.; Schenk, J.; Schley, P.; Altfeld, K. (2012): Gasbeschafftheiten in Deutschland. Essen: GWL. https://scifo.de/en/nc/detail/media/show/Product/?tx_acmmam_acmmam%5Buid%5D=3120&tx_acmmam_acmmam%5Bobject%5D=product&cHash=faa63b39849824fe31b807934a0b98bb
- [5] Dehli, M. (2014): Power-to-Gas - Speicherung von Strom aus Windkraft- und Photovoltaikanlagen in der Erdgasinfrastruktur. <http://btga.de/almanach/2014/078-087.pdf>
- [6] Fischer, B. (2018): Identifikation und Bewertung von „no-regret“-Einstiegsmärkten für Power-to-Gas Konzepte. Wuppertal.
- [7] Dörr, H.; Kröger, K.; Graf, F.; Köppel, W.; Burmeister, F.; Senner, J.; Nitschke-Kowsky, P.; Weßing, W. (2016): Untersuchungen zur Einspeisung von Wasserstoff in ein Erdgasnetz. Energie Wasser-Praxis - Fortschung & Entwicklung 50–59.
- [8] Zapf, M. (2017): Stromspeicher und Power-to-Gas im deutschen Energiesystem: Rahmenbedingungen, Bedarf und Einsatzmöglichkeiten (1. Auflage.). Wiesbaden: Springer Vieweg.
- [9] Arnold, K.; Vetter, A. (2010): Klima- und Umwelteffekte von Biomethan: Anlagentechnik und Substratauswahl. Wuppertal Institut, Wuppertal Papers 182.
- [10] O`Keeffe, S.; Franko, U.; Oehmichen, K.; Daniel-Gromke, J.; Thrän, D. (2019): Give them credit - the greenhouse gas performance of regional biogas systems. GCB Bioenergy 11 (6) 1–18. doi: 10.1111/gcbb.12603.
- [11] Müller-Syring, G.; Große, C.; Glandien, J.; Eyßer, M. (2016): Kritische Überprüfung der Default-Werte der Treibhausgas- vorkettenemissionen von Erdgas. Abschlussbericht im Auftrag von Zukunft Erdgas. Leipzig: DBI Gas- und Umwelttechnik GmbH.
- [12] dena (2019): Branchenbarometer Biomethan 2019. Berlin: Deutsche Energie Agentur GmbH. https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2019/dena-Analyse_Branchenbarometer_Biomethan_2019.pdf
- [13] LBEG (2016): Untertage-Gasspeicherung in Deutschland. ERDÖL ERDGAS KOHLE 11 (132) 409–417.

6 HEMMNISSE EINER FLEXIBILISIERUNG DER BEREITSTELLUNG VON PROZESSWÄRME IN DEN ENERGIEINTENSIVEN INDUSTRIEN DURCH HYBRIDISIERUNG, SYNTHETISCHE GASE UND THERMISCHE SPEICHER

Verantwortliche Autoren

Karin Arnold karin.arnold@wupperinst.org
 Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH, Döppersberg 19, 42103 Wuppertal
 Georg Holtz georg.holtz@wupperinst.org
 Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH, Döppersberg 19, 42103 Wuppertal

6.1 Einleitung

Hybridisierung, die Verwendung synthetischer Gase und thermische Speicher stellen Ansätze dar, um Flexibilität in der industriellen Stromnachfrage zu erschließen. Der Fokus der Untersuchungen bzgl. der (potenziellen) Stromnachfrage lag in den diesem Kapitel zugrunde liegenden Arbeiten dabei auf der Bereitstellung von Prozesswärme für temperaturbedingte Prozessschritte wie Schmelzen, Sintern etc. auf unterschiedlichen Temperaturniveaus. Zudem beschränkt sich die Analyse auf die Nachrüstung bestehender Produktionsanlagen¹. Die am Projekt beteiligten Branchenvertreter haben die in Tabelle 6.1 aufgeführten spezifischen Prozesse ausgewählt, für die die obige Ansätze untersucht wurden (vgl. Kapitel 8 bis 12).

Tabelle 6.1: In den Branchen bzgl. der jeweiligen Flexibilisierungsansätze untersuchte Prozesse

	Hybridisierung	Synthetische Gase	Thermische Speicher
Stahl	Brammenerwärmung; Vorwärmung von Verbrennungsluft	Reduktionsprozesse mit wasserstoffhaltigen Gasen	Schrottvorwärmung; Brammenerwärmung; Winderhitzer
Chemie	Bereitstellung von Prozessdampf	–	Bereitstellung von Prozessdampf
Zement	Kalzinator; Drehrohrofen	–	Verwendung von Kalziumoxid als thermochemisches Speichermedium
Glas	Glasschmelzwanne	Glasschmelzwanne	Behälterglasherstellung: Gemengevorwärmung; Flachglasherstellung: Zinnbad, Kühlprozess; Vorwärmung von Verbrennungsluft;
Feuerfest	Vorwärmzone von Durchschuböfen; Vorwärmung von Verbrennungsluft; Trocknung der Vorprodukte	Durchschuböfen	Trocknung der Vorprodukte; Vorwärmung von Verbrennungsluft; Wärmeeintrag in Vorwärmzone der Brennöfen

¹ Die Untersuchung der Flexibilität von disruptiven Ansätzen zur Dekarbonisierung der energieintensiven Industrien (sog. low-carbon break-through Technologien) ist für eine beantragte Fortführung des SynErgie-Projekts vorgesehen.

Die Hemmnisanalyse begleitete und unterstützte die Analyse der Machbarkeit der Anwendung obiger Ansätze in den untersuchten Prozessen durch die Herausarbeitung möglicherweise auftretender Hemmnisse und möglicher Schritte zur Überwindung dieser Hemmnisse. Die Hemmnisanalyse wurde anhand des im folgenden Unterkapitel vorgestellten Analyserahmens und entsprechend dem im selben Unterkapitel dargelegten Vorgehen durchgeführt. Die Ergebnisse aus den Gesprächen mit den Branchenvertretern sowie aus komplementär hinzugezogener Literatur werden im Folgenden entlang der drei betrachteten Flexibilisierungsansätze (Hybridisierung, synthetische Gase, thermische Speicher) sowie der untersuchten Hemmnisdimensionen (technisch, organisatorisch, ökonomisch, regulatorisch) branchenübergreifend zusammengeführt, soweit möglich generalisiert darstellt, und mit konkreten Beispielen aus den untersuchten Branchen illustriert.² Ergänzend zu den Hemmnissen wurden auch branchenübergreifend anwendbare, vielversprechende Flexibilisierungsansätze („Flexibilisierungsmöglichkeiten“) identifiziert.

6.2 Vorgehen

Um die Hemmnisse zu erheben wurde für die Branchen Chemie, Stahl und Feuerfest je ein semi-strukturiertes vor-Ort Interview von ca. drei Stunden Länge mit Branchen- bzw. Unternehmensvertretern durchgeführt, in dem neben Hemmnissen zunächst auch grundlegende Prozesseigenschaften sowie prinzipielle Möglichkeiten zur Einbindung der untersuchten Ansätze in die Produktionsprozesse dargestellt und diskutiert wurden. Mit Vertretern der Glasbranche wurden zwei solche Gespräche geführt, wovon eines speziell auf die Flexibilisierungsoptionen in der Flachglasproduktion fokussierte.³ Für die Zementbranche fand eine Auswertung von Fachliteratur statt. Nach Fokussierung auf einen relevanten Themenbereich wurden technologischen Potentiale und Hemmnisse in einem 1,5-stündigen telefonischen Gespräch mit einem Branchenvertreter diskutiert. Die Gespräche für die Branchen Chemie, Stahl, Glas und Feuerfest wurden in Protokollen festgehalten, die im Nachgang nochmals von den interviewten Branchenvertretern verifiziert wurden. Die in den Interviews gewonnenen Erkenntnisse wurden durch eigene Literaturrecherche untermauert und ergänzt.

Zur Strukturierung der Interviews wurde ein Analyserahmen entwickelt. Im ersten Projektabschnitt wurde von uns bereits ein Analyserahmen für die damals durchgeführte Hemmnisanalyse entwickelt (vgl. [1]). Dieser fokussierte im Wesentlichen auf eine Flexibilisierung energieintensiver Prozessschritte und die diesbezüglichen Hemmnisse. D.h. der Fokus lag auf Eingriffen in die Produktionsprozesse selbst als Möglichkeit zur Flexibilisierung der Stromnachfrage. Im Gegensatz dazu zielen die in diesem Projektabschnitt untersuchten Ansätze (Hybridisierung, Verwendung synthetischer Gase, thermische Speicher) im Wesentlichen auf eine Flexibilisierung der Stromnachfrage ab, möglichst *ohne* den Produktionsprozess selbst zu stören. D.h. die im Produktionsprozess entstehende Nachfrage nach Prozesswärme soll jederzeit befriedigt werden. Hierzu wird die Flexibilisierung entweder in die Peripherie der Produktionsprozesse verlagert (z.B. Vorwärmen von Verbrennungsluft, Bereitstellung synthetischer Gase), oder der Wechsel zwischen Energieträgern (Hybridisierung) ist so zu gestalten, dass der Produktionsprozess nicht beeinträchtigt wird. Aufgrund dieses zentralen Unterschieds ist der im ersten Projektabschnitt entwickelte Analyserahmen nur bedingt für die Hemmnisanalyse bzgl. der in diesem Projektabschnitt untersuchten Ansätze geeignet.

Für die Hemmnisanalyse bzgl. Hybridisierung, Verwendung synthetischer Gase und thermischer Speicher wurde daher ein spezifischer Analyserahmen entwickelt, der (wie bereits im ersten Projektabschnitt) eine umfassende Sicht einnimmt, und neben technischen Hemmnissen auch organisatorische, regulatorische und ökonomische Hemmnisse erfasst (s. Abbildung 6.1). Zunächst wurden die technischen Möglichkeiten und Hemmnisse analysiert. Der Fokus der Analyse lag hier weniger auf generischen Eigenschaften bestimmter Wärmeerzeugungstechnologien an sich, sondern insbesondere auf dem Zusammenspiel dieser Eigenschaften von Wärmeerzeugungstechnologien mit den Charakteristika der betrachteten Produktionsprozesse. Insofern aus technischer Sicht vielversprechende Ansätze identifiziert werden konnten, wurden diesbezüglich auch die anderen Hemmnisdimensionen untersucht.

² Die Hintergründe der gewählten Beispiele sind in den jeweiligen Branchenkapiteln weiter ausgeführt.

³ Beim Gespräch zu Flexibilisierungsoptionen der Flachglasproduktion haben der Autor und die Autorin dieses Kapitel nicht vor Ort teilgenommen, sondern waren telefonisch zugeschaltet.

Technisch
<ul style="list-style-type: none"> • Prinzipielle Eignung (Temperatur-Niveau, Wärmeübertragungsweg, etc.) • Umsetzungsbedingungen (z.B. Platz, Infrastruktur, etc.)
Organisatorisch
<ul style="list-style-type: none"> • Notwendige organisatorische Anpassungen im Betrieb • Auswirkungen auf Bezugsstrukturen Strom und Gas
Regulatorisch
<ul style="list-style-type: none"> • Regularien des Strommarkts inkl. Entgelte, Umlagen und Steuern • Prozess- und anlagenseitige Regularien
Ökonomisch
<ul style="list-style-type: none"> • Benötigte Investitionen und Investitionsbedingungen • Auswirkungen auf Betriebskosten

Abb. 6.1: Analyserahmen

Die Ergebnisse der Gespräche wurden in einer vergleichenden Analyse branchenübergreifend geclustert und – soweit möglich – in generalisierter Form dargestellt. In die Ergebnisauswertung aufgenommen wurden diejenige der in den Expertengesprächen diskutierten Ansätze, bei denen eine Flexibilisierung mittels Hybridisierung, der Verwendung synthetischer Gase oder thermischer Speicher aus technischer Sicht prinzipiell möglich und sinnvoll⁴ erscheint. Da sich ökonomische Hemmnisse oft (auch) aus regulatorischen Zusammenhängen ergeben werden diese beiden Hemmnisdimensionen im Folgenden integriert diskutiert.

6.3 Ergebnisse der Hemmnisanalyse im Überblick

Tabelle 6.2 stellt die durch die Hemmnisanalyse identifizierten technischen, organisatorischen und regulatorisch/ökonomischen Hemmnisse sowie die identifizierten Flexibilisierungs-Möglichkeiten für die drei untersuchten Ansätze (Hybridisierung, synthetische Gase, thermische Speicher) branchenübergreifend im Überblick dar. Die Hemmnisse und Flexibilisierungs-Möglichkeiten werden in den nachfolgenden Unterkapiteln erläutert und mit Beispielen illustriert.

Tabelle 6.2: Ergebnisse der Hemmnisanalyse im Überblick

	Hybridisierung	Synthetische Gase	Thermische Speicher
Technische Hemmnisse	Eng aufeinander abgestimmte Produktionsanlagen und Erwärmungsverfahren; Auswirkungen des hybriden Betriebs auf die Produktionsanlage; Brenngas fehlt als Reaktionspartner oder Schutzgas im Prozess; Ausbau der Strominfrastruktur erforderlich;	Veränderte Flammeneigenschaften; Mess- und Regelungstechnik erforderlich	Wärmeübertragungsweg
Organisatorische Hemmnisse	Automatisierte Steuerung von Wärmeerzeugungsanlagen erforderlich; (Flexibilisierung des Gasbezugs)	Schwankende Gasqualität	Platzbedarf
Ökonomische / Regulatorische Hemmnisse	Kurze Refinanzierungszeiträume; Geringe Auslastung von Anlagenteilen; Fehlende Planungssicherheit für Investitionen; Hohe Stromkosten im Vergleich zu Kosten fossiler Energieträger	Kosten synthetischer Gase; Nachrüstbedarf Mess- und Regelungstechnik	Risiko bei „first-of-its-kind“ Anlage; Investitionskosten
Flexibilisierungsmöglichkeiten	Vorwärmung von Verbrennungsluft; Hybride Strahlheizrohre	E-Methan; Beimischung von H ₂ in begrenztem Umfang	Vorwärmung von Verbrennungsluft; Vorwärmung / Trocknung von Ausgangsstoffen

⁴ Z.B. wurden solche Fälle nicht weiter betrachtet, in denen die benötigte Prozesswärme oder Wärme für die Vorwärmung von Verbrennungsluft über Abwärme bereitgestellt wird.

6.4 Hybridisierung

Hybridisierung umfasst die Möglichkeit zwischen einer Bereitstellung von Prozesswärme aus fossilen Brennstoffen (i.d.R. Erdgas) und einer Wärmebereitstellung über strombasierte Verfahren (z.B. über induktive Erwärmung, Widerstandserwärmung oder Elektrodenkessel) zu wechseln. Dies ermöglicht u.a. auf Signale des Stromsystems zu reagieren, und somit eine Flexibilität der Stromnachfrage.

6.4.1 Technische Hemmnisse

Für die Bereitstellung von Prozesswärme in der Industrie gibt es prinzipiell eine Fülle verschiedener Verfahren.⁵ Für die Erwärmung mittels fossiler Brennstoffe stehen Industrieöfen und Brenner verschiedener Ausführungen zur Verfügung, die mit verschiedenen Brennstoffen (i.d.R. Brenngasen) genutzt werden können. Für die strombasierte Erwärmung steht eine Reihe elektrothermischer Verfahren zur Auswahl, die z.B. mittels induktiver, dielektrischer oder konduktiver Erwärmung arbeiten. Die Verfahren unterscheiden sich in ihren Eigenschaften (z.B. Leistungsdichte, Erwärmungsgeschwindigkeit, thermischer Wirkungsgrad, Steuer-, Mess- und Dosierbarkeit, benötigte Atmosphäre) und möglichen Anwendungsgebieten – z.B. sind einige elektrothermische Verfahren nur auf leitende Materialien anwendbar oder es werden bestimmte chemische Reaktionsbedingungen benötigt – so dass zunächst die technische Anwendbarkeit verschiedener Verfahren für die untersuchten Prozesse überprüft werden muss. Aus diesen grundsätzlichen Betrachtungen sowie hinsichtlich der möglichen Einbettung verschiedener Verfahren in die bestehenden Produktionsanlagen und Produktionsketten wurden in den Interviews eine Reihe von technischen Hemmnissen deutlich, die im Folgenden kurz skizziert werden.

Eng aufeinander abgestimmte Produktionsanlagen und Erwärmungsverfahren

Bestehende Produktionsanlagen wurden im Hinblick auf ein gewähltes Produktionsverfahren ausgestaltet, um die Herstellung einer bestimmten Menge Produkt in einer bestimmten Qualität zu ermöglichen. Im Zuge des Anlagendesigns wurden u.a. die Größe und Geometrie der Produktionsanlage sowie das gewählte (fossile) Erwärmungsverfahren eng aufeinander abgestimmt. Verschiedene strombasierte und fossil-befeuerte Erwärmungsverfahren unterscheiden sich u.a. bzgl. der erreichbaren Temperatur-Niveaus, der Wärmeübertragungswege, sowie anderer charakteristischer Eigenschaften (s.o.). Die Möglichkeit zur Nutzung eines elektrothermischen Erwärmungsverfahrens – eine zentrale Voraussetzung für einen flexiblen hybriden Betrieb – ist im Rahmen der bestehenden Anlagen aufgrund der unterschiedlichen Charakteristika der Erwärmungsverfahren nicht immer ohne weiteres gegeben.

Beispiele:

- Durchschuböfen der Feuerfest-Industrie: Eine gleichmäßige Sinterung der auf den Ofenwägen verschachtelt gestapelten Produkte („Besatz“) wird durch eine Durchströmung der Produkte durch eine lange gleichmäßige Flamme erreicht. Der Wärmeübertrag erfolgt dabei im Wesentlichen über Wärmestrahlung des CO₂- und Wasser-Anteils der Flammengase und der Ofenatmosphäre (Gasstrahlung). Der durch die Brenner eingebrachte Impuls erzeugt zudem eine starke Strömung im Ofenraum, wodurch heißes strahlendes Gas auch in Bereiche des Besatzes gelangt, die nicht direkt von den Flammen erreicht werden. Die Geometrie der Öfen und das Erwärmungsverfahren sind eng aufeinander abgestimmt. Eine zentrale Herausforderung für den Einsatz elektrothermischer Erwärmungsverfahren besteht darin, einen gleichmäßigen und ausreichend hohen Wärmeübertrag auf den Besatz zu realisieren.
- Prozessdampfbereitstellung in der chemischen Industrie: Elektro- und Elektroden-Kessel erzeugen zunächst Sattdampf.⁶ Eine weitere Nachverdichtung des Dampfes ist zwar technisch möglich, aber teuer und derzeit nicht üblich. Um die Kondensationsverluste möglichst gering zu halten, wird im Dampfnetz jedoch überhitzter Dampf benötigt. Um die gewünschte Dampf-

⁵ Vgl. z.B. [8]

⁶ Sattdampf entsteht durch Erhitzen von Wasser zum Siedepunkt und der anschließenden Erhitzung um den Betrag der Verdampfungswärme. Bei weiterer Wärmezufuhr über den Siedepunkt hinaus entsteht überhitzter Dampf. Diese Form des Dampfes enthält keine Wassertröpfchen mehr und ist daher ein nicht sichtbares Gas. Bei Abkühlung von Sattdampf findet sofort eine Kondensation statt. Überhitzter Dampf kann bis zur Kondensationslinie abgekühlt werden, ohne dass eine Kondensation stattfindet.

qualität im Dampfnetz zu gewährleisten, kann Sattdampf nur bis zu einer gewissen Menge (ca. $\frac{1}{4}$ bis $\frac{1}{3}$ des gesamten Dampfolumens) und nicht zu konzentriert an nur einer bestimmten Stelle eingespeist werden. Elektro- und Elektroden-Kessel sind daher als Ergänzung, jedoch nicht ohne Weiteres als vollständiger Ersatz für Erdgaskessel, die überhitzten Dampf bereitstellen können, geeignet.

- Glasschmelzwannen: in der Glasschmelzwanne fallen sowohl Emissionen aus dem Verbrennungsprozess als auch prozessbedingte Emissionen beim Umwandeln und Schmelzen der Rohstoffe sowie durch Verdampfung aus der Schmelze an. Bei einer deutlichen Verkleinerung des Abgasvolumens durch Reduktion der Brennerleistung aufgrund eines höheren strombasierten Wärmeeintrags würde sich die Konzentration von Schadstoffen, die primär aus der Schmelze ausgasen, im Abgas erhöhen. Dadurch könnte ohne entsprechende Nachrüstung der Abgasreinigungsanlage die Einhaltung von Schadstoffgrenzwerten, die in der TA-Luft [2] oft pro m^3 Abgas festgelegt sind, gefährdet sein.
- Sinterung von Zementklinker: Eine Klinkerherstellung konnte mittels strombasierter Technologien wie Plasmabrenner und Mikrowellenerwärmung bislang nur im Labormaßstab erfolgreich demonstriert werden [3]. Eine zentrale Schwierigkeit für die Umsetzung elektrothermischer Verfahren im Maßstab einer industriellen Produktion besteht darin, auf einen sehr großen und nicht-leitenden Materialstrom eine ausreichend hohe Wärmeübertragung zu erreichen, um eine ausreichend große Menge Produkt zu erzielen [4]. Plasmabrenner erscheinen aus heutiger Sicht bzgl. dieses Gesichtspunkts vielversprechender als Mikrowellenerwärmung, und könnten ggf. leichter zur teilweisen Hybridisierung in bestehende Drehrohrofenanlagen integriert werden. Es verbleiben jedoch noch technische Fragen, die gelöst werden müssen. Zudem benötigen Plasmabrenner sehr große zusätzliche Mengen Strom mit entsprechend hohen Kosten. Für die Skalierung von Mikrowellenerwärmung zur Klinkerherstellung müssten gänzlich neue Anlagen entwickelt werden. Weitere Forschung und Entwicklung ist nötig, um elektrothermische Verfahren für die Klinkerherstellung im heute üblichen industriellen Maßstab nutzbar zu machen.

Auswirkungen flexibler Fahrweise auf die Produktionsanlage

Auch bei prinzipieller Eignung und Integrierbarkeit sowohl strombasierter als auch fossiler Wärmeerzeugungsverfahren in die Thermoprozessanlage kann ein Wechsel des Wärmeeintrags von fossil-basiertem auf strombasierten Wärmeeintrag (oder andersrum) im laufenden Prozess aufgrund der unterschiedlichen Eigenschaften der Wärmeeinträge unerwünschte Auswirkungen auf die Produktionsanlage haben.

Beispiele:

- Glasschmelzwannen: ein über längere Zeit (mehrere Stunden) veränderter Einsatz der elektrischen Zusatzheizung (unten in der Schmelze) bei gleichzeitigem Gegensteuern der Brenner (im Brennraum über der Schmelze) resultiert in einer Veränderung der Temperatur im Brennraum über der Schmelze. Diese Temperaturveränderung wirkt sich auf das Feuerfestmaterial des Brennraums aus, und bringt einen erhöhten Verschleiß mit sich.
- Glasschmelzwannen: da der Wärmeeintrag durch die elektrische Zusatzheizung und die Brenner an unterschiedlichen Stellen geschieht, kann sich bei Veränderung der jeweiligen Energieeinträge (über Zeiträume $>$ ca. 30 min) eine Veränderung der Strömungsverhältnisse in der Glasschmelzwanne ergeben. Dies wirkt sich auf die Produktqualität aus und birgt das Risiko von verfrühten Wannenschäden (Auswaschungen).
- Prozessdampfbereitstellung in der chemischen Industrie: ein sehr schnelles Umschalten zwischen E-Kesseln und Gaskesseln, wie es z.B. für die Bereitstellung von Regelleistung erforderlich ist, induziert Druckschwankungen im Dampfnetz. Dies stellt eine Begrenzung für die (anteilige) Leistung dar, die – insofern die Qualität des Dampfes gewährleistet ist – flexibel zwischen den verschiedenen Dampfbereitstellungsanlagen umgeschaltet werden kann.

Brenngas fehlt als Reaktionspartner oder Schutzgas im Prozess

In einigen Prozessen der energieintensiven Industrien spielen fossile Brenngase neben ihrer Funktion als Energieträger auch eine chemische Rolle im Brennprozess, da Verbrennungsprodukte des Gases als Reaktionspartner im Prozess oder als Schutzgas dienen. Bei einem Wechsel zu strombasierter Wärmebereitstellung wären entsprechend zusätzlich auf den jeweiligen Prozess abgestimmte Verfahren zur Einbringung alternativer Reaktionspartner oder Schutzgase zu entwickeln.

Beispiele:

- Brennöfen in der Keramik-Industrie: In einigen Bereichen der Keramik-Industrie ist eine genaue Kontrolle der Ofenatmosphäre (Sauerstoffanteil, Kohlenstoffanteil) erforderlich, da deren Zusammensetzung Einfluss auf das Produkt hat – z.B. auf die Farbe von Ziegeln und Porzellan. Einige Produkte durchlaufen bei ihrer Herstellung verschiedene Zonen des Ofens, in denen jeweils mit Luftüberschuss (oxidierendes Brennen) oder Luftmangel (reduzierendes Brennen) gefeuert wird.
- Stahlherstellung: Öfen zur Bereitstellung von Wärme für Anlagen zur Verzinkung von Stahl werden üblicherweise mit starkem Brenngasüberschuss betrieben, um Oberflächenoxidation zu vermeiden [5].

Ausbau der Strominfrastruktur erforderlich

Für die Bereitstellung von Prozesswärme werden große Energiemengen benötigt. Da diese Energiemengen bislang über fossile Energieträger bereitgestellt werden, sind viele Standorte der energieintensiven Industrien (bisher) nicht darauf ausgelegt, entsprechend große Energiemengen in Form von Strom zu beziehen und an die Produktionsanlage weiterzuleiten. Um die großen benötigten Strommengen bereitzustellen, müsste daher die Strominfrastruktur vieler Standorte nachgerüstet werden. Je nach Lage der Standorte im Stromnetz könnte auch eine Nachrüstung der vorgelagerten Verteilnetze erforderlich sein, bzw. müsste ein direkter Anschluss an eine höhere Netzebene in Erwägung gezogen werden.

Beispiele:

- Prozessdampfbereitstellung in der chemischen Industrie: Der interviewte Betreiber eines Chemieparks gab an, dass eine signifikante Erhöhung der Einspeisung von Dampf aus E-Kesseln (z.B. Zubau von E-Kesseln mit einer Gesamtleistung von 200 MW) eine Abstimmung mit dem Netzbetreiber sowie ggf. einen direkten Anschluss ans Übertragungsnetz erforderlich machen würde.
- Glasschmelzwanne: Der interviewte Anlagenbauer berichtet, dass bei einem Kunden die Dimensionierung der elektrischen Zusatzheizung aufgrund der aktuellen Stromverfügbarkeit am Standort begrenzt werden musste bzw. nicht im gewünschten Maße erhöht werden konnte.
- Herstellung von Zementklinker: Eine teilweise Elektrifizierung des Verfahrens scheint nach heutigem Kenntnisstand am ehesten für den Prozessschritt der Kalzinierung technisch umsetzbar zu sein [3,4]. Für die Kalzinierung werden ca. 60 % des gesamten thermischen Energieeinsatzes der Zementklinkerproduktion benötigt. Um die für diesen Prozess nötige Energie strombasiert bereitzustellen, wären für die Produktionskapazität eines neueren Zementwerks mit 3000 t Klinkerproduktion pro Tag zusätzlich Strommengen von bis zu 1,4 GWh/Tag⁷ erforderlich. Dem gegenüber steht ein heutiger Strombedarf für die Zementproduktion von ca. 340 MWh/Tag, der i.d.R. als Grundlage für die Dimensionierung der Strominfrastruktur zugrunde gelegt ist. Die Strominfrastruktur müsste also mindestens auf die fünffache Anschlussleistung ausgebaut werden, um den Energiebedarf der Kalzinierung decken zu können.

⁷ Strombedarfe errechnet aus Daten gemäß [4], Tabelle 6: thermischer Energieeinsatz (gesamt) 3131 TJ/Jahr; elektrischer Energieeinsatz 448 TJ/Jahr.

6.4.2 Organisatorische Hemmnisse

Um Flexibilität im Alltagsbetrieb regelmäßig anzubieten, müssen innerbetriebliche Ablaufprotokolle und Entscheidungsbefugnisse definiert und standardisiert werden. Zudem ist – insbesondere für Flexibilitätsabrufe mit geringer Vorlaufzeit – eine Möglichkeit zur zentralen Steuerung der entsprechenden Anlagen sowie möglichst eine Automatisierung erforderlich. Bei einer Hybridisierung von Prozessen ist des Weiteren zu berücksichtigen, dass ein flexibler Bezug von Strom bei gleichbleibendem Wärmeeintrag in den Produktionsprozess eine dem Strombezug gegenläufige Veränderung des Bezugs von Gas⁸ mit sich bringt, die ebenfalls organisatorisch abgebildet werden muss. Die Interviews zeigten, dass diese Erfordernisse in einigen Fällen die im Folgenden dargelegten organisatorischen Hemmnisse aufwerfen.

Automatisierte Steuerung von Wärmeerzeugungsanlagen erforderlich

Ein routinemäßiger und ggf. mehrmals pro Woche durchzuführender Wechsel zwischen strom- und gasbetriebenen Wärmeerzeugungsanlagen erfordert eine entsprechende Automatisierung der Abläufe. Hierfür sind nicht in allen Branchen in der Mehrheit der Betriebe die technischen Voraussetzungen bereits gegeben. Eine Automatisierung erfordert zudem eine Festlegung von Steuerungsparametern, die zunächst entwickelt und getestet werden müssen.

Beispiele:

- Glasschmelzwannen: Eine Automatisierung eines flexiblen hybriden Betriebs wäre prinzipiell rechnergestützt über Expertensysteme möglich. Der Abgleich des Wärmeübertrags aus den Brennern und aus der elektrischen Zusatzheizung ist aufgrund unterschiedlicher Wirkungsgrade und Wärmeeintragsorte der Verfahren jedoch kompliziert. Für das Erstellen der Parameter eines Expertensystems würde deshalb Messtechnik an verschiedenen Stellen des Prozesses benötigt, um die Auswirkungen verschiedener Fahrweisen zu erfassen. Solche Messtechnik ist an den Standorten der Glasindustrie i.d.R. noch nicht installiert.
- Glasschmelzwannen: Die Standorte in der Glasindustrie sind historisch gewachsen und es gibt selten zwei genau baugleiche Wannen. Zudem verändert sich jede Wanne unter dem Einfluss der hohen Temperaturen des Glasschmelzprozesses über die Zeit. Eine Übertragbarkeit von Erfahrungen bzgl. der Parameter für die Einstellung der Wärmebereitstellungsanlagen von anderen Anlagen oder aus früheren Zeiträumen ist daher immer nur begrenzt möglich. Für die Einstellung der Parameter eines Expertensystems (s.o.) wäre daher eine längere Experimentierphase nötig. Eine solche Experimentierphase einzurichten ist nur zu bestimmten Phasen der Wannenlebensdauer möglich (zu Beginn und am Ende, d.h. bei gegebenen Wannenlaufzeiten von Glasschmelzwannen von bis zu 15 Jahren sehr selten).
- Durchschuböfen in der Keramikindustrie: Die für die Glasschmelzwannen geschilderten Hemmnisse (Fehlende Messtechnik zur Erfassung der Auswirkungen verschiedener Fahrweisen, geringe Übertragbarkeit von Erfahrungen zwischen Anlagen) treffen in analoger Weise zu.

Flexibilisierung des Gasbezugs

Ein flexibler Strombezug bei einer hybriden Anlagenkonfiguration bringt die Notwendigkeit eines flexiblen Gasbezugs mit sich. Rein technisch gesehen ist der flexible Bezug von Gas aus dem Gasnetz jederzeit möglich. Auch aus organisatorischer Sicht wird ein flexibler Bezug von Gas von den zu dieser Thematik befragten Interviewpartnern als prinzipiell machbar und eher unproblematisch (und damit höchstens als schwaches Hemmnis) eingeschätzt. Möglicherweise müssten bestehende Verträge mit dem Gasanbieter angepasst werden, um einen flexiblen Bezug vertraglich abzubilden. Die dadurch evtl. entstehenden Mehrkosten für den Gasbezug wurden jedoch als vergleichsweise niedrig eingeschätzt.

⁸ In den Fällen in denen Erdgas als fossiler Energieträger dient

6.4.3 Ökonomische / Regulatorische Hemmnisse

Eine Investition in eine hybride Anlagenkonfiguration ist aus heutiger Sicht für Unternehmen nicht zwingend, sondern eine Möglichkeit, die aus unternehmerischer Sicht in Betracht gezogen wird, falls sich die Investition und der Betrieb der Anlage (voraussichtlich) lohnen. Die Wirtschaftlichkeit einer hybriden Anlage ist dabei stark abhängig von regulatorischen Rahmenbedingungen, und das Kalkül muss den betriebswirtschaftlichen Erwartungen des beteiligten Unternehmens genügen. Aus diesen und anderen Einflussfaktoren auf die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung ergeben sich die folgenden Hemmnisse.

Kurze Refinanzierungszeiträume

Investitionen in Anlagenteile, die nicht essentiell in den Produktionsprozess eingebunden oder auf andere Weise unverzichtbar sind, sollen sich entsprechend der Finanzpraxis der Unternehmen in vergleichsweise kurzen Zeiträumen rechnen. Die interviewten Experten machten Angaben zur üblichen Amortisationszeit von nur wenigen Jahren („unter 3 Jahre“; „< 5 Jahre“). Entsprechend hoch müssten die Erlöse für die Bereitstellung von Flexibilität ausfallen, um eine Investition in eine Hybridisierung einer Anlage aus finanzieller Sicht und unter heutigen Randbedingungen attraktiv erscheinen zu lassen.

Beispiele:

- Prozessdampfbereitstellung in der chemischen Industrie: Investitionen in zusätzliche E-Kessel sind prinzipiell denkbar, müssten sich jedoch innerhalb weniger Jahre rechnen. Ein entsprechender business case ist derzeit nicht ersichtlich.
- Glasschmelzwannen: ein Ausbau der elektrischen Zusatzheizung mit dem Ziel einer Flexibilisierung des Betriebs müsste sich innerhalb weniger Jahre refinanzieren. Zu berücksichtigen ist neben dem Strompreis in diesem Fall zudem, dass ein solcher Eingriff in das zentrale Asset (die Glasschmelzwanne) das Risiko von Wannenschäden birgt. Aufgrund der sehr langen Amortisationszeiten bei Glasschmelzwannen verhalten sich die Unternehmen der Branche bzgl. Eingriffen in die Wanne i.d.R. risiko-avers. Entsprechend hoch müsste die Gewinnerwartung aus einer Flexibilisierung ausfallen, um eine Investition in einen Ausbau der elektrischen Zusatzheizung attraktiv zu machen.

Geringe Auslastung von Anlagenteilen

Ein flexibler Betrieb einer hybriden Anlage impliziert, dass dafür sowohl Anlagenteile zur fossil-basierten sowie zur strombasierten Erwärmung benötigt werden, obwohl aus produktionstechnischer Sicht eine einzige Erwärmungsanlage ausreichend wäre. Bei einem flexiblen hybriden Betrieb sind beide Erwärmungsanlagen demnach jeweils nur zeitweise im Einsatz. Der resultierende, vergleichsweise geringe, Auslastungsgrad dieser Anlagenteile muss in einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der dafür getätigten Investitionen berücksichtigt werden. Für eine Wirtschaftlichkeit flexibel betriebener hybrider Anlagenteile muss die niedrige Auslastung durch entsprechend hohe Erlöse aus einer Vermarktung von Flexibilität kompensiert werden.

Fehlende Planungssicherheit für Investitionen

Im Rahmen der Energiewende ändern sich die regulatorischen Rahmenbedingungen als auch das Marktgeschehen in vergleichsweise kurzen Zeiträumen. Eine Absicherung zukünftiger Erlöse aus der Vermarktung von Flexibilität ist derzeit an den Strommärkten jedoch nicht möglich, da keine entsprechenden Produkte angeboten werden. Für Investitionen in eine Hybridisierung gibt es daher derzeit oftmals keine ausreichende Planungssicherheit. Dem gegenüber steht, dass Banken Sicherheiten einfordern, bevor sie Investitionen finanzieren.

Beispiele:

- Prozessdampfbereitstellung in der chemischen Industrie: Der interviewte Chemieparkbetreiber investierte in der Vergangenheit in einen E-Kessel zur Bereitstellung von negativer Regelleistung. Durch einen Rückgang der aus der Bereitstellung von Regelleistung erzielbaren Erlöse (im Zeitraum seit ca. 2011; [6]) refinanzierte sich die Investition nicht im zuvor prognostizierten Zeitraum.
- Ein ähnlicher Erfahrungsbericht liegt aus der Papierindustrie⁹ vor. Dort wurde ebenfalls in einen Boiler zur Bereitstellung von Regelleistung investiert, und Erlöse in der erhofften Höhe konnten nicht erzielt werden.

Hohe Stromkosten im Vergleich zu Kosten fossiler Energieträger

Die Kosten zur Bereitstellung von Prozesswärme mittels Strom sind im Vergleich zur Bereitstellung von Prozesswärme mittels fossiler Energieträger heutzutage sehr hoch. Als zentraler Grund wurde hierfür von einigen Interviewpartnern „administrative Aufschläge“ auf den Strompreis genannt, die unabhängig vom Börsenstrompreis pro bezogener kWh anfallen.

Der Strompreis eines Industriebetriebs mit hohem Stromverbrauch wird i.d.R. kundenindividuell mit dem Lieferanten vereinbart, und oftmals werden die Lieferpreise mit den Großhandelspreisen indiziert [6]. Für den Abnahmefall „Industriekunde“¹⁰ ermittelte die Bundesnetzagentur [6] für das Jahr 2018 eine Spanne für den Strompreis von 14,01 - 16,49 ct/kWh.¹¹ Die vom Lieferanten beeinflussbaren Preisbestandteile umfassten dabei einen Anteil von 2,85 - 4,50 ct/kWh. Die restlichen Preisbestandteile ergeben sich aus verschiedenen Umlagen, dem Netzentgelt sowie der Stromsteuer und der Konzessionsabgabe. Die höchsten Preisbestandteile entfallen dabei auf die EEG-Umlage (6,79 ct/kWh), die Netzentgelte (1,55 - 3,27 ct/kWh) sowie die Stromsteuer (2,05 ct/kWh).

Aufgrund der hohen Relevanz dieser Preisbestandteile für den vom Industriekunden zu entrichtenden Strompreis haben spezielle gesetzliche Regelungen zur möglichen Reduktion bestimmter Preisbestandteile für stromintensive Unternehmen eine hohe Relevanz. Falls Stromverbraucher die Voraussetzungen der in den entsprechenden Verordnungen und Gesetzen vorgesehenen Regelungen erfüllen, ergeben sich Reduzierungen bei den Netzentgelten, der Konzessionsabgabe, bei der Stromsteuer sowie bei den Umlagen nach EEG, KWKG, §19 StromNEV und §17f EnWG [6].

Die wichtigste Reduktionsmöglichkeit betrifft die EEG-Umlage. Sie kann bei einem Jahresverbrauch von 24 GWh – je nach Einzelfall – um bis zu 95 Prozent reduziert werden. Die EEG-Umlage kann bei stromintensiven Industrieunternehmen durch folgende Befreiungstatbestände reduziert werden (§64 EEG):

- Stromverbrauch von mindestens einer GWh im Jahr und
- Tätigkeit in einer Branche, welche in der Anlage 4 des EEG gelistet ist und
- Stromkostenintensität von mind. 14% (bzw. 20%) und
- Betrieb eines zertifizierten Energie- oder Umweltmanagementsystems.

Die EEG-Umlage fällt für die erste GWh in voller Höhe an, für den weiteren Stromverbrauch wird sie abhängig von der Stromkostenintensität auf 15-20% der regulären EEG Umlage begrenzt. In der Gesamtsumme ist die vom Unternehmen zu zahlende EEG-Umlage aber in Abhängigkeit von der Stromkostenintensität auf 4 % bzw. 0,5 % der Bruttowertschöpfung des Unternehmens begrenzt.

⁹ Dieses Beispiel wurde im Kontext eines anderen Arbeitspakets genannt.

¹⁰ Der Abnahmefall wurde mit einem Jahresverbrauch von 24 GWh, einer Jahresbenutzungsdauer von 6.000 Stunden, Jahreshöchstlast 4.000 kW sowie Versorgung in Mittelspannung 10 kV oder 20 kV definiert. Bei der Preisabfrage durch die Bundesnetzagentur wurde jedoch die Annahme vorgegeben, dass keine der Vergünstigungsmöglichkeiten nach §63ff. EEG, §19 Abs.2 StromNEV, §36 KWKG oder §17f EnWG einschlägig ist.

¹¹ Die Untergrenze der angegebenen Spanne bezieht sich auf das 10-Prozent-Perzentil, die Obergrenze auf das 90-Prozent-Perzentil [6].

Dabei darf die EEG Umlage bei Unternehmen, die Aluminium, Blei, Zink, Zinn oder Kupfer herstellen, nicht unter 0,05 ct/kWh und sonst nicht unter 0,1 ct/kWh sinken.

Das Nettonetzentgelt kann gemäß §19 Abs.2 der Stromnetzentgeltverordnung (StromNEV) um bis zu 90 Prozent reduziert werden. Dabei sind Verbrauchern, deren Höchstlastbeitrag vorhersehbar erheblich von der zeitgleichen Jahreshöchstlast aller Entnahmen aus dieser Netz- oder Umspannebene abweicht („atypische Lasten“) individuelle Netzentgelte anzubieten, welche aber minimal 20% der regulären Netzentgelte betragen müssen. Ein individuelles Netzentgelt wird auch bei Letztverbrauchern erhoben, welche mind. 10 GWh pro Jahr verbrauchen und mehr als 7.000 Vollbenutzungsstunden aufweisen. Bei Vollbenutzungsstunden von über 8.000 Stunden kann das Netzentgelt bis auf 10% des regulären Entgeltes abgesenkt werden.

Die Stromsteuer wird Unternehmen für in §9a Stromsteuergesetz genannte Prozesse vollständig erlassen. Dies umfasst u.a. Prozesse der Stahl- und Metallerzeugung und Verarbeitung, die Zement-, Kalk- oder Glasherstellung, sowie die Elektrolyse und die chemischen Reduktionsprozesse. Für alle Unternehmen des produzierenden Gewerbes wird die Stromsteuer generell auf etwa 75% gesenkt. Eine weitere Senkung auf bis zu 10% der regulären Steuer ist abhängig von der Entwicklung der Energieintensität und der Implementierung eines zertifizierten Energiemanagementsystems möglich.

Im Falle einer Erfüllung all dieser Reduktionstatbestände könnte der vom Lieferanten nicht beeinflussbare Preisbestandteil von über 11 ct/kWh (theoretisch) auf unter 1 ct/kWh sinken [6]. Je nachdem, welche Vergünstigungen für ein Unternehmen möglich sind, ergeben sich demnach stark unterschiedliche individuelle Strompreise.

Eine stärkere Angleichung der Kosten für eine strombasierte und eine fossil-basierte Bereitstellung von Prozesswärme könnte neben einer Reduktion des Strompreises auch durch eine Erhöhung des Preises für den Ausstoß von CO₂-Preis erfolgen. In der politischen Diskussion sind derzeit zwei Ansätze zur Bepreisung von CO₂: ein (auf europäischer Ebene schon etabliertes) Emissionshandlungssystem (ETS) sowie eine CO₂-Steuer. Im Vergleich zur heutigen Situation wäre i.d.R. eine deutliche Erhöhung der CO₂-Preise sowie der Bezug von Strom mit geringer CO₂-Intensität erforderlich, um eine strombasierte Bereitstellung von Prozesswärme wirtschaftlich attraktiv zu machen.

Beispiele:

- Prozessdampfbereitstellung in der chemischen Industrie: Eine Reduktion der EEG-Umlage für die elektrothermische Bereitstellung von Prozessdampf in einem Chemiapark ist laut Angaben des interviewten Chemiaparkbetreibers nicht möglich. Die Betriebskosten für E-Kessel im Vergleich zu denen für Erdgas-Kessel werden als zentrales Hemmnis für einen weiteren Ausbau von E-Kesseln gesehen.
- Glasschmelzwanne: Ein interviewter Experte gab an, dass aktuell die CO₂-Zertifikatspreise im ETS im Vergleich zu den Energiekosten der Schmelzanlage noch sehr gering seien, und daher noch keine ausreichenden Anreize für Eingriffe in die bestehenden, hocheffizienten Anlagen bieten. Der interviewte Experte schätzt, dass sich ein verstärkter Stromeinsatz bei einem CO₂-Zertifikatspreis von 100 Euro/t und einem Strompreis unter 5 ct/kWh wirtschaftlich darstellen ließe. Unter Betrachtung nur der Energiekosten sowie der Kosten für die Emission von CO₂ ergaben eigenen Berechnungen zufolge bei einem angenommenen CO₂-Zertifikatspreis von 100 Euro/t eine Wirtschaftlichkeit eines strombasierten Wärmeeintrags unterhalb eines Strompreises von ca. 7 ct/kWh.
- Zementklinkerherstellung: Eine überschlägige Berechnung ergibt Betriebskosten in Höhe von 30 €/t_{Zement} für einen elektrifizierten Kalzinierungsprozesses. Für den derzeitigen Brennstoffmix fallen hingegen Kosten in Höhe von nur ca. 5 €/t_{Zement} an.

12 Annahmen: Effizienz des Wärmeeintrags in die Glasschmelze für Strom 80%, für Gasbrenner 45% bezogen auf den Heizwert laut Experteninterview. Gaspreis: 2 ct/kWh. Emissionsfaktor Erdgas: 0,056 tCO₂/GJ. Bezug von CO₂-freiem Strom.

13 Annahmen: Strompreis = 6 ct/kWh. Strombedarf = 0,5 MWh/tZement (60% des gesamten thermischen Energiebedarfs der Zementklinkerproduktion nach Ruppert et al.[4].

6.4.4 Branchenübergreifende Flexibilisierungsmöglichkeiten

Die Produktionsprozesse in den energieintensiven Industrien sind sehr divers, und die Verfahren zur Bereitstellung von Prozesswärme sind i.d.R. eng auf den jeweiligen Produktionsprozess abgestimmt. Entsprechend müssen Ansätze zur Hybridisierung der Bereitstellung von Prozesswärme in komplexe Anlagen integriert und daher i.d.R. ebenfalls spezifisch auf den jeweiligen Prozess und das genutzte fossile Erwärmungsverfahren zugeschnitten werden.

Eine branchenübergreifende Möglichkeit für eine Hybridisierung ergibt sich aus der weiten Verbreitung von Industriebrennern zur Bereitstellung von Prozesswärme. Diese wird im Folgenden skizziert.

Vorwärmung von Verbrennungsluft

Brennprozesse benötigen Sauerstoff in der molekularen Form O_2 . Dieser Sauerstoff wird der Verbrennungsreaktion bei den meisten Brennertypen über Luft zugeführt. Die thermische Energie dieser zugeführten Verbrennungsluft fließt in die Energiebilanz des Produktionsprozesses mit ein. Die Vorwärmung von Verbrennungsluft stellt daher eine Möglichkeit dar, bei gleichbleibendem Eintrag thermisch verfügbarer Energie in den Prozess (fossile) Brennstoffe einzusparen. Industriebrenner gibt es in verschiedensten Bauweisen, die bezüglich der Luftvorwärmung in Kaltluftbrenner, Warmluftbrenner, Rekuperatorbrenner und Regeneratorbrenner unterschieden werden können in [7]:

Kaltluftbrenner sind nicht für vorgewärmte Verbrennungsluft geeignet. Warmluftbrenner arbeiten mit Verbrennungsluft mit einer Temperatur von ca. 400 °C, wobei die Vorwärmung der Verbrennungsluft extern geschieht. Rekuperatorbrenner integrieren einen Brenner mit einem Wärmetauscher. Die Abgase werden aus dem Prozess abgezogen und erwärmen über einen Gegenstromwärmetauscher die dem Brenner zugeführte Verbrennungsluft auf ca. 500 - 700 °C. Bei der Wärmerückgewinnung in Regeneratoren erfolgt die Wärmeübertragung auf die Brennluft durch Zwischenspeicherung in einer Speichermasse. Bei den heute üblichen Regeneratorbrennern werden mehrere Speicher alternierend thermisch be- und entladen. Mit Regeneratorbrennern sind sehr hohe Luftvorwärmtemperaturen von 1000°C und höher zu erreichen. Die Luftvorwärmung mit (zentralen) Regeneratoren, und in einigen Fällen auch Rekuperatoren, ist in der Glasindustrie seit über 150 Jahren üblich. Dabei werden mit Regeneratoren Luftvorwärmtemperaturen von bis zu 1250°C und mehr erreicht. Eine zusätzliche (strombasierte) Verbrennungsluftvorwärmung bei Regeneratoren für Glasschmelzaggregate wurde im Rahmen des Projekts untersucht, jedoch aufgrund der sehr geringen zu erwartenden Brennstoffersparnis als nicht zielführend bewertet.

Einen Ansatzpunkt für eine Hybridisierung und damit für eine Flexibilisierung (von Strombezug) bieten insbesondere Warmluftbrenner mit einer zeitweise strombasierten Vorwärmung der Verbrennungsluft. Der Wärmeeintrag in den Prozess soll abhängig vom Prozesszustand präzise gesteuert werden können. Die Verbrennungsluft muss daher jederzeit mit vorab definierter Temperatur vorliegen, um eine Steuerbarkeit des Wärmeeintrags zu ermöglichen. Aus diesem Grund ist neben einem strombasierten Verfahren, das flexibel zur Luftvorwärmung genutzt werden soll, eine alternative, flexibel steuerbare Luftvorwärmungsanlage (z.B. basierend auf Erdgas) oder die Integration eines thermischen Speichers erforderlich.

Die Wirtschaftlichkeit eines solchen Ansatzes hängt neben möglichen Erlösen aus der Flexibilisierung insbesondere mit der möglichen Brennstoffeinsparung vis-à-vis den erhöhten Stromkosten und der zusätzlichen Investition in eine zweite Wärmeerzeugungstechnologie zusammen. Die theoretisch maximal mögliche Brennstoffeinsparung ist bei Befeuern eines Ofenraums mittels eines Brenners (auf nicht-lineare) Weise abhängig von der Temperatur des Abgases am Ofenausgang sowie der Luftvorwärmtemperatur. Für Luftvorwärmtemperaturen im für Warmluftbrenner typischen Temperaturbereich um 400 °C ergeben sich bei Abgastemperaturen zwischen 400°C und 800°C Brennstoffeinsparungen von ca. 15 - 20%.¹⁴

¹⁴ [8], S. 227, Bild 7.20. Annahmen: Brennstoffeinsparung für ein Erdgas L; Temperatur des Brennstoffs = 20°C; Luftverhältnis $\lambda = 1,1$.

Beispiele für eine mögliche Umsetzung finden sich unter den von uns diskutierten Prozessen bei den Brennöfen der Feuerfest-Industrie (falls die bislang zur Luftvorwärmung genutzte Abwärme aus dem Ofen anderweitig genutzt werden kann) sowie in Wiedererwärmungsanlagen für Brammen in Warmwalzwerken der Stahlindustrie, an Standorten an denen die Abgase aus dem Ofen vergleichsweise niedrige Temperaturen haben. Ein weiterer Anwendungsfall ist bei Anlagen denkbar, bei denen eine Wärmerückgewinnung aus dem Abgas bisher aus unterschiedlichen Gründen nicht wirtschaftlich ist.

Hybride Strahlheizrohre

Strahlheizrohre werden meist aus hitzebeständigem Guss oder Blech oder keramischen Werkstoffen gefertigt, und bieten eine Möglichkeit der indirekten Erwärmung von Nutzgut, indem das Strahlrohr von innen erhitzt wird, und über seine Außenfläche Wärme in den Prozess abgibt. Solch eine indirekte Beheizung ist z.B. sinnvoll, falls der Wärmebehandlungsprozess unter Schutzgasatmosphäre abläuft. Strahlheizrohre sind insbesondere in der Bearbeitung von Stahl und Nicht-Eisen-Metallen verbreitet [8].

Prinzipiell kann ein Strahlrohr bei Wahl eines geeigneten Materials auch durch eine elektrische Beheizung erweitert, und dann als flexibel zu- und abschaltbare elektrische Last betrieben werden. Solch ein hybrides Strahlheizrohr wird derzeit von Akteuren aus der Stahlbranche entwickelt und im Betrieb erprobt. Da es sich um ein Forschungsvorhaben handelt, sind aktuell keine weiteren Informationen hierzu verfügbar.

6.5 Verwendung synthetischer Gase

Unter synthetischen Gasen werden hier verschiedene Gase zusammengefasst, die Energieszenarien zufolge zukünftig vermehrt zum Einsatz kommen werden, und deren Erzeugung ein Potenzial zur Flexibilisierung der Stromnachfrage bietet. Dies sind insbesondere mittels Elektrolyse gewonnener Wasserstoff und durch Methanisierung von Wasserstoff gewonnenes „E-Methan“, das eine dem Erdgas sehr ähnliche Zusammensetzung aufweist. Die Bereitstellung synthetischer Gase geschieht dabei entweder über das Gasnetz – in Form (erhöhter) Beimischung von Wasserstoff ins Erdgasnetz bzw. durch Einleitung von E-Methan ins Erdgasnetz – oder es wird reiner Wasserstoff vor Ort hergestellt oder angeliefert.

Bei Produktion von Wasserstoff vor Ort entsteht eine Flexibilisierungsoption durch die zeitliche Entkopplung von Wasserstoff-Erzeugung und dessen Verwendung durch lokale Speicherung des H_2 . Bei Bereitstellung synthetischer Gase über das Erdgasnetz wird die Flexibilisierung des Strombedarfs von der Industrieanlage hin zur Produktionsstelle der Gase verlagert, und liegt somit außerhalb des von uns betrachteten Bezugsraums. Dennoch wurde dieser letztere Fall im Projekt mitbetrachtet, da eine solche flexible Gasproduktion ggf. mit Schwankungen in der gelieferten Gasqualität einhergeht, die ggf. Auswirkungen auf Industrieprozesse hat, welche bei einer Gesamtbetrachtung dieser Flexibilisierungsoption mit bedacht werden müssen.

6.5.1 Technische Hemmnisse

Der Fokus der Hemmnisanalyse lag auf der Verwendung von synthetischen Gasen als Brenngasen in industriellen Thermoprozessen. Die brennbaren Substanzen von Brenngasen bestehen aus Kohlenstoff C und Wasserstoff H_2 , deren Verbindungen (z.B. CH_4 – Methan), sowie den Gemischen dieser Verbindungen. Darüber hinaus enthalten Brenngase zu geringen Volumenanteilen Substanzen (CO_2 , N_2), die aus Sicht der Verbrennung unerwünschte Begleitstoffe sind [8]. Wichtige Verbrennungseigenschaften von Gasen sind z.B. der Brennwert, der Heizwert, die Dichte, die Zündtemperatur sowie der für eine stöchiometrische Verbrennung nötige Sauerstoff- bzw. Luftbedarf. Im Zusammenwirken mit dem Gasbrenner und dem Brennraum bestimmen diese Gaskennwerte das Brennverhalten.

E-Methan weist aufgrund seiner dem Erdgas sehr ähnlichen Zusammensetzung ebenso sehr ähnliche Verbrennungseigenschaften auf, so dass ein Wechsel von Erdgas zu E-Methan von den interviewten Experten als i.d.R. aus technischer Sicht unproblematisch eingeschätzt wird.

Eine Beimischung von Wasserstoff wird jedoch nur in begrenztem Umfang als möglich erachtet, da er sich bzgl. seiner Verbrennungseigenschaften deutlich von Erdgas unterscheidet. Er hat einen um ca. zwei Drittel geringeren volumetrischen Heizwert, einen deutlich geringeren Mindestluftbedarf, eine hohe adiabate Flammtemperatur, kurze Selbstzündungszeiten und ist zudem sehr reaktiv [9].

Eine Reihe von Studien hat die Auswirkungen von Gasbeschaffenheitsänderungen auf thermoprozesstechnische industrielle Anlagen untersucht [9, 10, 11]. Kraus et al. [10] zeigen, dass Gasbeschaffenheitsänderungen selbst innerhalb der im DVGW Arbeitsblatt G 260¹⁵ vorgegebenen Grenzen Auswirkungen auf den Betrieb feuerungstechnischer Anlagen haben. Die Einschätzung der möglichen Auswirkungen sowie mögliche Lösungsstrategien unterscheiden sich dabei von Anwendung zu Anwendung, so dass keine generellen Aussagen möglich sind. Es wird jedoch deutlich, dass insbesondere in der Glas-, Keramik, Metall- und chemischen Industrie sensible Prozesse existieren, auf die Gasbeschaffenheitsschwankungen erhebliche Auswirkungen haben (bzgl. Effizienz, Schadstoffemissionen, Lebensdauer und Produktqualität) [10].

Von Fiehl und Wuthnow [9] sowie von Nowakowski [11] wurden die Auswirkungen einer erhöhten bzw. schwankenden Beimischung von Wasserstoff ins Brenngas industrieller Thermoprozesse betrachtet. Bei gleichbleibendem Brenngas- und Luftvolumenstrom verringert sich bei höheren Wasserstoffanteilen aufgrund des niedrigeren Heizwerts des Wasserstoffs die in den Prozess eingebrachte Leistung, wodurch die Prozesstemperatur absinkt. Durch den verringerten Mindestluftbedarf des Wasserstoffs entsteht zudem ein Sauerstoffüberschuss, wodurch sich die Atmosphäre im Ofen ggf. von einer reduzierenden Atmosphäre in eine oxidierende verändern kann. Beide Veränderungen – der Prozesstemperatur und der Ofenatmosphäre – können massive Auswirkungen auf das Produkt haben [11]. Die Studien kommen zu dem Ergebnis, dass eine auf die Brenngasbeschaffenheit abgestimmte Anpassung des Brenngas- sowie des Luftvolumenstroms prinzipiell ein probates Mittel zur Kompensation einer variierenden Brenngasbeschaffenheit darstellt. Ergänzend dazu ist jedoch in jedem Fall eine „ganzheitliche“ Betrachtung des Prozessverhaltens erforderlich (s.u.). Aus den Erfordernissen zur Anpassung der technischen Anlagen an eine veränderte und ggf. schwankende Brenngasbeschaffenheit ergeben sich die im Folgenden dargestellten Hemmnisse.

Veränderte Flammeneigenschaften

Neben dem quantitativen Wärmeeintrag und dem Verhältnis zwischen Brenngas und Luft (Luftzahl) sind für manche Prozesse auch weitere Eigenschaften von Brennerflammen entscheidend, die durch eine veränderte Brenngasbeschaffenheit und entsprechend veränderte Volumenströme beeinflusst werden. Neben einer veränderten Flammgeometrie und –länge ist dies z.B. auch eine lokal veränderte Temperaturverteilung innerhalb der Flamme [9]. Neben möglichen Auswirkungen auf das Produkt kann eine Veränderung der Temperaturverteilung innerhalb der Flamme auch Auswirkungen auf die Bildung von Schadstoffen (insbesondere NO_x) haben. Zudem sinkt durch einen erhöhten Wasserstoffanteil im Brenngas der CO₂-Anteil im Abgas, während der H₂O-Anteil steigt, wodurch sich die Strahlungs- und Wärmeübertragungseigenschaften des Abgases ändern [11]. Ein weiterer Punkt ist, dass sich durch die veränderten Volumenströme auch der in den Prozess eingebrachte Impuls verändert, was Auswirkungen auf den Prozess und das Produkt haben kann. Es sind daher auf den jeweiligen Prozess zugeschnittene Strategien zu entwickeln, um eine veränderte Brenngasbeschaffenheit geeignet zu kompensieren.

Beispiele:

- Durchschuböfen der Feuerfest-Industrie: Die Produkte der Wärmeübertrag auf den Besatz erfolgt im Wesentlichen über Wärmestrahlung der CO₂- und Wasseranteile (Verbrennungsprodukte) des Brenngases. Der durch die Brenner eingebrachte und genau auf den Ofen abgestimmte Impuls sorgt zudem dafür, dass heißes strahlendes Gas auch in Bereiche des Besatzes gelangt, die nicht direkt von den Flammen erreicht werden. Eine veränderte Gasbeschaffenheit hat sowohl Auswirkungen auf das Abstrahlungsverhalten als auch auf den in den Ofenraum eingebrachten Impuls.

¹⁵ Die vom DVGW aufgestellte technische Regel G 260 regelt die Gasbeschaffenheit im deutschen Gasnetz.

- Glasschmelzwannen: Die Flamme muss fast den gesamten Bereich über der Glasbadoberfläche überstreichen. Zudem spielt die Lage der maximalen Flammentemperatur bzw. des maximalen Wärmeübergangs in die Schmelze („hot spot“) eine wesentliche Rolle für die Strömungsverhältnisse in der Schmelze, und damit für die Produktqualität. Eine durch eine veränderte Gaszusammensetzung veränderte Flammgeometrie oder Temperaturverteilung innerhalb der Flamme hat demnach Auswirkungen auf das Produkt.

Mess- und Regelungstechnik erforderlich

Die Möglichkeit einer Regelung des Brenngas- und Luftvolumenstroms wurde oben basierend auf Fiehl und Wuthnow [9] sowie Nowakowski [11] als unabdingbare Voraussetzung für eine Kompensation einer veränderten Brenngasbeschaffenheit identifiziert. Jedoch sind einige handelsübliche Brennersysteme bzgl. der Regelungsmöglichkeiten eingeschränkt. Z.B. kann für das Verbrennungsluftverhältnis bei sogenannten Gebläsebrennern, die vereinzelt auch bei industriellen Thermoprozessanlagen geringer bis mittlerer Prozess Temperatur Verwendung finden, nur eine manuelle Grobeinstellung vorgenommen werden [11].

Eine Detektion der Brenngaszusammensetzung (z.B. mittels einer Brenngasanalyse) sowie eine Anpassung der Prozessparameter der Thermoprozessanlage mittels nachgeschalteter Regelungstechnik sind prinzipiell mittels heute verfügbarer Technologie möglich. Jedoch ist der Bestand an Altanlagen, die keine entsprechende Ausstattung aufweisen, erheblich [11].

6.5.2 Organisatorische Hemmnisse

Falls zukünftig weiterhin Brenngas jederzeit in quasi beliebiger Menge und in definierter Qualität aus dem Gasnetz bezogen werden kann, können etablierte betriebliche Abläufe rund um den Gasbezug fortgeführt werden, und es entstehen demnach auch keine organisatorischen Hemmnisse. Eine große Herausforderung würde laut der interviewten Experten jedoch durch schwankende Gasqualitäten im Gasnetz entstehen, insbesondere falls diese unvorhersehbar auftreten.

Schwankende Gasqualität

Es bewegen sich Gase unterschiedlicher Herkunft (z.B. Russlandgas oder Nordseegas) in „Paketen“ durchs Gasnetz, die sich nicht miteinander mischen und dadurch schwankenden Gasbeschaffenheiten beim Endverbraucher verursachen können. Bereits heute lassen sich aufgrund der Einspeisung von Biogasanlagen oder in der Nähe von LNG-Terminals gewisse lokale Schwankungen in der Gasqualität beobachten [10]. Zukünftig könnten häufigere und größere lokale Schwankungen durch neue flexible Einspeiser hervorgerufen werden – z.B. durch H₂-Elektrolyseure in der Nähe von Windparks.

Eine (unvorhersehbar) schwankende Gasqualität stellt aufgrund der Auswirkungen der Gaszusammensetzung auf den Verbrennungsprozess und damit auf den Produktionsprozess und das Produkt für die Industrie eine große Herausforderung dar (s.o.). Eine Auskunft der Gaslieferanten über die gelieferte Gasqualität ist in Deutschland nach Aussage eines Interviewpartners heutzutage nur im Monatsrhythmus und vor allem rückwirkend über die durchschnittliche Zusammensetzung des gelieferten Gases (Monatsmittelwert) erhältlich. Der Monatsmittelwert sagt jedoch nichts über die tatsächlichen Schwankungsbreiten und Schwankungshäufigkeit sowie Änderungsgeschwindigkeit der Gaszusammensetzung aus. Bei zukünftig noch stärker schwankenden Gasqualitäten müsste zur Vermeidung von Produktionsausfällen ggf. in den Betrieben Mess- und Regelungstechnik installiert und entsprechend (automatisierte) Abläufe zur Anpassung der Verbrennungsparameter an die jeweils gemessene Gasqualität implementiert werden. Solch eine Nachrüstung ist mit hohen bis sehr hohen Kosten verbunden (s.u.). Ein weiterer Teil einer Lösungsstrategie könnte die Bereitstellung aktueller Informationen zur Gasbeschaffenheit oder –zusammensetzung durch die Gasversorger sein. Dies ist in anderen Ländern (z.B. Frankreich und Dänemark) bereits gängige Praxis [10].

6.5.3 Ökonomische / Regulatorische Hemmnisse

Kosten synthetischer Gase

Synthetische Gase werden unter Verwendung von Strom mit Umwandlungsverlusten synthetisiert. So liegt der Wirkungsgrad der Prozesskette der Wasserstoffherstellung bei etwa 65% und der Wirkungsgrad der Prozesskette zur Herstellung von E-Methan noch darunter (ca. 52%). Die Kosten (pro Energiegehalt) für die Bereitstellung synthetischer Gase sind demnach prinzipiell höher als die Stromgestehungskosten der für ihre Synthese aufgewendeten Strommenge. Selbst unter Berücksichtigung möglicher Befreiungstatbestände bzgl. der im Strompreis enthaltenen Umlagen und Steuern ist davon auszugehen, dass die von Industrieunternehmen zu zahlenden Preise für synthetische Gase (ohne massive regulatorische Maßnahmen) bis auf Weiteres deutlich über denen fossiler Brennstoffe liegen werden. Eine Verwendung synthetischer Gase als Brenngase als Ersatz für Erdgas ist demnach in großem Umfang derzeit nur nach Setzung entsprechend massiver Anreize denkbar.

Nachrüstbedarf Mess- und Regelungstechnik

Eine Nachrüstung zum Umgang mit einer schwankenden Gasqualität im Gasnetz würde an vielen Standorten die Installation von (zusätzlicher) Mess- und Regelungstechnik erfordern (s.o.). Insbesondere für Prozesse, die empfindlich auf die chemische Zusammensetzung des Brenngases reagieren – wie dies z.B. in der keramischen Industrie häufig der Fall ist – ist eine Messung nur des Heizwerts und des Wobbe-Index¹⁶ ggf. nicht ausreichend, so dass über (aufwändigere und teurere) alternative Messkonzepte (z.B. Gaschromatographie) nachgedacht werden muss [9]. Zudem wäre eine zentrale Steuerbarkeit von Brennereinstellungen eine Voraussetzung für die erforderliche zeitnahe Anpassung der Verbrennungsparameter. Letzteres ist nicht in allen Branchen Stand der installierten Technik. In diesen Fällen wäre auch eine Nachrüstung moderner Brenner erforderlich, was einen weiteren, erheblichen Kostenpunkt darstellen würde.

Beispiel:

- Durchschuböfen in der Feuerfest-Industrie: Die Brenner an diesen Öfen sind in vielen Betrieben (noch) nicht zentral ansteuerbar. Zu den (seltenen) Gelegenheiten, zu denen die Brenneinstellungen angepasst werden müssen, wird dies durch Mitarbeiter manuell erledigt. Ein ähnlicher Stand der Technik wird auch in anderen eher mittelständisch geprägten Industriezweigen vermutet.

6.5.4 Branchenübergreifende Flexibilisierungsmöglichkeiten

Aus technischer Sicht stellt die Verwendung synthetischer Gase einen für die energieintensiven Industrien vergleichsweise einfach umzusetzenden Flexibilisierungsansatz dar. E-Methan, das in seiner Zusammensetzung dem Erdgas sehr ähnlich ist, könnte prinzipiell ohne größere Umstellungen in den bestehenden Anlagen (Leitungen, Brenner, Abgasreinigung etc.) verwendet werden. Eine Erhöhung der Beimischung von H₂ wird in begrenztem Umfang ebenfalls als unproblematisch gesehen, insofern die Gaszusammensetzung vorab bekannt ist.

Aus Sicht der Industrie wäre bei einer erhöhten Produktion von synthetischen Gasen und deren Bereitstellung über das Gasnetz jedoch von höchster Wichtigkeit, dass die Abgabe von flexibel produzierten synthetischen Gasen (insbesondere H₂) ins Gasnetz in möglichst konstanter und klar definierter Menge erfolgt, so dass jederzeit Brenngas gleichbleibender Qualität aus dem Netz bezogen werden kann.

¹⁶ Der Wobbe-Index ist ein Maß zur Beurteilung der Austauschbarkeit von Gasen bzgl. ihrer Verwendung als Brennstoff. Laut Definition können zwei Gase mit gleichem Wobbe-Index ohne Anpassung im gleichen Brenner verbrannt werden, sofern der gleiche Düsendruck anliegt. Der oberer Wobbe-Index errechnet sich als $W_{o,n} = \text{Brennwert} / \sqrt{\text{relative Dichte}}$. Analog errechnet sich der untere Wobbe-Index unter Verwendung des Heizwerts. Der Wobbe-Index ist jedoch zur Regelung thermoprozesstechnischer Industrieanlagen nicht ausreichend bzw. sogar ungeeignet [10].

6.6 Thermische Speicher

Die hier betrachteten thermischen Hochtemperatur-Speicher ermöglichen die Aufnahme und Abgabe von Wärme auf hohen Temperaturniveaus, die für die Bereitstellung von Prozesswärme in einigen Industrieanwendungen nutzbar sind. Thermische Speicher können Wärme an einer Wärmequelle (i.d.R. Abwärme) entlang der Prozesskette aufnehmen und zeitversetzt (ggf. an anderer Stelle) wieder abgeben. Eine weitere – für den hier betrachteten Zusammenhang besonders relevante – Möglichkeit besteht in der flexiblen elektrothermischen Beladung des Speichers und einer Abgabe der Wärme gemäß der Wärmebedarfe des Produktionsprozesses.

6.6.1 Technische Hemmnisse

Wärmeübertragungsweg

Die hier betrachteten thermischen Speicher geben die in ihnen gespeicherte Wärmeenergie auf indirektem Weg in den Produktionsprozess ab.¹⁷ Dies kann entweder über ein Wärmeträgermedium (z.B. heiße Luft) erfolgen, das Wärmeenergie im Wärmespeicher aufnimmt und in den Prozess einbringt. Oder das Speichermedium fungiert gleichzeitig als Wärmeüberträgermedium (z.B. Flüssigsalz), und gibt die in ihm gespeicherte Wärmeenergie über ein Wärmetauschersystem indirekt an den Produktionsprozess ab. In beiden Fällen findet der Wärmetransport auf konvektivem (und ggf. konduktivem) Wege statt; über Wärmestrahlung (z.B. zwischen einer Brennerflamme und Nutzgut) können i.d.R. höhere Wärmestromdichten erreicht werden. Prozesse, die aufgrund technischer Gegebenheiten auf Wärmestrahlung als wesentlichen Weg der Wärmeübertragung angewiesen sind und ggf. zudem eine hohe Wärmestromdichte erfordern, erlauben aus diesen (technischen) Gründen eine Einbindung thermischer Speicher i.d.R. maximal als unterstützendes Element (z.B. zur Vorwärmung von Verbrennungsluft, s.o.).

Beispiele:

- Flachglasherstellung: in der Abkühlstrecke muss das Flachglas über die gesamte Breite des Glasbandes sehr kontrolliert und lokal differenziert erwärmt bzw. gekühlt werden, um eine gleichmäßige Temperatur des Glasbandes über seine gesamte Breite zu erzielen. Die erforderliche Präzision, die heute durch strombasiert erzeugte Wärmestrahlung erreicht wird, kann durch ein Heißgas, wie es durch einen thermischen Speicher bereitgestellt werden könnte, nicht erreicht werden.
- Glasschmelzwanne: für den Glasschmelzprozess werden sehr hohe Temperaturen benötigt (ca. 1600 °C im Brennraum oberhalb der Schmelze). Bei diesen Temperaturen macht Strahlung bis zu 90 % der Gesamtwärmeübertragung aus [10]. Aufgrund der hohen benötigten Prozesstemperaturen und der Höhe des erforderlichen Wärmeübertrags ist ein Wärmeeintrag nur über im thermischen Speicher erwärmte Heißluft nicht möglich. In Regeneratoren gespeicherte Wärme wird jedoch zur Vorwärmung von Verbrennungsluft genutzt.
- Zementproduktion: Für das Sintern von Zementklinker im Drehrohrofen muss ein großer Massestrom von Material auf ca. 1450 °C erwärmt werden. Dies ist durch einen Wärmeeintrag nur über im thermischen Speicher erwärmte Heißluft nicht möglich, da die erforderlichen Wärmestromdichten nicht erreicht werden können. Auch in diesem Fall wird jedoch Abwärme zur Vorwärmung von Verbrennungsluft genutzt.

6.6.2 Organisatorische Hemmnisse

Organisatorische Hemmnisse wurden in den Interviews nicht vertieft besprochen, da zunächst die technische Machbarkeit einer Integration von Wärmespeichern im Vordergrund stand. Insofern am Standort ein zentrales Leitsystem zur Steuerung von Anlagen existiert, steht zu vermuten, dass

¹⁷ Dies gilt nicht für Ansätze bei denen eine Zwischenspeicherung des Nutzguts selbst als thermischer Speicher fungiert. Ein Beispiel dafür wäre eine Speicherung des kalzinierten Rohmaterials in der Zementproduktion, welches zu großen Teilen aus CaO besteht, und in dem ein großer Teil des thermischen Energieeintrags chemisch gespeichert werden könnte

die Einbindung eines thermischen Speichers in den Betriebsablauf keine größeren Hemmnisse aufwerfen würde. Als mögliches Hemmnis für den Aufbau eines Speichers wurde wiederholt der dafür nötige Platzbedarf angesprochen.

Platzbedarf

Der Bau eines thermischen Speichers erfordert (je nach Speichertyp und Kapazität) eine größere freie Fläche¹⁸ – idealerweise in der Nähe des Produktionsorts, um Wärmeverluste beim Transport des Wärmeträgermediums zu minimieren. Des Weiteren muss im Umfeld der Produktionsanlage ausreichend Platz sein, um Rohre für Zu- und Ableitung des Wärmeträgers zu verlegen. Das benötigte Volumen der Leitungen ist abhängig vom Wärmeträgermedium sowie der zu übertragenden Leistung. Ob dieser Platzbedarf ein Hemmnis darstellt, kann nur standortspezifisch ermittelt werden.

6.6.3 Ökonomische / Regulatorische Hemmnisse

Ökonomische und regulatorische Hemmnisse wurden ebenfalls in den Interviews nur sehr kurz thematisiert. Prinzipiell steht zu erwarten, dass der Bau eines thermischen Speichers eine beträchtliche Investition darstellt. Zudem ist die Einbindung flexibel elektrisch beladener thermischer Speicher in Produktionsprozesse bislang keine etablierte Technik,¹⁹ so dass eine „first-of-its-kind“ Realisierung einer Einbindung eines solchen Speichers zunächst ein erhöhtes Risiko für unvorhergesehene Schwierigkeiten mit sich bringt.

6.6.4 Branchenübergreifende Flexibilisierungsmöglichkeiten

In den Gesprächen mit den Branchenvertretern konnten verschiedene Ansatzpunkte für eine Integration thermischer Speicher in die betrachteten Produktionsprozesse identifiziert werden. Als potenziell branchenübergreifend anwendbare Flexibilisierungsmöglichkeiten stellen sich dabei die Einbindung thermischer Speicher in die Vorwärmung von Verbrennungsluft (s.o.) sowie die Nutzung von Heißluft aus einem thermischen Speicher für die Vorwärmung bzw. Trocknung von Ausgangsstoffen dar.

6.7 Fazit

Industrielle Thermoprozesse wurden – teilweise über Jahrzehnte – hinsichtlich der Qualität der hergestellten Produkte und der energetischen und ökonomischen Effizienz der Prozesse optimiert. Im Resultat sind diese Produktionsprozesse in ihrer heutigen Ausprägung i.d.R. sehr spezifisch auf das zu produzierende Produkt sowie die (technischen und ökonomischen) Rahmenbedingungen – inklusive der Verfügbarkeit von Erdgas – ausgelegt.

Die aus technischer Sicht für den Industriebetrieb am einfachsten umzusetzende Flexibilisierungsmöglichkeit ist daher die Bereitstellung synthetischer Gase²⁰ in genau spezifizierter und konstanter Zusammensetzung über das Erdgasnetz, da in diesem Fall keine Veränderung oder nur eine geringfügige Anpassung der etablierten und erprobten Produktionsprozesse und der zugehörigen technischen Anlagen nötig wäre.

18 Dies gilt nicht für Ansätze bei denen eine Zwischenspeicherung des Nutzguts selbst als thermischer Speicher fungiert. Die exemplarischen Speicherauslegungen für die Gemengevorwärmung in der Glasindustrie sehen z.B. einen Speicherdurchmesser von ca. 3 m sowie eine Speicherhöhe von ca. 8 -10 m vor.

19 Die Verwendung von Regeneratoren zur Luftvorwärmung zur Erzielung höherer Flammentemperaturen in Wannenöfen der Glasindustrie sowie der Einsatz von Winderhitzern (Cowper) in der Stahlindustrie sind lange erprobte und weit verbreitete Wärmespeichertechnologien. Diese sind jedoch eng auf den jeweiligen Prozess abgestimmt und werden (bislang) nicht mit einer elektrischen (Teil-)Beladung im Zuge eines flexiblen Strombezugs betrieben. Die diskutierten Hochtemperatur-Speicher haben Technology Readiness Levels (TRLs) im Bereich von 4-9 für sensible Hochtemperaturspeicher (inkl. Regeneratoren und Winderhitzer mit TRL 9), von 4-7 für Hochtemperatur-Latentwärmespeicher sowie von 3-7 für thermochemische Speicher.

20 E-Methan bzw. Wasserstoff bis zu einem gewissen Volumenanteil.

Eine Hybridisierung des Wärmeeintrags in den Prozess als Grundlage für eine Flexibilisierung ist entsprechend der Ergebnisse der geführten Gespräche nur in wenigen Fällen möglich. Beispiele sind die Ausweitung der elektrischen Zusatzheizung in Glasschmelzwannen und die Bereitstellung von Prozessdampf in der chemischen Industrie über E-Kessel. In vielen der betrachteten Fälle erscheint ein strombasierter Wärmeeintrag direkt in den Prozess hingegen aus verfahrenstechnischer Sicht ungeeignet. Als vielversprechendste branchenübergreifende Möglichkeiten für eine Hybridisierung stellen aus technischer Sicht Verfahren dar, bei denen die strombasierte Wärmeerzeugung und der Produktionsprozess über ein zwischengeschaltetes Wärmeträgermedium (z.B. über fossil- oder strombasiert vorgewärmte Verbrennungsluft) oder eine zwischengeschaltete Wärmequelle (z.B. ein fossil- oder strombasiert erwärmtes Strahlheizrohr) verbunden sind. (Auch) in den Fällen, in denen eine technische Umsetzung machbar erscheint, wird eine Hybridisierung aus wirtschaftlicher Sicht insbesondere durch Stromkosten erschwert, die im Vergleich zu den Kosten fossiler Energieträger unter heutigen Rahmenbedingungen sehr hoch sind.

Eine (sinnvolle) Einbindung flexibel strombasiert erwärmter thermischer Speicher erfordert eine Wärmesenke auf geeignetem Temperatur-Niveau, deren Wärmebedarf nicht oder nicht vollständig über existierende Abwärmeströme gedeckt wird. Zudem muss eine Wärmeübertragung vom Speicher auf das Nutzgut mit einer ausreichend hohen Wärmestromdichte erreicht werden können. Es konnten verschiedene prozessspezifische, aus technischer Sicht plausible Ansatzpunkte für eine Integration thermischer Speicher identifiziert werden.

6.8 Danksagung

Das Autorenteam bedankt sich insbesondere bei Herrn Fleischmann (HVG), Herrn Ruppert (VDZ), Herrn Bartsch (DLR), Herrn Ausfelder (DECHEMA), Herrn Dannert (FGF), Herrn Möhring (BFI) und Herrn Queck (BFI) für hilfreiche Kommentare und Ergänzungen zu einer früheren Version dieses Texts.

6.9 Literatur

- [1] Arnold, K., & Holtz, G. (2018). Methodisches Vorgehen und Voruntersuchungen zu Flexibilitätpotenzialen (Abschnitt 1.2). In F. Ausfelder, A. Seitz, & S. von Roon (Hrsg.), *Flexibilitäts Optionen in der Grundstoffindustrie – Methodik | Potenziale | Hemmnisse*. Frankfurt am Main.
- [2] Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz – Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft. <https://www.bmu.de/gesetz/erste-allgemeine-verwaltungsvorschrift-zum-bundes-immissionsschutzgesetz/>
- [3] Wilhelmsson, B., Kollberg, C., Larsson, J., Eriksson, J., & Eriksson, M. (2018). *CemZero – A feasibility study evaluating ways to reach sustainable cement production via the use of electricity*. Abgerufen von Cementa website: <https://www.cementa.se/sv/cementa-och-vattenfall-satsar-pa-nasta-steg-cemzero>
- [4] Ruppert, J., Wagener, C., Palm, S., Scheuer, W., & Hoenig, V. (2019). *Prozesskettenorientierte Ermittlung der Material- und Energieeffizienzpotentiale in der Zementindustrie: Abschlussbericht* [Bericht im Auftrag des im Auftrag des Umweltbundesamtes (UFOPLAN FKZ 3716 36 320 0)]. Düsseldorf: VDZ.
- [5] Milles, U. (2009). *Effiziente Wärmeverfahren optimieren industrielle Produktionsprozesse* (projektinfo Nr. 15/09). Abgerufen von BINE Informationsdienst website: http://www.bine.info/fileadmin/content/Publikationen/Projekt-Infos/2009/Projektinfo_15-2009/projekt_1509_internetx.pdf
- [6] Bundesnetzagentur. (2018). *Monitoringbericht 2018*. Abgerufen von Bundesnetzagentur | Bundeskartellamt website: <https://www.bundesnetzagentur.de>
- [7] Wüning, J. G. (Hrsg.). (2019). *Handbuch der Brenntechnik für Industrieöfen* (3. Auflage). Essen: Vulkan Verlag.
- [8] Pfeifer, H. (Hrsg.). (2013). *Handbuch industrielle Wärmetechnik – Grundlagen | Berechnungen | Verfahren* (5. Auflage). Essen: Vulkan Verlag.
- [9] Fiehl, M., & Wuthnow, H. (2017). *Auswirkungen der Zumischung erneuerbarer Energie im Erdgasnetz auf thermo-prozesstechnische Anlagen in der keramischen Industrie* [Schlussbericht zu IGF-Vorhaben Nr. 18684 N]. Gas- und Wärme-Institut Essen e.V. (GWI), Forschungsgemeinschaft Feuerfest e.V. (FGF).
- [10] Kraus, H., Werschy, M., Fanke, S., Giese, A., Benthin, J., & Dörr, H. (2014). *Untersuchung der Auswirkungen von Gasbeschaffenheitsänderungen auf industrielle und gewerbliche Anwendungen* [Abschlussbericht DVGW-Förderkennzeichen G1/06/10]. DVGW Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V.
- [11] Nowakowski, T. (2017). *Untersuchung der Auswirkung von Wasserstoff-Zumischung ins Erdgasnetz auf industrielle Feuerungsprozesse in thermoprozesstechnischen Anlagen* [Schlussbericht zu IGF-Vorhaben Nr. 18518 N / 1]. Deutsche Vereinigung für Verbrennungsforschung e.V. (DVV), Gas- und Wärme-Institut Essen e.V. (GWI).

7 MODELLHAFTE BETRACHTUNG VON FLEXIBILITÄSTECHNOLOGIEN IN DER GRUNDSTOFFINDUSTRIE ANHAND AUSGEWÄHLTER BEISPIELE

Verantwortliche Autoren Kapitel 7.1

Jörn Constantin Richstein jrichstein@diw.de
DIW Berlin, Mohrenstr. 58, 10117 Berlin

Seyed Saeed Hosseinioun shosseinioun@diw.de
DIW Berlin, Mohrenstr. 58, 10117 Berlin

Verantwortliche Autoren Kapitel 7.2 und 7.3

Daniel Zinsmeister d.zinsmeister@tum.de
TU München, Arcisstr. 21, 80333 München

7.1 Abschnitt ökonomische Modellierung der Glasschmelze als hybrider Prozess (J. C. Richstein, S. S. Hosseinioun; DIW; Berlin)

In diesem Abschnitt wird die Behälterglasglasschmelze als Referenzprozess für eine hybride Wärmebereitstellung (aus Strom und Erdgas) mithilfe eines ökonomisch-numerischen Modells näher untersucht. Zum einen werden anhand zweier Beispieljahre mögliche Energiekosteneinsparungen¹ durch eine flexible Fahrweise einer Glaswanne mit Elektrozusatzheizung quantifiziert. Zum anderen wird der Einfluss von Netzentgelten, anderer Umlagen sowie der Einfluss von CO₂-Preisen auf den Einsatz von Elektrizität in einer hybriden Wärmebereitstellung analysiert.

Der Prozess der Behälterglasglasschmelze ist ausführlicher in Kapitel 9 dargestellt. Die hier vorgestellte ökonomische Betrachtung baut auf den empirischen Daten und Informationen zu technischen und anderen Produktionseinschränkungen in dem Kapitel 9 auf. In der folgenden Modellierung wird beispielhaft eine relativ moderne Glaswanne [1] angenommen, welche ohne Elektrozusatzheizung einen Energiebedarf von 4,02 GJ/Tonne Glas, und mit einem 15 % -Anteil einer Elektrozusatzheizung am Bruttoenergieeintrag, einen Energiebedarf von 3,6 GJ/Tonne Glas hat. Diese wird gegenüber viertelstündlichen Strompreisen² und täglichen Gaspreisen aus dem Jahr 2015 optimiert, unter der Annahme von verschiedenen Netzentgelten und CO₂-Preisen. Als obere und untere Stromverbrauchsgrenze werden 20 % und 10 % des Bruttoenergiebedarfs angenommen, sowie Beschränkungen der maximalen Rate der Stromverbrauchsänderung pro Tag. Davon ausgenommen sind kurzfristige Änderungen des Strombedarfs (Boosts), welche nur 5-10 Minuten andauern, aber eine darauf folgende Ruheperiode benötigen.

7.1.1 Modellbeschreibung & Annahmen

Das Modell ist als Kostenminimierung (Lineares Programm, LP) bezüglich der Strombeschaffung am Intraday-Markt (mit viertelstündlichen Preisen) und der Beschaffung am täglichen Gasmarkt unter Berücksichtigung von technischen Rahmenbedingungen des Glasschmelzprozesses formuliert. Es ist auf die Produktion einer Tonne Glas skaliert. Jedoch werden verschiedene Netzentgelte betrachtet, welche je nach absoluter Größe des Prozesses zum Tragen kommen würden. Das Modell ist an die vorherige Arbeit von Richstein & Neuhoff [2] zur Flexibilität in der Schwerindustrie angelehnt.

¹ Andere Kostenbestandteile, z.B. Arbeitskosten, Investitionskosten, Abnutzungskosten werden in dem vorgestellten Modell nicht berücksichtigt.

² Hier wird vereinfachend von einer ausschließlichen Vermarktung am Intradaymarkt ausgegangen.

Es wird in dem Modell vereinfachend von perfekter Voraussicht der Einsatzplanung, sowie der Energiepreise, ausgegangen und die Modellergebnisse stellen diesbezüglich eine obere Grenze an möglicher Flexibilitätserbringung dar. Dies bedeutet, dass das Modell den Strom- und Gasverbrauch über alle Stunden unter Berücksichtigung von z.B. maximalen Produktionsänderungsraten hinweg optimal plant, und so z.B. frühzeitig die Wärmebereitstellung aus Strom erhöht, wenn über einen hinreichend großen Zeitraum günstige Strompreise vorliegen. In den folgenden Tabellen sind die Entscheidungsvariablen, die Inputparameter, sowie die Modellgleichungen dargestellt.

Tabelle 7.1: Variablen

Variablen	Beschreibung	Einheit
C_{total}	Gesamtenergiekosten	Euro
$H_E(t)$	Basis-Stromverbrauch zum Zeitpunkt t	MWh
$H_G(t)$	Gasverbrauch zum Zeitpunkt t	MWh
$B_u(t)$	Variable für kurzfristige Stromverbrauchserhöhung	0 oder 1
$B_d(t)$	Variable für kurzfristige Stromverbrauchsabsenkung	0 oder 1
$E(t)$	Gesamtstrombedarf zum Zeitpunkt t	MWh
$C_{VarElect}$	Variable Stromkosten (inkl. variable Netzentgelte)	Euro
C_{VarGas}	Variable Gaskosten (inkl. variabler Netzentgelte und CO ₂ -Kosten)	Euro
$C_{FixElect}$	Fixe Stromnetzentgelte	Euro
E_{max}	Maximale abgerufene Stromleistung im Simulationsjahr	MWh

Tabelle 7.2: Input Parameter

Parameter	Beschreibung	Einheit	Wert
t	Viertelstunde	¼ h	1 bis 35040
C_r	Umrechnung MWh zu GJoule	GJ/MWh	3,6
H_d	Nettoenergiebedarf in der Wanne	GJ/(¼ h)	0,018844
E_E	Effizienz des Wärmeeintrags aus Strom	Prozent (%)	85
E_G	Effizienz des Wärmeeintrags aus Erdgas	Prozent (%)	45
$P_E(t)$	¼-stündlicher Strompreis	Euro/MWh	Jahr 2014 & 2018 ³
$P_G(t)$	¼-stündlicher Strompreis	Euro/MWh	Jahr 2014 & 2018 ⁴
B_p	Maximale kurzfristige Anpassung des Strombedarfs in Prozent des Nettoenergiebedarfs	Prozent (%)	7,96
D	Minimale Ruhezeit nach kurzfristiger Anpassung	Anzahl ¼ - Stunden	8
D_q	Anzahl Viertelstunden in einem Tag		96
B_{20}	Zu 20%-Bruttobereitstellung äquivalente Nettoanteil an Energiebereitstellung aus Strom	Prozent (%)	30,77
B_{10}	Zu 10%-Bruttobereitstellung äquivalente Nettoanteil an Energiebereitstellung aus Strom	Prozent (%)	16,49
N_{var}	Arbeitspreis des Strom-Netzentgeltes, sowie weitere Umlagen	Euro/MWh	Vgl. Szenarien
N_{fix}	Leistungspreis des Strom-Netzentgeltes	Euro/MWh	Vgl. Szenarien
C_{FixGas}	Jährlicher Gas-Grundpreis	Euro/Tonne Glas pro Jahr	200
N_{gVar}	Arbeitspreis des Gasnetzentgeltes	Euro/MWh	9,7
R_{co2}	CO ₂ Emissionen pro MWh Gasverbrauch	Tonne CO ₂ /MWh	0,2
P_{co2}	CO ₂ -Preis	Euro/Tonne CO ₂	Vgl. Szenarien

³ Gewichteter Mittelwert der kontinuierlichen gehandelten Preise an der EPEX.

⁴ Aus den EGIX DE Tagesmittelwerten. Alle ¼-Stunden an einem Tag werden mit demselben Preis angesetzt.

Tabelle 7.3: Modell Gleichungen

Gleichung	Beschreibung
(1)	Zielfunktion: Minimierung der Gesamtenergiekosten $\text{Min}_{H_E, H_G, B_d, B_u, \forall t} C_{total} = C_{VarElect} + C_{VarGas} + C_{FixElect} + C_{FixGas}$
(2)	Gesamtstromverbrauch; als Summe des Basisstromverbrauchs und kurzfristiger Anpassungen $E(t) = H_E(t) + \left[(B_u(t) - B_d(t)) * B_p * \left(\frac{H_d}{E_E * C_r} \right) \right], \forall t$
(3)	Variable Stromkosten; aus Stromverbrauch, Strompreisen und Arbeitsteil des Netzentgeltes $C_{VarElect} = E(t) * (P_E(t) + N_{var})$
(4)	Fixe Stromkosten, berechnet aus maximal abgerufener Leistung (vgl. Gleichung (12)) und des Leistungspreises des Netzentgeltes (inkl. Umrechnung von maximalem ¼h-Energieverbrauch zu Leistung) $C_{FixElect} = N_{fix} * 4 * E_{max}$
(5)	Variable Gaskosten; aus Gasverbrauch, Gaspreisen, Arbeitsteil des Netzentgeltes und Kosten aus CO ₂ -Emissionen $C_{VarGas} = H_G(t) * [P_G(t) + N_{gvar} + (R_{co2} * P_{co2})]$
(6)	Energiebilanz: der Nettowärmeeintrag aus Strom- und Gas muss konstant sein $H_E(t) * E_E * C_r + H_G(t) * E_G * C_r + [(B_u(t) - B_d(t)) * B_p * H_d] = H_d, \forall t$
(7)	Der Bruttoenergieeintrag aus Strom darf maximal 20 % betragen $E(t) * C_r * E_E \leq B_{20} * H_d, \forall t$
(8)	Der Bruttoenergieeintrag aus Strom darf minimal 10 % betragen $E(t) * C_r * E_E \geq B_{10} * H_d, \forall t$
(9)	Maximale positive Änderungsrate des Basis-Energieeintrags aus Strom (pro Tag maximal von der unteren 10 %-Grenze zur oberen 20 %-Grenze) $[H_E(t+1) - H_E(t)] * C_r * E_E \leq (B_{20} - B_{10}) * H_d / D_q, \forall t$
(10)	Maximale negative Änderungsrate des Basis-Energieeintrags aus Strom (Richtlinie: pro Tag maximal von der oberen 20 %-Grenze zur unteren 10 %-Grenze) $[H_E(t+1) - H_E(t)] * C_r * E_E \geq -(B_{20} - B_{10}) * H_d / D_q, \forall t$
(11)	In einem Zweistundenfenster kann die Produktion nur einmal kurzfristig erhöht oder abgesenkt werden (in Höhe von 5 % des Bruttoenergieeintrags über 10 Minuten. Es wird angenommen, dass geringe Energieeinträge über mehrere Viertelstunden in dem Zeitfenster verteilt werden können). $\sum_{t=8+1}^t B_u(t) + \sum_{t=8+1}^t B_d(t) \leq 1, \forall t \geq 8$
(12)	Ermittlung des maximalen Energieverbrauchs des Strombedarfs zur Berechnung der Leistungspreis-Komponente des Netzentgeltes $E(t) \leq E_{max}, \forall t$

7.1.2 Szenarien

Es werden mehrere regulatorische Szenarien miteinander verglichen. Die wesentlichen Parameter, die variiert werden, sind die variablen Zusatzkosten (sowohl für Strom als auch Gas).

Abbildung 7.1 zeigt die zum Strom-Börsenpreis hinzukommenden Arbeits- und Leistungspreise. Diese basieren auf unterschiedlichen Netzentgelten [3], sowie zusätzliche Umlagen, wie die EEG-Umlage, Stromsteuer und weitere. Diese werden entweder mit 92,30 Euro/MWh oder angesetzt oder gemäß Ausnahmegenehmigung auf 5,20 Euro/MWh vergünstigt. Als Szenariobasis dient hier der Monitoring-Bericht [4]. Des Weiteren werden auch die Netzentgelte nach StromNEV §19 (2) variiert, dabei wird beispielhaft eine Reduktion auf 20 % der Netzentgelte angenommen (folgend der 7000-Stunden-Regel). Im Falle von Gas wird als Illustration der CO₂-Preis variiert (0, 15, 30 und

60 Euro/Tonne CO₂). Dies ist strenggenommen eine Verzerrung zwischen den Szenarien, da der CO₂-Preis ebenfalls die Elektrizitätspreise direkt (durch Kosten konventioneller Stromerzeuger) beeinflusst. Der Einfluss des CO₂-Preises auf die Strompreise wird hier nicht abgebildet.

7.1.3 Modellergebnisse

Die Modellergebnisse zeigen, dass je nach relativen Strom- und Gaspreisen, sowie Netzentgelthöhen und CO₂-Preisen, das Potential für eine Flexibilitätsbereitstellung vorhanden ist – diese ist jedoch in ihrer Größenordnung durch die technischen Einschränkungen begrenzt.

Prinzipiell liegt ein ökonomisches Potential für eine Nachfrageflexibilität durch eine hybride, dynamische Fahrweise der Wanne vor allem dann vor, wenn sich der Preis für den Nettoeintrag von Wärme in die Wanne durch Elektrizität und Gas im Jahresdurchschnitt nicht stark unterscheidet – so dass die deutlich volatileren Strompreise in einigen Zeitperioden effektiv günstiger, und in anderen Zeitperioden teurer sind als die Befuerung durch Gas. Hierbei spielen insbesondere die variablen Netzentgelte, sowie Umlagen und Steuern (wie z.B. die EEG-Umlage, die Stromsteuer und der CO₂-Preis) eine Rolle, sodass fast durchgehend andere Energieträger kostengünstiger sind.

Als erste Darstellung vergleicht Abbildung 7.2 die effektiven variablen Energiekosten von Gas (in schwarz) und Elektrizität (in Farben). Dabei wurde die x-Achse nach Elektrizitätspreisen sortiert (als

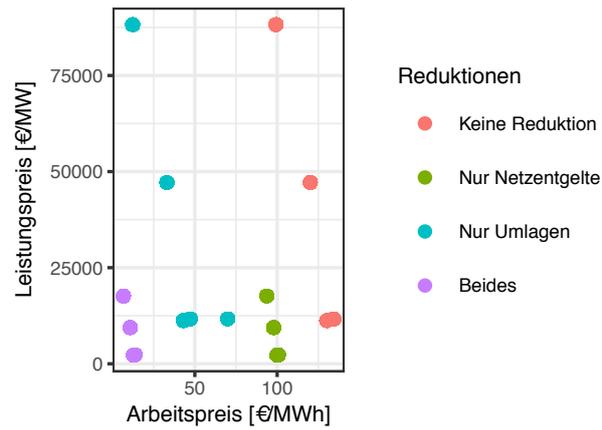


Abb. 7.1: Zusätzliche Beiträge zum Strombörsenpreis: Arbeits- und Leistungspreise.

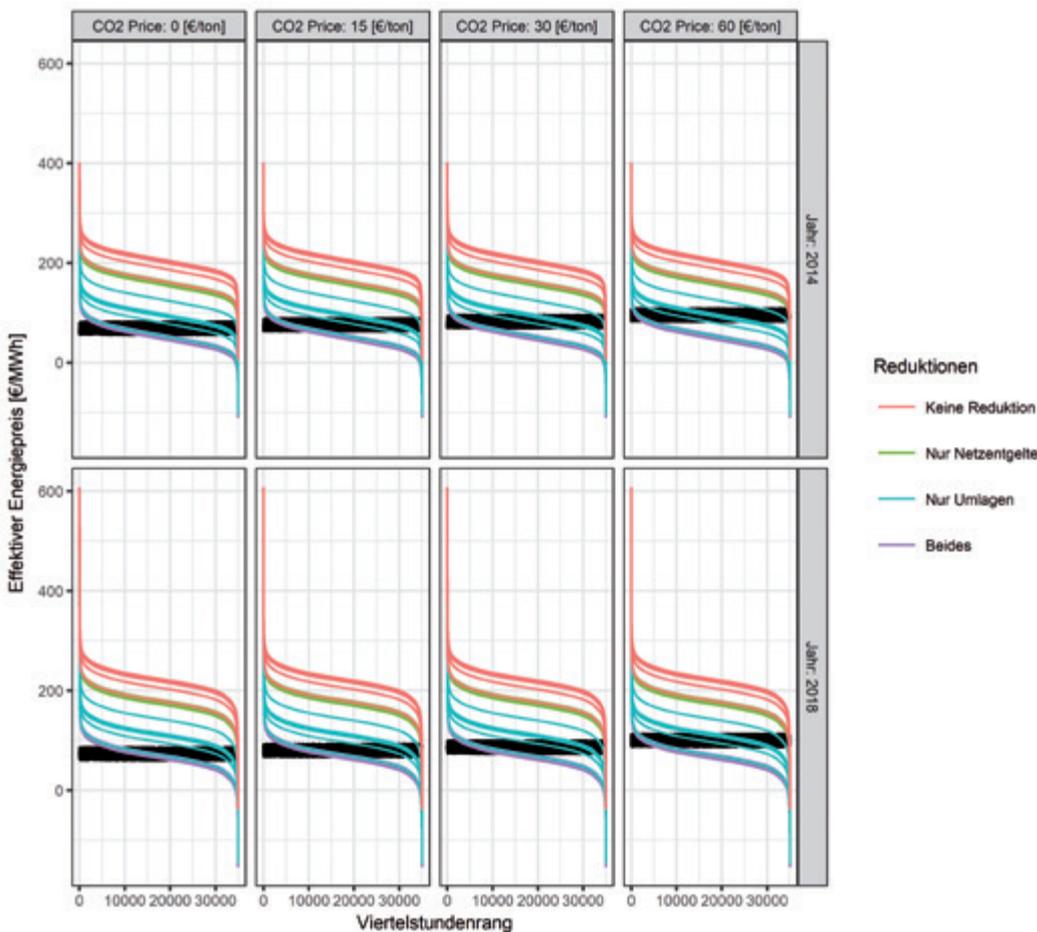


Abb. 7.2: Vergleich von effektiven Strom- und Gaspreisen (unter Berücksichtigung von Ineffizienzen und Steuern und Umlagen).

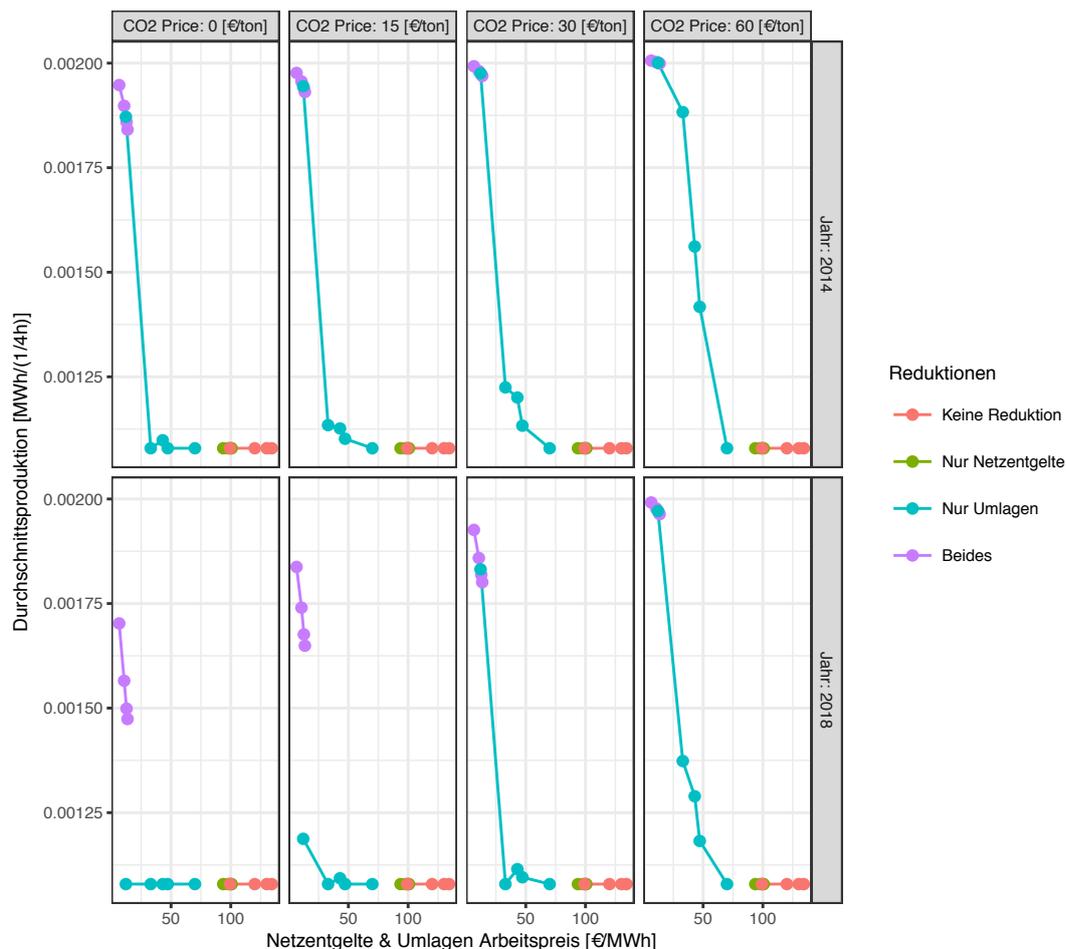


Abb. 7.3: Durchschnittlicher Stromverbrauch in verschiedenen Szenarien

Preisdauerlinie). Während der eigentliche Börsen-Strompreis in den verschiedenen Szenarien unverändert bleibt, werden die verschiedenen variablen Zusatzkosten je nach Ausnahmeregelungen (für Netzentgelte nach StromNEV §19, sowie Umlagenreduktionen, z.B. Stromsteuer und EEG) in verschiedenen Farben gruppiert. Es wird ersichtlich, dass in den vorliegenden Szenarien solche Vergünstigungen entscheidend sind. Falls keinerlei Vergünstigung der Umlagen vorliegt, ist Gas in fast allen Viertelstunden des Jahres günstiger als Strom. Dahingegen führen Vergünstigungen dazu, dass Strom wettbewerbsfähig ist. Bei gleichzeitiger Umlagen- und Netzentgeltbefreiung sogar so weit, dass Strom in den meisten Viertelstunden des Jahres günstiger ist als Gas.

In Abbildung 7.3 wird deutlich, dass je nach Kombination aus Netzentgelten & Umlagen mit verschiedenen CO₂-Preisen häufig relativ nah, oder direkt an der oberen oder unteren Stromverbrauchsgrenze, produziert wird (insb. in 2014). Nur in wenigen Fällen wird im Durchschnitt in der Mitte des möglichen Verbrauchsbereichs produziert, sodass die Flexibilitätsbereitstellung maximiert ist.

Als Metrik für Flexibilitätsbereitstellung wird im Folgenden die durchschnittliche absolute Abweichung vom durchschnittlichen Stromverbrauch benutzt, d.h. wie viel die Produktion im Durchschnitt vom Jahresmittelwert des Verbrauchs in Prozent abweicht (positive und negative Abweichungen werden absolut und gleich gewichtet). Abbildung 7.4 stellt diese Flexibilitätsmetrik graphisch da. Wie ersichtlich wird, ist die Flexibilität dann am größten, wenn die relativen effektiven Strompreise ähnlich groß sind wie die Gaspreise (vgl. Abbildung 7.2), und dementsprechend im Jahresmittel nicht an den Rändern der möglichen Stromabnahme produziert wird, sondern in der Mitte (Abbildung 7.3).

Im Falle von niedrigen CO₂-Preisen (z.B. 0 Euro/Tonne CO₂) sind daher sehr günstige Netzentgelte und Umlagen notwendig, um Flexibilität zu erreichen (d.h. Ausnahmen sowohl in Netzentgelten & Umlagen), während ein höherer CO₂-Preis (z.B. 60 Euro/Tonne CO₂) dazu führen würde, dass dieselbe Kombination zu so günstigen Strompreisen führen würde, dass immer der maximale Anteil an Strom genützt würde, und daher kaum Flexibilität bereit steht. Es ist eindeutig, dass je breiter

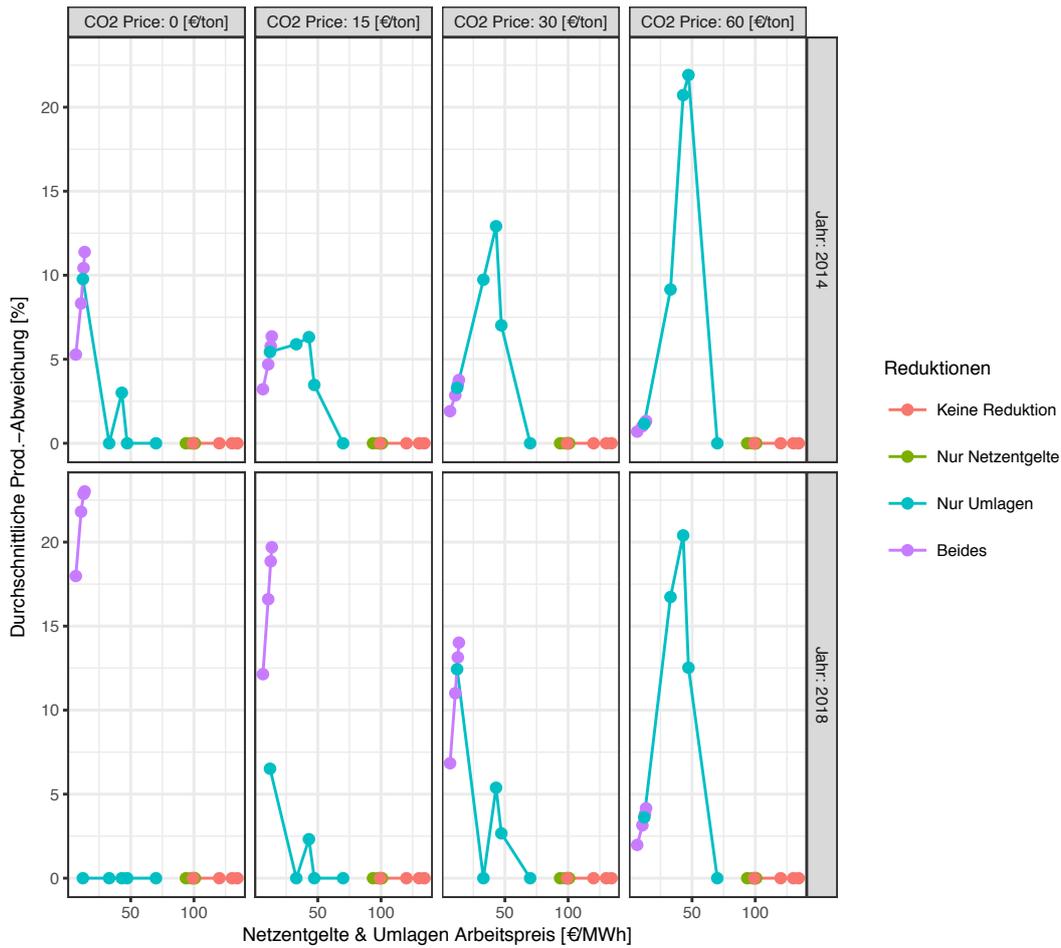


Abb. 7.4: Flexibilitätsbereitstellung: Durchschnittliche Abweichung vom Jahresmittel des Stromverbrauchs

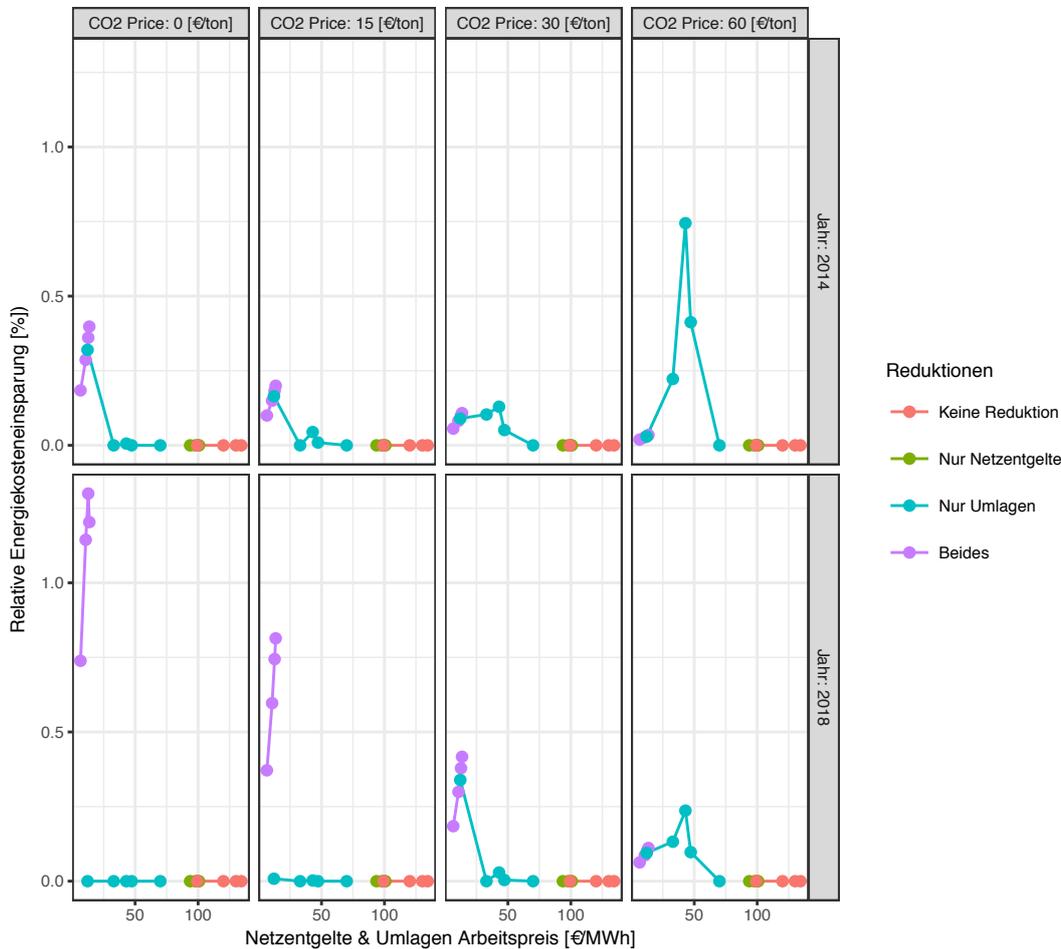


Abb. 7.5: Relative Energiekosteneinsparungen

die Verteilung von Strompreisen ist (wie in Zukunft erwartet), eine größere Breite von Netzentgelten und Umlagen zu Flexibilität führen würde. Die unterschiedliche maximale Höhe der erbrachten Flexibilitäten in den betrachteten CO₂-Preisszenarien ist nicht auf die spezifischen CO₂ Preisniveaus zurückzuführen, sondern deutet auf das relativ enge Band an für Flexibilität vorteilhaften Kombinationen aus Netzentgelten, Umlagen und CO₂-Preisen hin.

Um die Energiekosteneinsparungen (bezogen auf Gesamtenergiekosten, d.h. variable und fixe Strom- und Gaskosten) zu quantifizieren, wurden Modellläufe ohne Flexibilität erstellt. Für jedes betrachtete Szenario an Netzentgelten, Umlagen und Szenarien wurde dabei das optimale konstante Verhältnis aus Strom und Gas gesucht, sodass in Szenarien mit relativ günstigen Strom ein konstant hoher Anteil an Strom genutzt wird, und in Szenarien mit relativem teurem Strom ein konstant niedriger Anteil. So können die tatsächlich durch Flexibilität eingesparten Kosten beziffert werden. Abbildung 7.5 stellt diese Kosten dar; der Zusammenhang zwischen Flexibilitätserbringung (Abbildung 7.4) und Kosteneinsparungen ist deutlich zu sehen. Die relativen Einsparungen sind allerdings relativ gering, und betragen im besten untersuchten Szenario lediglich ca. 1,3 % der Gesamtenergiekosten.

7.1.4 Schlussfolgerungen

In der Glasindustrie existiert prinzipiell ein theoretisches Flexibilitätspotential durch aktive Steuerung von existierenden Hybridisierungsoptionen (durch die wahlweise Nutzung von Elektrizität und Gas zur Wärmebereitstellung in der Glaswanne), welches durch technische, praktische und regulatorische Rahmenbedingungen eingeschränkt wird. Diese Einschränkungen wurden mithilfe eines numerischen Modells anhand des Beispiels einer möglichen Intradayvermarktung von Flexibilität analysiert. Es wurden dabei ausschließlich Energiekosten im Betrieb evaluiert, Investitionskosten für die aktive Steuerung und IT wurden nicht berücksichtigt.

Es wurde festgestellt, dass ein durch technische, ökonomische und regulatorische Rahmenbedingungen gesetztes Fenster an Flexibilität existieren kann: sowohl zu günstige als auch zu teure Strompreise führen zu einem geringen ökonomischen Potential an Flexibilität, da ansonsten (im Rahmen der technischen Möglichkeiten) ausschließlich derjenige Energieträger benutzt wird, welcher dauerhaft günstiger ist. Daher führen nur gewisse Kombinationen an effektiven Strom- und Gaspreisen (beeinflusst durch Steuern, Netzentgelte und Umlagen) dazu, dass der Prozess prinzipiell ökonomisch sinnvoll dynamisch gefahren werden kann, da je nach Zeitpunkt der eine oder andere Energieträger günstiger ist. Bei einer größeren Volatilität von Strompreisen, wie sie in Zukunft erwartet werden, wird dies vermutlich häufiger der Fall sein. Aktuelle CO₂ Preise und weitgehende Ausnahmen von Netzentgelten und Umlagen würden bereits heute dazu führen, dass Elektrizität in der Glasherstellung im Betrieb günstiger sein kann und daher maximal ausgenutzt würde. Ob Investitionen in neue Anlagen mit einem höheren maximalen Energieeintrag durch Elektrizität ökonomisch sinnvoll wären, liegt allerdings außerhalb dieser Analyse, da keine Investitionskosten betrachtet wurden.

7.2 Verbrennung von Synthesegas (D. Zinsmeister; FFE; München)

Die Nutzung von Wasserstoff, welcher aus Erneuerbaren Energien Strom mit Hilfe von Power-to-Gas-Anlagen regenerativ erzeugt wird, bietet eine Möglichkeit, Stromnetze zu entlasten und den Netzausbau zu reduzieren. Hierbei können vorhandene Erdgasnetze als Speicher- und Transportinfrastruktur genutzt werden. Bisherige Untersuchungen und Modellversuche zeigten auf, dass eine Wasserstoffzumischung von bis zu 10 Vol.% für häusliche und gewerbliche Gasgeräte technisch machbar ist [5].

Neben der zentralen Erzeugung und Einspeisung von Wasserstoff ist auch eine dezentrale Erzeugung direkt beim Verbraucher möglich. Für den flexiblen dezentralen Erzeuger bietet dies eine zusätzliche Flexibilität bei der Brennstoffwahl. Dadurch können gegebenenfalls Energiekosten reduziert werden. In Branchengesprächen konnte ermittelt werden, dass bei entsprechender Umrüstung der Industriebrenner ein Wasserstoffanteil von bis zu 40 Vol.-% realisierbar ist. Dieser Prozess soll in der nachfolgenden Modellierung betrachtet werden.

Ein variabler Anteil an Wasserstoff führt bei der Verbrennung zu Änderungen im Luftbedarf, der Verbrennungsgüte und aufgrund des unterschiedlichen Brennwertes auch der Leistung. Um diese Änderungen ausgleichen zu können, sind Umrüstungen an den Gasbrennern und eine Gasanalysevorrichtung notwendig, damit die Qualität der Erzeugnisse nicht negativ beeinflusst wird.

7.2.1 Modellbeschreibung

Für die Modelluntersuchung wird ein gemischt-ganzzahliges lineares Optimierungsmodell (engl.: mixed-integer linear programming, MILP) eingesetzt. Diese Optimierungsart eignet sich sehr gut für die Ausbau- und Einsatzplanung von Systemen.

MILP Optimierung ist ein Teilgebiet der angewandten Mathematik, welches sich mit der Optimierung linearer Zielfunktionen beschäftigt. Im Gegensatz zur linearen Optimierung haben hierbei einige oder alle Variablen die Einschränkung, nur ganzzahlige Werte annehmen zu können. Vorteil dieser zusätzlichen Forderung ist, dass man hierdurch den reellen Lösungsraum einschränkt, was reale Komponenten oftmals genauer abbildet, da diese nicht immer über das gesamte Leistungsspektrum modulierbar sind. Nachteil ist, dass die Lösungsfindung dieser Probleme komplizierter ist. Für die nachfolgende Betrachtung wurde ein solches Optimierungssystem (Ficus [6]) verwendet, welches für die Einsatzplanung von Fabriken erstellt wurde. Im Gegensatz zu vielen anderen Optimierungsansätzen für Energiesysteme können bei diesem Modell neben den Investitions- und Betriebskosten auch Kosten für Leistungsentgelte und Neustarten von Komponenten berücksichtigt werden. Das mathematische Modell ist derart aufgebaut, dass verschiedene Güter- und Energieflüsse berücksichtigt werden können [6, 7].

Die Grundstruktur des Modells ist Abbildung 7.6 dargestellt. Das Modell ist derart aufgebaut, dass die Gesamtkosten des Systems optimiert werden. Diese Kosten können durch Waren (commodities) oder die Investition in, bzw. den Betrieb von Technologien (process) und Speichern entstehen. Für jedes einzelne Gut kann definiert werden, ob dieses importiert/exportiert (blau), gespeichert (grün), verbraucht (rot), oder in verschiedenen Prozessen verwendet, bzw. erzeugt (grau) wird. Die Pfeile stellen die jeweilige Richtung des Warenflusses dar. Das System sorgt dafür, dass zu jedem Zeitpunkt die Bilanz der einzelnen Güterflüsse ausgeglichen ist. Investitionen für eine Erweiterung der Anlagen oder Speicher werden mit einer Abschreibungsdauer und einem gewichteten durchschnittlichen Kapitalkostensatz (WACC: Weighted Average Cost of Capital) in der Simulation berücksichtigt.

Kosten, bzw. Erträge der importierten und exportierten Güter und deren Verbrauch werden vorab in einer Zeitreihe abgelegt [6]. Für das Modell wird wie in Abschnitt 7.1.1 von einer perfekten Voraussicht der Einsatzplanung und der Energiepreise ausgegangen.

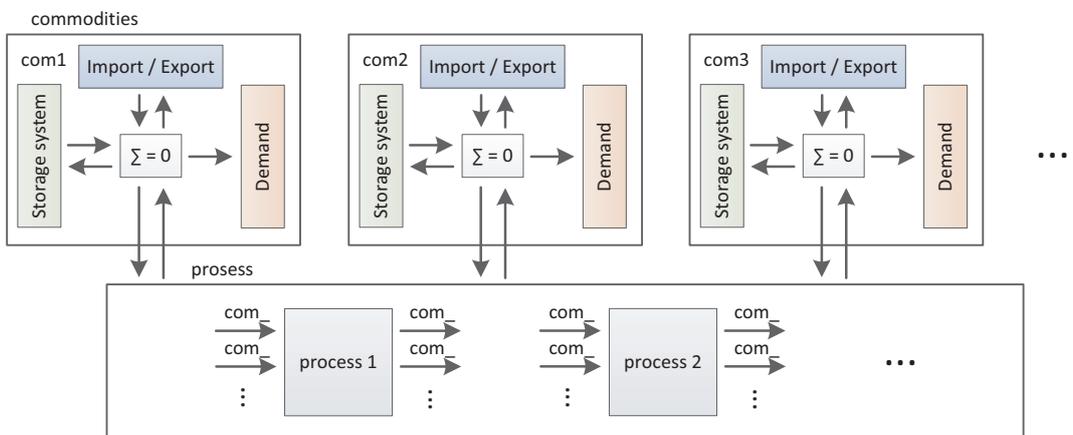


Abb. 7.6: Exemplarische Struktur der Modellierung in Ficus

Die zu optimierende Zielfunktion lautet:

$$\min_{\chi^{tot}} = \min \left(\chi_p + \chi_s + \chi^{imp} + \chi^{exp} + \chi^{peak} + \chi^{fee} \right) \tag{Formel 1}$$

Die einzelnen Gleichungen der Zielfunktion sind in Tabelle 74, die unterschiedlichen Variablen in Tabelle 7.5 aufgeführt. Eine detaillierte Beschreibung der Unterfunktionen ist in [6] zu finden.

Tabelle 7.4: Gleichungen der Zielfunktion

Beschreibung	Gleichung
Prozesskosten	$\chi = \chi^{inv} + \chi^{fix} + \chi^{var}$
Speicherkosten	$\chi = \chi^{inv} + \chi^{fix} + \chi^{var}$
Importkosten	$\chi^{imp} = \sum_{t \in \mathcal{T}} \sum_{c \in \mathcal{C}^{imp}} \rho_{c,t}^{imp} \cdot x_{c,t}^{imp} \cdot \frac{\Delta T}{3600s} \cdot \frac{1}{\Delta T^{tot}}$
Exportkosten	$\chi^{exp} = \sum_{t \in \mathcal{T}} \sum_{c \in \mathcal{C}^{exp}} -\rho_{c,t}^{exp} \cdot x_{c,t}^{exp} \cdot \frac{\Delta T}{3600s} \cdot \frac{1}{\Delta T^{tot}}$
Leistungsentgelt	$\chi^{peak} = \sum_{c \in \mathcal{C}^{imp}} \tilde{\rho}_c^{peak} \cdot \chi_c^{peak}$
Zusätzliche Gebühren	χ^{fee}

Tabelle 7.5: Variablen

Variable	Beschreibung
$t \in \mathcal{T}$	Zeitabschnitt;
$c \in \mathcal{C}$	Gut (comodity)
T	Gesamtzahl an Zeitschritten
ΔT	Zeitschrittdauer
ΔT^{tot}	Gesamtdauer
χ_s^{inv}, χ^{inv}	Spezifische Investitionskosten
χ_s^{fix}, χ^{fix}	Spezifische fixe Kosten
χ_s^{var}, χ^{var}	Spezifische variable Kosten
$\chi_{c,t}^{imp}, \chi_{c,t}^{exp}$	Import-/ Exportkosten des Gutes c in Zeitschritt t
χ^{peak}	Leistungsentgelt
$\rho_{c,t}^{imp}, \rho_{c,t}^{exp}$	Importierte / Exportierte Leistung des Gutes c in Zeitschritt t
$\tilde{\rho}_c^{peak}$	Maximale bezogene Leistung des Gutes c (Bei Energieträgern)

7.2.2 Prozessbeschreibung

Es wird ein fiktiver Hersteller von Schamotte betrachtet. Abbildung 7.7 stellt das Schema des modellierten Prozesses mit den Daten des Nennbetriebspunktes und blau dargestellt die Erweiterung zur Verbrennung von Elektrolysegas dar. Für die Modellierung wird davon ausgegangen, dass wöchentlich 350 Tonnen fertiges Produkt abgerufen werden.

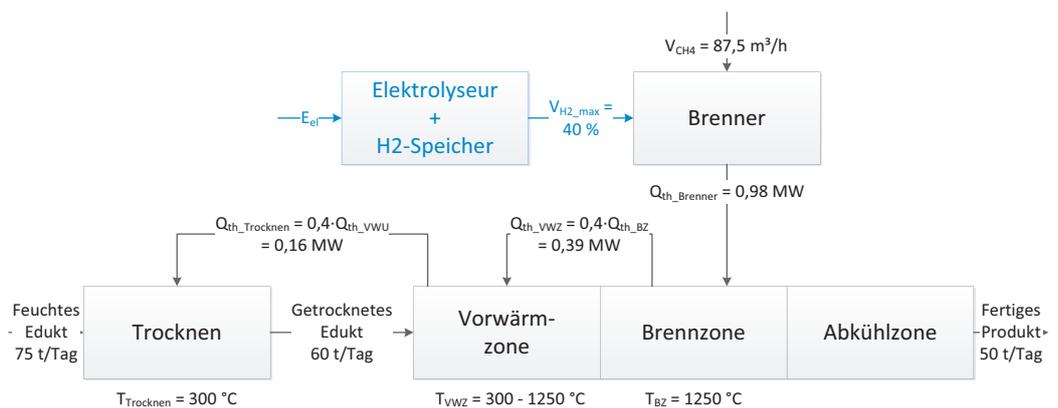


Abb. 7.7: Schema des modellierten Prozesses, in schwarz ist der bisherige Prozess dargestellt, blau dargestellt ist die Erweiterung zur Verbrennung von Synthesegas

Die angenommenen Kosten der Brennstoffe und die Kosten des CO₂-Ausstoßes werden auf Grundlage der in Tabelle 7.6 angenommenen Leistungs- und Arbeitsentgelte berechnet. Da keine Firmendaten bekannt sind, werden als Grundlage die Brennstoffpreise der Analysen des Energiewirtschaftliches Institut an der Universität zu Köln (EWI) [7,8], des Mona-Projekts [9] und der Preise am Spotmarkt 2017 [10] verwendet. Zusätzlich werden die in [11] aufgeführten durchschnittlichen Abgaben von Unternehmen aufgeschlagen.

Tabelle 7.6: Kosten für Import- / Exportgüter

Import- / Exportgüter	Leistungsentgelt [€/kW/a]	Arbeitspreis		Quelle
		Szenario 2017	Szenario 2030	
Strom	61,47	Spotmarkt 2017, inkl. Abgaben	Preiszeitreihe EWI, inkl. Abgaben	Day-Ahead-Auction (epexspot), EWI [12], Abgaben [11].
Erdgas	7,22	0,0273 €/kWh	0,0288 €/kWh	Mona [9], inkl. Abgaben
CO ₂	0	0 €/t / 7,6 €/t ⁵	30 €/t	Mona [9]

Im Modell von EWI steigen die Endkonsumentenpreise für energieintensive Modelle von 55 €/MWh im Jahr 2011 auf 77,8 €/MWh im Jahr 2030 [8].

Die Prozess- und Speicherkosten, welche in der Zielfunktion berücksichtigt werden, werden aufgrund der in Tabelle 7.7 und Tabelle 7.8 aufgelisteten Technologiekosten und -eigenschaften berechnet. Diese wurden in Zusammenarbeit mit Branchenvertretern und anhand einer Literaturrecherche erarbeitet. Für die Investition wird eine Amortisationszeit von 10 Jahren und ein gewichteter durchschnittlicher Kapitalkostensatz (wacc) von 5 % zugrunde gelegt.

Tabelle 7.7: Technologiekosten

Art	Investitionskosten	Betriebskosten	Installierte / maximale Kapazität	Quelle
Gasbrenner	-	-	1,2 MW / 1,2 MW	Branchengespräche
Gasbrenner (notwendige Erweiterungen)	100.000 €	-	-	Branchengespräche
Elektrolyseur	1500 €/kW	75 €/kW	0 MW / 0,5 MW	[13, 14, 15]
H ₂ -Speicher	14 €/kWh	0,3 €/kWh	0 MWh / offen	[15, 16]
Lagerhalle (Produkt)	-	-	400 t / 400 t ⁶	Branchengespräche
Lagerhalle (Rohstoffe)	-	-	200 t / 200 t	Branchengespräche

Tabelle 7.8: Technologieeigenschaften

Art	Wirkungsgrad / Zyklusnutzungsgrad [%]	Selbstentladungsrate [% / Monat]	Quelle
Gasbrenner	100 ⁷	-	Branchengespräche
Elektrolyseur	70	-	[15]
H ₂ Speicher	97,8	0,5	[15]
Lagerhalle (Produkt)	100	0	Branchengespräche
Lagerhalle (Rohstoffe)	100	0	Branchengespräche

5 Die Feuerfestindustrie ist von den CO₂-Abgaben befreit, weshalb bei diesem Szenario ein Preis von 0 €/t verwendet wird

6 Größe der Lagerhalle: 4000 t, da allerdings bis zu 10 verschiedene Sorten hergestellt und gelagert werden, wurde für die Modellierung eine Größe von 400 t pro Abruf angenommen

7 Datengrundlage des Branchenpartners war der Gasverbrauch, nicht die tatsächlich erzeugte Wärmemenge

7.2.3 Analysen

Nachfolgend werden verschiedene Szenarien analysiert. Als Vergleichsszenario wird das Jahr 2017 modelliert, bei welchem die Befreiung von CO₂-Abgaben berücksichtigt ist. Wie in Abbildung 7.8 zu sehen ist, sind selbst bei einer bereits erfolgten Umstellung des Gasbrenners und einem vorhandenen Elektrolyseur die Kosten im betrachteten Szenario aufgrund der zusätzlichen Fixkosten des Elektrolyseurs höher als bei einer reinen Verbrennung von Erdgas. Es wurde angenommen, dass ein Elektrolyseur mit einer Leistung 100 kW installiert ist und kein zusätzliches Leistungsentgelt für den bezogenen Strom anfällt. Ein zusätzlich anfallendes Leistungsentgelt würde den Betrieb des Elektrolyseurs komplett verhindern.

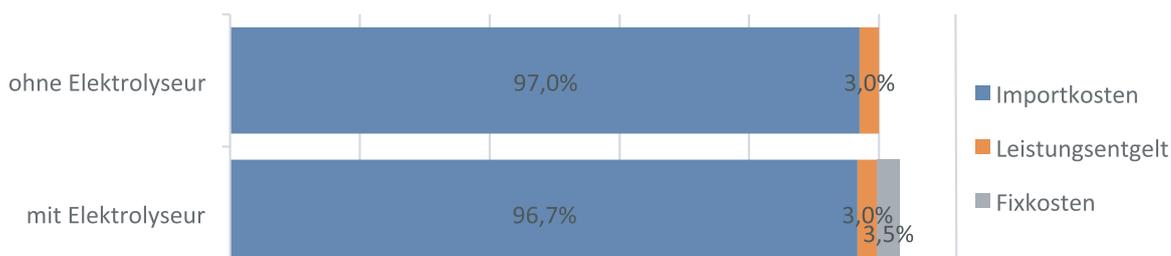


Abb. 7.8: Einfluss der Fixkosten des Elektrolyseur

In der Modellierung des Jahres 2030 werden Kosten für den CO₂-Ausstoß berücksichtigt und verschiedene Szenarien analysiert. Zuerst wird der Einfluss sinkender Investitionskosten betrachtet, vor allem die Einsatzmöglichkeit der Wasserstoffverbrennung, wenn aufgrund schwankenden Wasserstoffanteils im Erdgasnetz die Erweiterungen am Gasbrenner bereits erfolgt sind. Dadurch würde ein sehr hoher Teil der Investitionskosten entfallen. Anschließend wird der Einfluss der Fixkosten zum Betreiben des Elektrolyseurs untersucht.

In der abschließenden Betrachtung wird angenommen, dass für die Elektrolyse in Zeiten des Stromüberschusses keine zusätzlichen Abgaben und kein höheres Leistungsentgelt entrichtet werden muss. Abbildung 7.9 zeigt die Aufteilung der Kosten des Modells, wenn die Investitions- und Fixkosten des Elektrolyseurs 150 €/kW, bzw. 40 €/kW/a betragen.

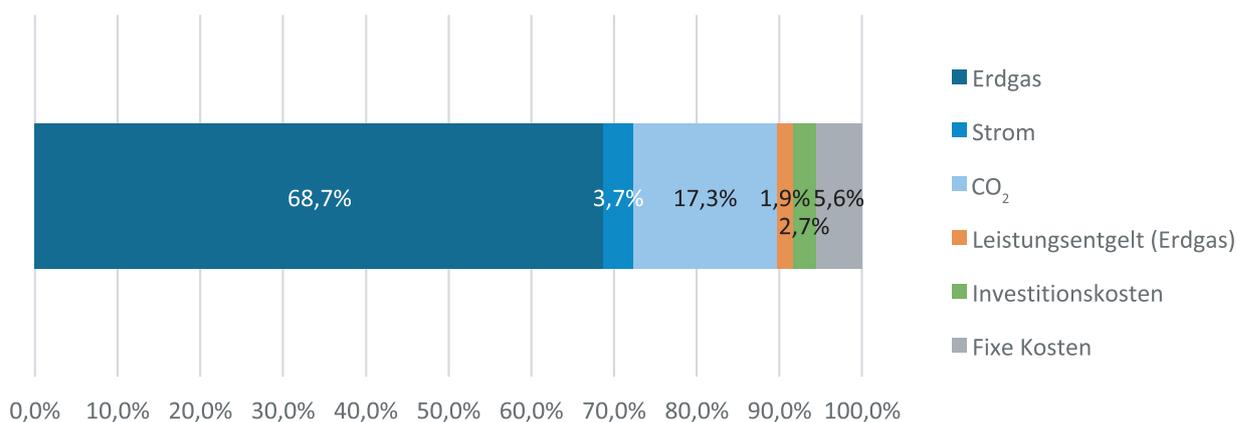


Abb. 7.9: Kostenverteilung

Exemplarisch ist in Abbildung 7.10 für zwei Wochen Ende Februar die Produktion und der Energiebezug dargestellt. Es ist deutlich erkennbar, dass zu Zeitpunkten niedriger Stromkosten der Erdgasverbrauch sinkt und oftmals gleichzeitig die Produktion gesteigert wird. Um auf wechselnde Strompreise reagieren zu können, ist ein flexibel betriebbarer Elektrolyseur notwendig. Die Modellierung ergab außerdem, dass der Betrieb eines kleinen Wasserstoffspeichers mit ca. 13 kg Speicherinhalt angeschafft werden würde.

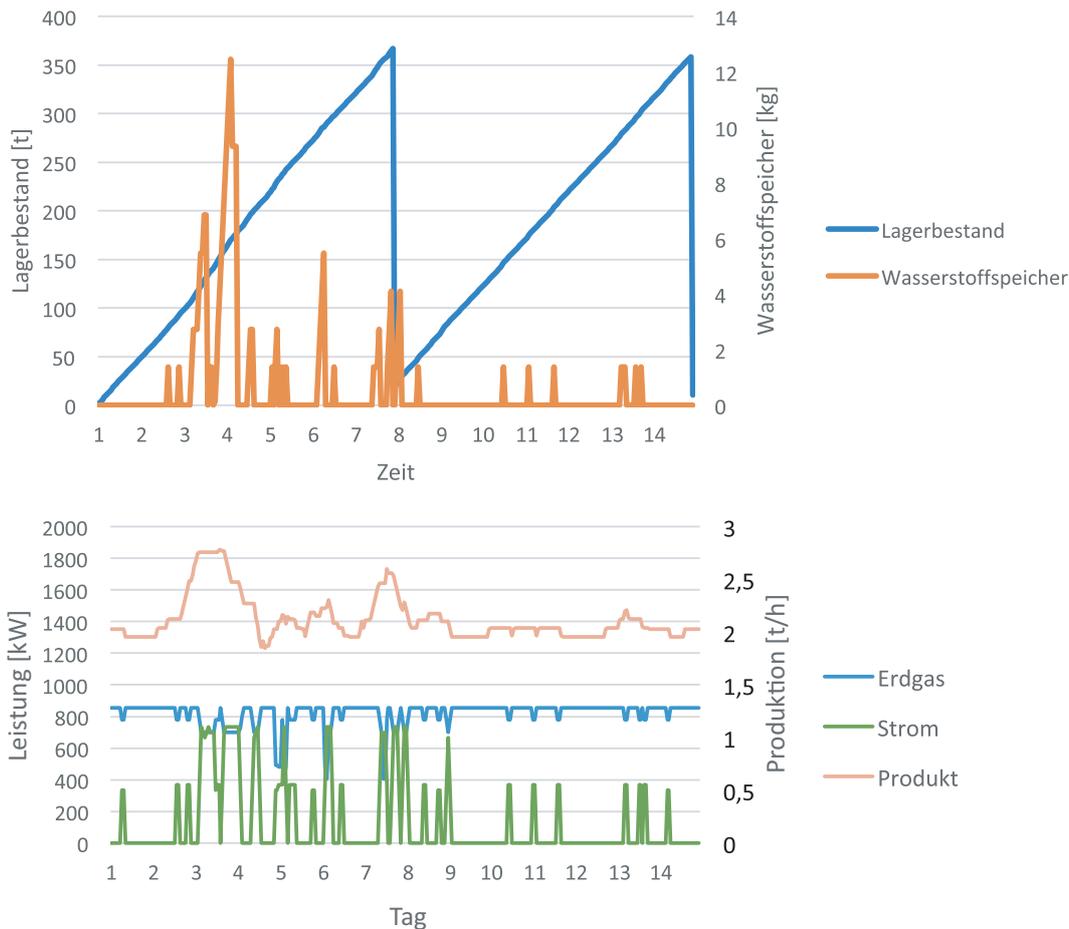


Abb. 7.10: Produktionsverlauf für zwei exemplarische Wochen Ende Februar

7.2.4 Fazit

Der Einsatz eines Elektrolyseurs zur Verbrennung von Synthesegas ist bei einer wirtschaftlichen Betrachtung in Zukunft nur unter bestimmten Voraussetzungen rentabel:

- **Investitionskosten:**
Die Investitionskosten für die Anschaffung eines Elektrolyseurs müssen stark sinken, bzw. von staatlicher Seite entsprechend subventioniert werden. Im Modell lohnt sich der Einsatz eines Elektrolyseurs erst bei maximalen Kosten von 150 €/kW, was 10 % der aktuellen Kosten entspricht.
Eine Nachrüstung der Gasbrenner mit entsprechender Mess- und Regeltechnik einzig zur Verbrennung von durch Elektrolyse hergestelltem Wasserstoff verhindert aus ökonomischer Sicht die Erschließung dieses Flexibilitätspotentials. Ein Einsatz wäre nur dann möglich, wenn aus anderen Gründen (z.B. schwankende Erdgasqualität) die Anschaffung erfolgen muss. Dies stellt allerdings eine hohe finanzielle Belastung der Hersteller dar.
- **Fixkosten des Elektrolyseurs:**
Die anfallenden Fixkosten zum Betrieb des Elektrolyseurs müssten um mindestens 65 % niedriger sein als bei den in [15] aufgeführten Daten.
- **Leistungsentgelt:**
Sollte ein zusätzliches Leistungsentgelt zu Zeiten niedriger Strompreise anfallen, ist der Strombezug nicht rentabel. Eine Lösung hierfür wäre das Einführen eines zeitlich flexiblen Leistungsentgelts, welches zum Strombezug in Zeiten von Stromüberschuss motivieren kann.
- **Stromabgaben:**
Der Wegfall von Abgaben auf Strom in Zeiten von Stromüberschuss würde die Rentabilität der Verbrennung von Synthesegas unterstützen.

Weiter ergibt die Modellierung, dass sich der Einsatz eines Wasserstoffspeichers erst bei sehr niedrigen Elektrolyseurkosten lohnt und dieser dann auch nur ein sehr geringes Volumen hat.

7.3 Elektrische Verbrennungsluftvorwärmung als hybrider Prozess (D. Zinsmeister; FFE; München)

In der Grundstoffindustrie wird die für verschiedene Prozesse benötigte Wärme oftmals durch Verbrennen von Erdgas bereitgestellt. Um hierbei den Wirkungsgrad der Brenner zu steigern, werden bereits häufig Rekuperatoren zur Vorwärmung der Verbrennungsluft eingesetzt. Die Erweiterung dieser Brenner um ein elektrisches Heizgerät ermöglicht die Hybridisierung der Verbrennungsluftvorwärmung, wodurch brennstoffbeheizte Industrieöfen Flexibilität am Strommarkt anbieten und somit Energiekosten und den CO_2 -Ausstoß reduzieren können. Ein weiterer Vorteil der hybriden Verbrennungsluftvorwärmung ist, dass hierdurch beim Anfahren der Öfen die Verbrennungsluft bereits unabhängig von der Abgastemperatur aufgeheizt werden kann, was zu einer verbesserten Dynamik beim Anfahren und Brennstoffeinsparungen führen kann. Dieser dynamische Effekt wurde in der Modellierung nicht dargestellt, da hierzu detaillierte Informationen zu Verlusten beim Anfahren der Verbrennung notwendig wären.

Es wird wieder das in Kapitel 7.2.1 beschriebene Optimierungsprogramm *ficus* verwendet.

7.3.1 Prozessbeschreibung

Die hybride Verbrennungsluftvorwärmung wird schematisch in Abbildung 7.11 beschrieben. Der elektrische Heizstab kann zusätzlich zur Abgasrekuperation variabel betrieben werden. Für die Betrachtung wurde ein konstanter Wärmebezug von 100 kW angenommen, da in der Grundstoffindustrie häufig versucht wird, Prozesse konstant zu fahren. Zur Analyse von konkreten Anlagen und Umsetzungsmöglichkeiten können hier auch einfach dynamische Werte angenommen, oder das Modell erweitert werden.

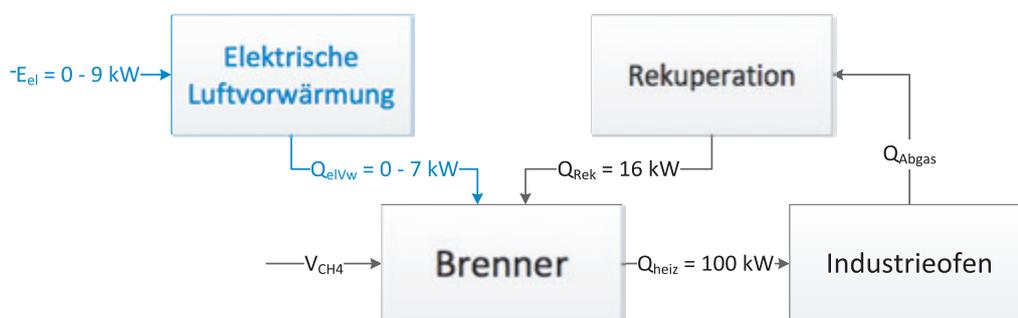


Abb. 7.11: Schema des modellierten Prozesses, in schwarz ist der bisherige Prozess dargestellt, blau dargestellt ist die Erweiterung zur elektrischen Verbrennungsluftvorwärmung

Zur Bestimmung der Import-/ Exportkosten und Leistungsentgelte werden die bereits vorgestellten Kosten aus Tabelle 7.6 verwendet.

In einem Versuchsaufbau am Institut für Industrieofenbau und Wärmetechnik der RWTH Aachen University wurden bereits Simulationsergebnisse zur hybriden Verbrennungsluftvorwärmung experimentell validiert und auf Machbarkeit untersucht [17]. Die hierbei verwendeten Daten dienen als Grundlage für die Technologie und sind in Tabelle 7.9 aufgeführt. Wie bereits im vorherigen Kapitel werden für die Investition eine Amortisationszeit von 10 Jahren und ein gewichteter durchschnittlicher Kapitalkostensatz von 5 % zugrunde gelegt.

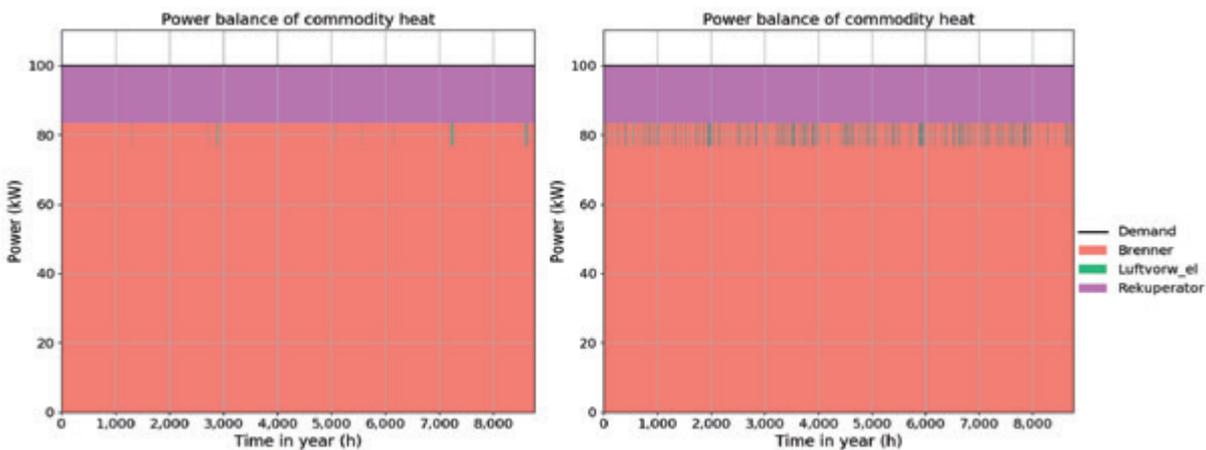
Tabelle 7.9: Technologiekosten und -eigenschaften

Art	Investitionskosten	Installierte Kapazität	Wirkungsgrad [%]	Quelle
Gasbrenner	–	100 kW	100 ⁸	Annahmen auf Grundlage von [17]
Rekuperation	–	16 kW	100 ⁹	Annahmen auf Grundlage von [17]
Elektrische Luftvorwärmung	1000 €/kW	–	73,6	Abschätzungen [17]

7.3.2 Analysen

In diesem Abschnitt werden ähnliche Szenarien wie in Kapitel 7.1.2 analysiert. Ausgehend wird wieder das Referenzszenario mit Daten des Jahres 2017 betrachtet. Wie erwartet, ist zur Minderung der Brennstoffkosten die Investition in eine hybride Verbrennungsluftvorwärmung noch nicht lohnend. Selbst wenn diese bereits zur Verbesserung der Dynamik beim Anfahren installiert wäre, würde aus ökonomischen Gründen der Einsatz des elektrischen Heizstabs nur dann Sinn machen, wenn hierdurch kein höheres Leistungsentgelt zu entrichten ist. Der Einsatz des Elektroheizstabs bei gleich bleibendem Leistungsentgelt ist in Abbildung 7.12 (links) aufgezeichnet. Hierbei kommt es vereinzelt zum Einsatz des elektrischen Heizstabs, der Erdgaseinsatz kann allerdings kaum gesenkt werden.

Auf der rechten Seite von Abbildung 7.12 ist die gleiche Betrachtung bei Energiekosten des Jahres 2030 dargestellt. Es ist erkennbar, dass bei dem verwendeten Strompreismodell im Jahr 2030 aufgrund der stärker schwankenden Strompreise der Einsatz des elektrischen Heizstabs sich häufiger lohnt als aktuell. Wie schon im Referenzjahr 2017 würde allerdings ein höheres Leistungsentgelt für den Einsatz des elektrischen Heizstabs zu höheren Energiekosten führen. Die Kosten der Wärmeerzeugung stiegen trotz häufigerem Einsatz des elektrischen Heizstabs bei den getroffenen Annahmen um insgesamt 45 %.



Im nächsten Schritt wird untersucht, welche Voraussetzungen gegeben sein müssen, damit sich die Anschaffung einer hybriden Verbrennungsluftvorwärmung zur Flexibilisierung lohnt bei dem Szenario im Jahr 2030 lohnt. Es wird wiederum der Einfluss der verschiedenen Kostenfaktoren betrachtet.

Ein Ausbau der elektrischen Verbrennungsluftvorwärmung erfolgt hierbei erst ab einem Investitionspreis des elektrischen Heizstabs von ca. 100 €/kW. Abbildung 7.13 oben zeigt die Aufteilung der Kosten, wenn kein zusätzliches Leistungsentgelt entrichtet werden muss. Abbildung 7.13 unten stellt dem gegenüber die Kosten dar, wenn zusätzlich die Stromabgaben in Zeiten von Stromüberschuss entfallen. Der Entfall der Stromabgaben würde zu einem 2,3-mal häufigeren Einsatz der elektrischen Verbrennungsluftvorwärmung führen.

Abb. 7.12: Einsatz der elektrischen Verbrennungsluftvorwärmung bei Verwendung der Stromkosten des Jahres 2017 (links) und 2030 (rechts)

⁸ Grundlage der Betrachtung ist die Massenbilanz der Luftvorwärmung, als Wirkungsgrad kann 100 % angenommen werden

⁹ Datengrundlage des Branchenpartners war der Gasverbrauch, nicht die tatsächlich erzeugte Wärmemenge

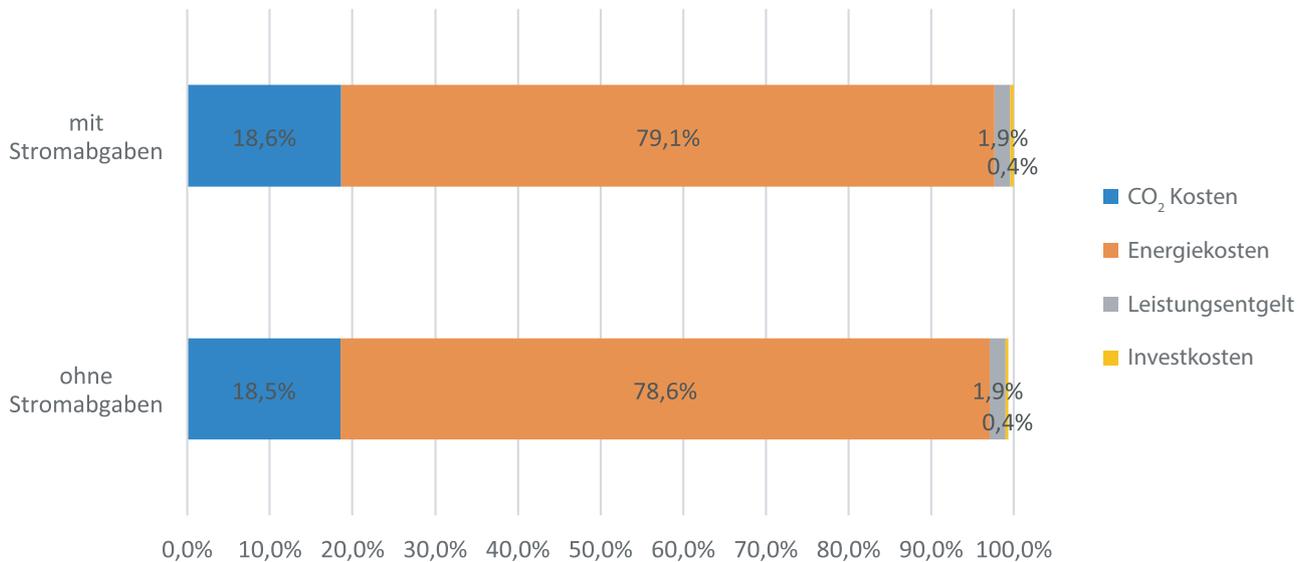


Abb. 7.13: Kostenaufteilung hybride Verbrennungsluftvorwärmung

7.3.3 Fazit

Im Vergleich zur Verbrennung von Synthesegas aus dem vorherigen Kapitel ist der Einsatz der hybriden Verbrennungsluftvorwärmung als Maßnahme zur Steigerung der Flexibilität einfacher umzusetzen.

Für den Einsatz der hybriden Verbrennungsluftvorwärmung zur Flexibilisierung des Prozesses sind allerdings ähnliche Voraussetzungen wie in Abschnitt 7.2.4 notwendig:

- **Investitionskosten:**
Die Investitionskosten für eine Erweiterung der Verbrennungsluftvorwärmung rein zur Flexibilisierung des Energiebezugs dürfen maximal 200 €/kW betragen.
- **Leistungsentgelt:**
Das Anfallen eines zusätzlichen Leistungsentgelts für den Bezug elektrischer Energie ist ein KO-Kriterium, das den Einsatz der hybriden Verbrennungsluftvorwärmung verhindert.
- **Stromabgaben:**
Eine Befreiung von Abgaben auf Strom in Zeiten von Stromüberschuss würde die Rentabilität der Verbrennung von Synthesegas unterstützen und zu mehr Flexibilität motivieren.

7.4 Literatur

- [1] GITZHOFFER ET. AL., 2008. Schlussbericht, Förderkennzeichen: 206 42 300/02, Teilvorhaben 02: Bereitstellung aktueller Emissionsdaten für die Glas- und Mineralfaserindustrie.
- [2] RICHTSTEIN, J. & NEUHOFF, K., 2018. Vergleich der wirtschaftlichen Potenziale ausgewählter Prozesse, Kapitel 7, in „Flexibilitätsoptionen in der Grundstoffindustrie“, Hrgs. Florian Ausfelder, Antje Seitz und Serafin von Roon, 1. Auflage, ISBN: 978-3-89746-206-9
- [3] WESTNETZ, 2018. Entgelte für Netznutzung, Jahresleistungspreissystem für Entnahme mit registrierender Lastgangmessung.
- [4] BUNDESNETZAGENTUR, 2018. Monitoringbericht 2018, Monitoringbericht gemäß § 63 Abs. 3 i. V. m. § 35 EnWG und § 48 Abs. 3 i. V. m. § 53 Abs. 3 GWB, Stand: 29. Mai 2019.
- [5] DÖRR, H., K. KRÖGER, F. GRAF, W. KÖPPEL, F. BURMEISTER, SENNER JANINA, P. NITSCHKE-KOWSKY und W. WEBING, 2016. Untersuchungen zur Einspeisung von Wasserstoff in ein Erdgasnetz. DVGW energie | wasser-praxis, 2016(11/2016).
- [6] ATABAY, D., 2017. An open-source model for optimal design and operation of industrial energy systems [online]. Energy, 121, 803-821. ISSN 03605442 [Zugriff am: 21. Juni 2019]. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.energy.2017.01.030
- [7] RINGKJØB, H.-K., P.M. HAUGAN und I.M. SOLBREKKE, 2018. A review of modelling tools for energy and electricity systems with large shares of variable renewables [online]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 96, 440-459. ISSN 13640321. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.rser.2018.08.002
- [8] KNAUT, A., C. TODE, D. LINDENBERGER, R. MALISCHEK, S. PAULUS und J. WAGNER, 2016. The reference forecast of the German energy transition—An outlook on electricity markets [online]. Energy Policy, 92, 477-491. ISSN 03014215 [Zugriff am: 28. Juni 2019]. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.enpol.2016.02.010
- [9] REGETT, A., A. ZEISELMAIR, K. WACHINGER und C. HELLER, März 2017. Merit Order Netz-Ausbau 2030. Szenario-Analyse - potenzielle zukünftige Rahmenbedingungen für den Netz-Ausbau : Abschlussbericht. München: fE Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V.
- [10] EPEXSPOT. Market Data Day-Ahead Auction [online]. Verfügbar unter: <http://www.epexspot.com/en/market-data/dayaheadauction>
- [11] BDEW BUNDESVERBAND DER ENERGIE- UND WASSERWIRTSCHAFT E.V. BDEW-Strompreisanalyse Januar 2019 [online] [Zugriff am: 21. Juni 2019].
- [12] RICHTER, J. DIMENSION – A Dispatch and Investment Model for European Electricity Markets.
- [13] HENTSCHEL, J., 2014. Potenziale nachhaltiger Power-to-Gas Kraftstoffe aus Elektrizitätsüberschüssen im Jahr 2030. Dissertation. AutoUni-Schriftenreihe. 61. ISBN 978-3-8325-3702-9.
- [14] SCHMIDT, O., A. GAMBHIR, I. STAFFELL, A. HAWKES, J. NELSON und S. FEW, 2017. Future cost and performance of water electrolysis: An expert elicitation study [online]. International Journal of Hydrogen Energy, 42(52), 30470-30492. ISSN 03603199. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.ijhydene.2017.10.045
- [15] HOVEN, M.v.d., 2015. *Technology Roadmap. Hydrogen and Fuel Cells* [online]. Verfügbar unter: [http://ieahydrogen.org/pdfs/TechnologyRoadmapHydrogenandFuelCells-\(1\).aspx](http://ieahydrogen.org/pdfs/TechnologyRoadmapHydrogenandFuelCells-(1).aspx)
- [16] BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR UND DIGITALE INFRASTRUKTUR (BMVI), 2014. Integration von Wind-Wasserstoff-Systemen in das Energiesystem. Abschlussbericht [online]. Berlin. Verfügbar unter: https://www.now-gmbh.de/content/1-aktuelles/1-presse/20140402-abschlussbericht-zur-integration-von-wind-wasserstoff-systemen-in-das-energiesystem-ist-veroeffentlicht/abschlussbericht_integrations_von_wind-wasserstoff-systemen_in_das_energiesystem.pdf
- [17] SCHWOTZER, C., F. SCHECK, H. PFEIFER und W. BENDER, 2018. Hybrider Rekuperator für den Einsatz erneuerbarer Energien im Industrieofenbau. Prozesswärme, 2018(03/2018).

8 FALLBEISPIELE FÜR FLEXIBILITÄTSPOTENZIALE UND FLEXIBILITÄTSPERSPEKTIVEN IN DER STAHLHERSTELLUNG

Verantwortliche Autoren

Steffen Möhring steffen.moehring@bfi.de
 VDEh-Betriebsforschungsinstitut GmbH, Sohnstraße 65, 40237 Düsseldorf

Roland Pietruck roland.pietruck@bfi.de
 VDEh-Betriebsforschungsinstitut GmbH, Sohnstraße 65, 40237 Düsseldorf

Holger Rosemann holger.rosemann@bfi.de
 VDEh-Betriebsforschungsinstitut GmbH, Sohnstraße 65, 40237 Düsseldorf

Andreas Queck andreas.queck@bfi.de
 VDEh-Betriebsforschungsinstitut GmbH, Sohnstraße 65, 40237 Düsseldorf

Weitere beteiligte Partner

Michael Mayer michael.mayer@lech-stahlwerke.de
 Lech-Stahlwerke GmbH, Industriestrasse 1, 86405 Meitingen

Matthias Weng matthias.weng@arcelormittal.com
 Arcelor Mittal Hamburg GmbH, Dradenaustrasse 33, 21129 Hamburg

8.1 Vorbemerkungen

In Teil 1 des Berichts [1] wurde die Herstellung von Eisen- und Stahl entsprechend der Elektroofenroute erläutert und dabei insbesondere das Flexibilitätspotential des Elektrolichtbogenofens untersucht. Diese Untersuchung wird in dem vorliegenden Teil 2 verifiziert und ergänzt um vertiefte Analysen des Betriebsverhaltens eines Elektrolichtbogenofens. Weiterhin wird die Flexibilität größerer Haupt- und Nebenanlagen der Elektrostahlroute betrachtet. Im vorliegenden Teil 2 werden weitere Potentiale und Perspektiven für die Schaffung neuer Flexibilitäten in der Eisen- und Stahlindustrie dargestellt. So kann Strom in einigen Prozessen auch hybrid als Energieträger genutzt werden mit teilweiser Substitution von fossilen Brennstoffen. In diesem Zusammenhang wurden Perspektiven zur Flexibilisierung des Brennstoffeinsatzes mittels einer hybriden Beheizung eines Warmwalzwerks untersucht. Außerdem werden Möglichkeiten zur Umstellung von fossilen Brennstoffen der Stahlerzeugung auf synthetische Gase betrachtet.

8.2 Betriebsdaten eines Elektrolichtbogenofens

Elektrolichtbogenöfen kommen aufgrund ihrer großen elektrischen Leistungsaufnahme und ihres chargenweisen Betriebes für eine flexible Nutzung von elektrischer Energie besonders in Frage. Der Vorgang zum Einschmelzen von Stahlschrott erfordert i.d.R. eine Chargenzeit von ca. 40-60 min. Innerhalb dieser Zykluszeit werden 1 bis 3 Körbe an Schrott in das Ofengefäß gefüllt und eingeschmolzen. Der Einschmelzvorgang wird mehrfach kurzzeitig unterbrochen z.B. für das Nachsetzen des 2. oder 3. Korbes. Kurz vor dem Abstich finden z. T. weitere kurze Unterbrechungen für Probenahmen und Temperaturmessungen statt, für die der Lichtbogenofen abzuschalten ist („power-off“). In der „power-on“-Betriebszeit mit aktivem Lichtbogen kann die Leistung des Lichtbogens

ggf. verändert und an den Einschmelzvorgang angepasst werden. Die power-on-Betriebszeit eines Elektrolichtbogenofens kann somit in gewissen Grenzen beeinflusst und begrenzt für einen flexiblen Energieeinsatz genutzt werden.

Im Rahmen des SynErgie-Vorhabens war zu ermitteln, in welcher Bandbreite die elektrisch übertragene Leistung eines Elektrolichtbogenofens variieren kann und welche Kenngrößen der Leistungsaufnahme für Hochrechnungen und Abschätzungen der Energieaufnahme eines Elektrolichtbogenofens verwendet werden können. Zu diesem Zweck wurde exemplarisch das Betriebsverhalten des Elektrolichtbogenofens des Elektrostahlwerks ArcelorMittal Hamburg (AMH) über einen repräsentativen Betriebszeitraum von 12 Tagen untersucht. Die technischen Daten der Anlage sind nachfolgend in Tabelle 8.1 aufgeführt. In der Versuchszeit wurden insgesamt 210 Chargen hergestellt mit einem mittleren Abstichgewicht von 149,3 t/Charge und einer Stahlproduktion von insgesamt 31.361 t Rohstahl.

Tabelle 8.1: Technische Daten des untersuchten AMH-Elektrolichtbogenofens

Bauart	Drehstrom-Lichtbogenofen
Rohstoffe zur Beschickung	ca. 1.118 kg/t RS (43 % Stahlschrott, 57 % DRI)
Elektroden-Durchmesser	610 mm
Gefäßdurchmesser	6.800 mm
Mittleres Abstichgewicht	rd. 150 t
Nennleistung des Trafos	120 MVA
Regelbereich Sekundärspannung	550 – 960 V

8.2.1 Zeitliche Aggregation der Prozessdaten

Bei der Modellierung von Energiesystemen bilden die Annahmen bzgl. der zeitlichen und/oder räumlichen Aggregation der verwendeten Daten eine wesentliche Grundlage für nachfolgende Modellbetrachtungen [2]. Durch zeitliche / räumliche Aggregation von Daten wird die Komplexität der Analyse und die Streubreite der Resultate reduziert. Deshalb wurden in der vorliegenden Untersuchung die Daten zunächst mit hoher zeitlicher Auflösung in Intervallen von 5 Sekunden erfasst und zu Mittelwerten über 15 Minuten, 1 Stunde, 8 Stunden und 24 Stunden aggregiert. Aus Tabelle 8.2 geht hervor, dass die mittlere Leistung einheitlich 56,7 MW beträgt. Der jeweilige Maximalwert und damit die Varianz der Daten verändert sich in den verschiedenen Aggregationsintervallen von 128 MW als Maximalwert der 5 sec-Datensätze bis zu 70,5 MW als Maximalwert der Tagesdurchschnittswerte.

Tabelle 8.2: Varianz der Messdaten bei unterschiedlicher Aggregation

Aggregationsintervall		5 sec	15 min	1 h	8 h	24 h
Datensätze	1/d	17.280	96	24	3	1
P Max/Plnst.	%	106,7 %	100,8 %	78,0 %	62,5 %	58,8 %
P Max	MW	128,0	121,0	93,6	75,0	70,5
P Mittel	MW	56,7				
P Min	MW	0,0	0,0	0,0	0,0	20,3

8.2.2 Visualisierung der 15 min- bzw. 1 Std.-Mittelwerte

Ziel der Datenauswertung ist es, die Schwankungsbreite und Varianz der elektrischen Leistung des Elektrolichtbogenofens im Dauerbetrieb zu bestimmen und Unterschiede zwischen verschiedenen Methoden der Datenaggregation zu ermitteln. Abbildung 8.1 zeigt dazu ein Balkendiagramm mit dem zeitlichen Verlauf der 15 min-Mittelwerte der Leistungsaufnahme des Elektrolichtbogenofens.

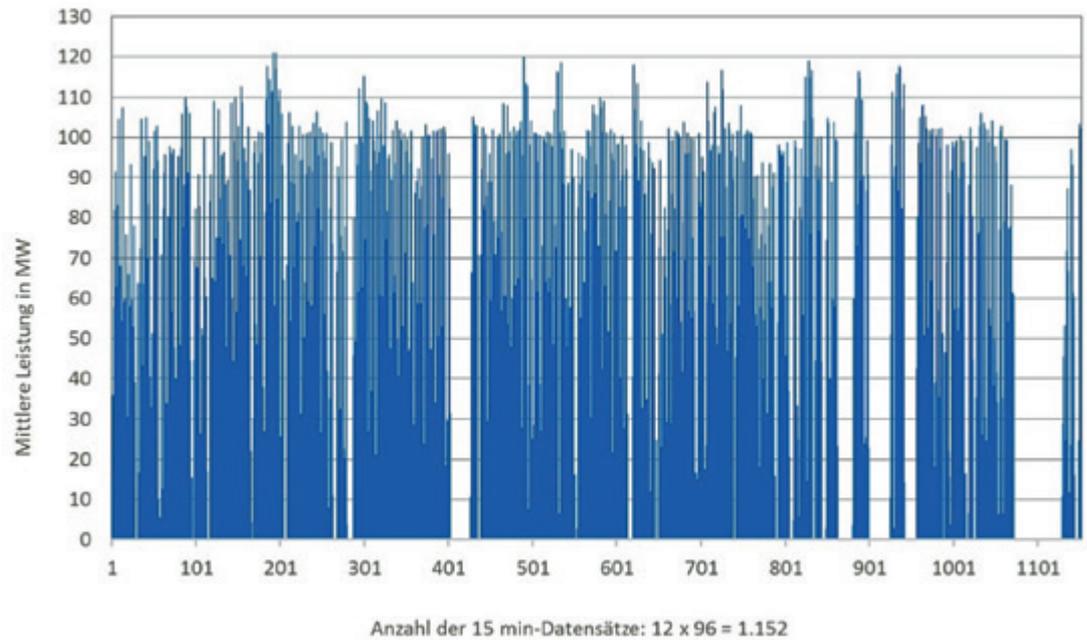


Abb. 8.1: Elektrische Leistung (15-min) eines Elektrolichtbogenofens

In dem Bild sind insgesamt 1.152 Datensätze dargestellt. Jedem einzelnen 15-min-Mittelwert liegen 180 Einzelmesswerte der in Abständen von 5 Sekunden bestimmten elektrischen Leistung zugrunde. Die Analyse des Zeittrends in Abbildung 8.1 führt z.B. zu folgenden Aussagen:

- Die Messwerte der 15 min-Mittelwerte liegen überwiegend unter 100 MW.
- Einzelne Leistungsspitzen können bis zu 120 MW betragen.
- An einigen Tagen traten Betriebsunterbrechungen von mehreren Stunden auf mit i.d.R. geplanten Instandsetzungsmaßnahmen (Bauschichten).

Hieraus lassen sich ggf. z.B. Maßnahmen zur Reduzierung der Spitzenlast und Möglichkeiten zur Lastverschiebung ableiten.

Eine andere Art der Datenauswertung wird in Abbildung 8.2 dargestellt, in der links die 15-min-Mittelwerte und rechts die 1-Std.-Mittelwerte in Einzelkästchen mit differenzierten Farbklassen gezeigt werden. Der Vergleich der linken und rechten Grafik zeigt, dass sich die Detailschärfe durch Datenverdichtung der 15min-Mittelwerte hin zu 1 Std.-Mittelwerten deutlich verringert.

Die Darstellung der Daten mit Farbumschlägen ermöglicht schnelle Analysen bzgl. der energetischen Auslastung der Anlage in einzelnen Zeitabschnitten mit klarer Zuordnung der Dauer und Häufigkeit von Produktionsunterbrechungen. Zeiträume mit einem Produktionsstopp von > 15 min. bzw. > 60 min (rote Kästchen) können als geplante (Instandhaltungsmaßnahmen) oder ungeplante Unterbrechung (Störungen) interpretiert werden. In dem dargestellten Beispiel in Abbildung 8.2 wurden am Tag 5 und 12 jeweils die zyklisch im Wochenrhythmus geplante kurze bzw. lange Bauschicht (bis 15 h) durchgeführt, in der ggf. auch ein Gefäßwechsel stattfindet.

Die Art der Visualisierung der Leistungsaufnahme eines Lichtbogenofens entsprechend Abbildung 8.2 eignet sich besonders zur Protokollierung von Stillständen bzw. Wartungsarbeiten und Betriebsphasen mit unterschiedlicher Auslastung. Diese Übersicht unterstützt ggf. auch eine Ermittlung von Fehlerursachen (FMEA).

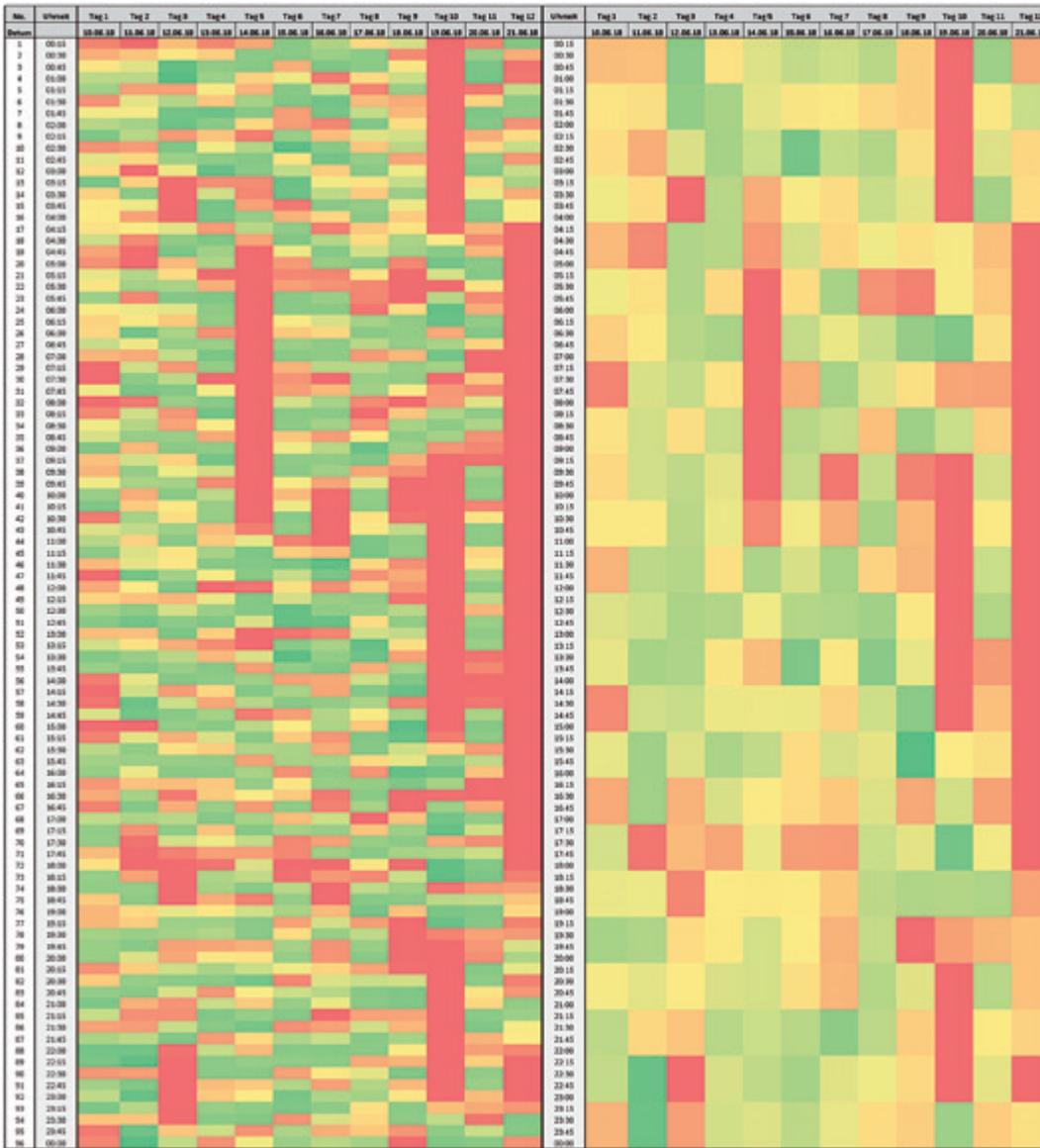


Abb. 8.2: Elektrische Leistung (in MVA) eines Elektrolichtbogenofens an 12 Betriebstagen. Links: 15 min-Werte, Rechts: 1 h-Werte, rot=0%, grün=100%

In Tabelle 8.3 sind die Dauer und Häufigkeit von Stillständen dargestellt. Die kumulierte Dauer von Stillständen mit einer Dauer von ≥ 15 min betrug insgesamt 50,25 Stunden bzw. 17,4 % der Betriebszeit. Davon entfiel etwa die Hälfte auf Stillstände mit einer Dauer < 4 Std. (S1, S2, S3), die andere Hälfte auf meist geplante Stillstände > 4 Std. (S4, S5).

Tabelle 8.3: Analyse der Stillstände (15-min-Mittel) nach Dauer und Häufigkeit

Art des Stillstands	Einheit	S1	S2	S3	S4	S5	Summe
Dauer		15 min	>15 min bis 1 h	>1 bis 4 Std.	> 4 bis 8 Std.	> 8 h	
Anzahl 15 min-Intervalle		17	40	40	48	56	201
Gesamt-Stillstand	Std.	4,25	10	10	12	14	50,25
Anteil der Stillstände	%	8,5	19,9	19,9	23,9	27,8	100,0
Anteil der Betriebszeit	%	1,5	3,5	3,5	4,1	4,9	17,4

8.2.3 Abweichung zwischen 1-Std. und 15 min-Mittelwerten

In Elektrostahlwerken werden zur Planung und Prognose des Energiebedarfs zum Teil aggregierte Daten als stündlicher Mittelwert prognostiziert. Allerdings erfolgt die Abrechnung des tatsächlich bezogenen Energiebedarfs i.d.R. auf Basis einer Leistungsmessung mit Aggregation der Daten in

15 min- Mittelwerten. Die Differenz zwischen dem geplanten Energiebedarf und dem real in 15 min-Intervallen gemessenem Energiebedarf muss nachträglich in Form von Ausgleichsenergie zu relativ hohen Kosten kompensiert werden. Es stellt sich somit die Frage, welcher Fehler durch die unterschiedliche zeitliche Aggregation von Energiedaten entstehen würde. Für den genannten Versuchszeitraum wurden deshalb die Differenzen zwischen den 1-Std.-Mittelwerten und den 15-Minuten-Mittelwerten berechnet und als Dauerlinie in Abbildung 8.3 dargestellt. Darin wird die relative Abweichung der 1 Std.-Mittelwerte vom tatsächlichen Energiebedarf in 15 min dargestellt (bezogen auf den mittleren Bedarf von 56,7 MW).

Aus Abbildung 8.3 geht hervor, dass für 50 % aller Zeitabschnitte mit jeweils ¼ Stunde eine Ausgleichsenergie in Höhe von mehr als 10,2 % benötigt würde und zwar + 5,1 % sowie – 5,1 % bezogen auf die tatsächlich bezogene Energie. Für weitere 37,5 % der Zeitabschnitte würde die Differenz unter 10,2 % liegen. Nur für 12,5 % der Zeitabschnitte (i.d.R. Zeiten der geplanten Instandhaltung) würde sich keine Abweichung ergeben, da in diesen Fällen der prognostizierte 1 h-Mittelwert dem gemessenen 15 min – Mittelwert entspricht und beide den Wert 0 besitzen.

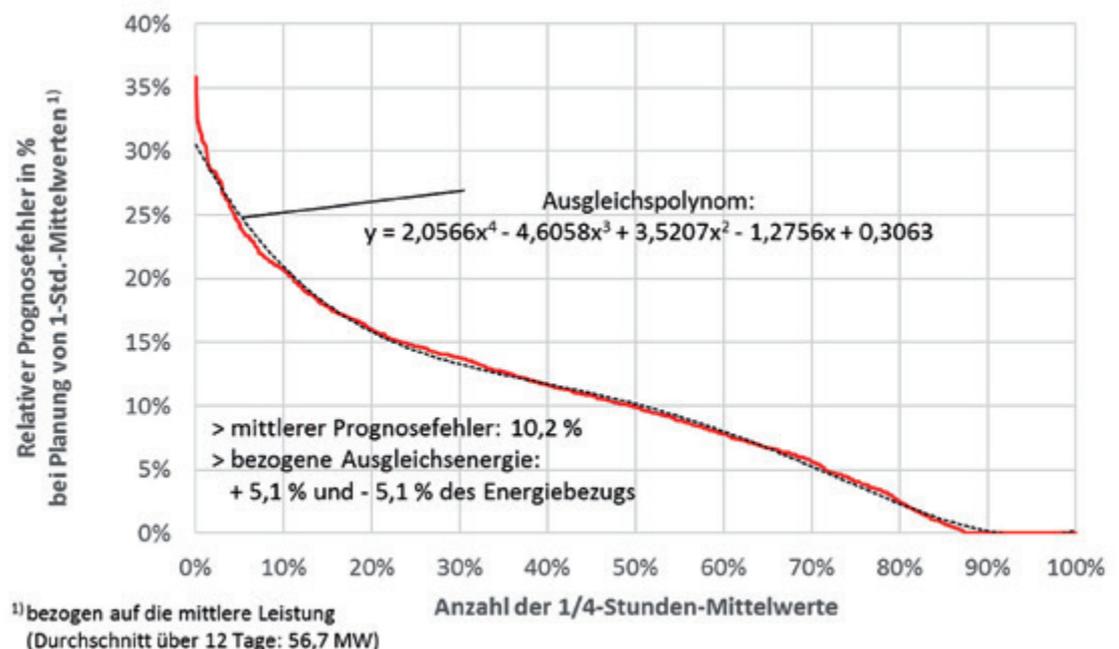


Abb. 8.3: Relative Abweichung zwischen 1-Std.- und 15-min-Mittelwerten

8.2.4 Tagesdurchschnittswerte und Leistungs-Kenngrößen

In Tabelle 8.4 sind die Tageskennzahlen des AMH-Elektrolichtbogenofens aufgeführt. An den 12 Betriebstagen (=288 h) wurden insgesamt 209 Schmelzen hergestellt. Die power-on-Betriebszeit betrug in 12 Tagen insgesamt 174 Std., die tägliche Vollbenutzungsdauer lag im Mittel bei 46,9 %.

Tabelle 8.4: Betriebskennzahlen des AMH-Elektrolichtbogenofens

Tage	Elektrische Energieaufnahme [MWh/d]	Tages-Höchstwert in 15 min [MW _{max}]	Mittlere elektrische Leistungsaufnahme		Power-On-Betriebszeit D+E+F ²⁾ Std./d	Vollben. Stunden [%]	Anzahl Schmelzen [1/d]	Spez. elektr. Energiebedarf % v. Mittel	Rohstahl-Produktion t / d
			in 24 h [MW]	in P _{on} -Zeit [MW]					
1	1.420	109,8	59,2	91,7	15,5	53,9%	18	100%	2.705
2	1.583	121,0	66,0	94,0	16,8	54,5%	21	98%	3.128
3	1.466	121,0	61,1	93,5	15,7	50,5%	19	98%	2.850
4	1.693	115,3	70,5	95,3	17,8	61,2%	22	98%	3.287
5	1.220	108,4	50,9	93,3	13,1	46,9%	16	98%	2.360
6	1.661	120,0	69,2	95,5	17,4	57,7%	22	100%	3.273
7	1.491	118,1	62,1	93,8	15,9	52,6%	19	98%	2.836
8	1.687	116,7	70,3	94,6	17,8	60,2%	22	99%	3.275
9	1.396	118,9	58,2	93,1	15,0	48,9%	16	104%	2.408
10	754	117,6	31,4	99,7	7,6	26,7%	10	105%	1.497
11	1.484	108,1	61,8	93,6	15,9	57,2%	18	102%	2.696
12	487	103,4	20,3	87,3	5,6	19,6%	6	99%	898
Max	1.693	121,0	70,5	99,7	17,8	61,2%	22	105%	
Mittel	1.362	114,9	56,7	93,9	14,5	49,2%	17,4	100%	
Min	487	103,4	20,3	87,3	5,6	19,6%	6	98%	
	16.342				174,0	46,9%	209		31.213

Die mittlere Leistung des Elektrolichtbogenofens kann entsprechend Formel 2 mit dem Leistungsfaktor und dem power-on-Faktor aus der installierten Leistung bestimmt werden:

$$P_{\text{mittel}} = P_{\text{Inst}} * \varepsilon * \tau \quad \text{Formel 2}$$

Für den Versuchszeitraum wurde der power-on-Anteil τ der 5 sec-Daten ermittelt:

$$\tau = 60,4 \% \quad \text{Formel 3}$$

Der Leistungsfaktor innerhalb der power-on-Betriebszeit betrug:

$$\varepsilon = 16.342 \text{ MWh} : (120 \text{ MW} * 0,604 * 288 \text{ h}) = 78,3 \% \quad \text{Formel 4}$$

In Tabelle 8.5 wurden die Ergebnisse der durchgeführten Messungen zur Verifizierung den in [1] getroffenen Annahmen gegenübergestellt.

Tabelle 8.5: Vergleich der in [1] getroffenen Annahmen mit Messdaten

Messgröße	Referenzdaten aus [1]		Ergebnis der Überprüfung mit Messdaten der Anlage
Bezugszeitraum	Kalenderjahr inkl. Nicht-Produktion	88 % geplante Produktionszeit	12 d geplante Produktionszeit
Power-on-Faktor	52 %	59,1 %	60,4 %
Leistungsfaktor in der power-on-Zeit	72 % (geschätzt: bis 80 %)	72 % (geschätzt: bis 80 %)	78,3 %
Verfügbarkeitsverlust durch Störungen	14 %	15,9 %	17,4 %
Spez. Elektrischer Energiebedarf	350 – 500 kWh/t RS		Bereich wurde bestätigt

Aus Tabelle 8.5 geht hervor, dass die power-on-Betriebszeit des untersuchten Elektrolichtbogenofens bezogen auf eine geplante Produktionszeit nahezu der Referenzangabe entsprach und rd. 60 % betrug. Beim Leistungsfaktor hat sich die getroffene Annahme von < 80 % ebenfalls bestätigt. Im Leistungsfaktor zeigte die untersuchte Anlage einen höheren Wert von 78,3 %, was auf unterschiedliche Vorgaben für die Spitzenlaststeuerung oder unterschiedliche Regelstrategien für die je-

weiligen Produkte der jeweiligen Werke zurückzuführen ist. Auch der Bereich des spez. elektrischen Energiebedarfs wurde unter Beachtung des leicht höheren Einschmelzenergiebedarfs bei Verwendung von DRI als Einsatzstoff im Vergleich zum Einsatz von Stahlschrott bestätigt.

Abbildung 8.4 zeigt, wie die Energieaufnahme des Elektrolichtbogenofens mit der Power-on-Betriebszeit korreliert. Die Energieübertragungsleistung in der power-on-Zeit betrug im Mittel rd. 78,3 % der installierten Leistung (s. Formel 4).

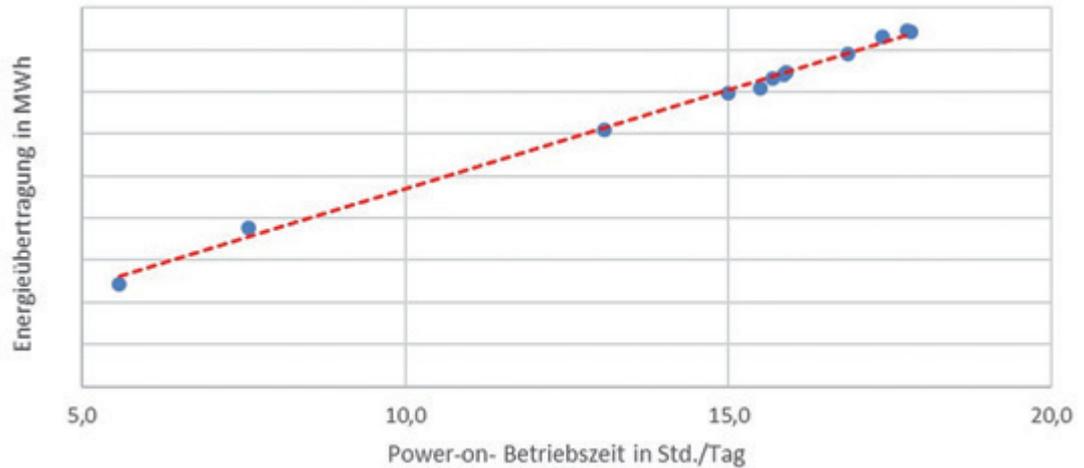


Abb. 8.4: Energieübertragung als Funktion der power-on-Betriebszeit

Die Bandbreite des spez. elektrischen Energiebedarfs der einzelnen Stahlschmelzen ist in Abbildung 8.5 dargestellt. Als Ursachen für Schwankungen des elektrischen Energiebedarfs kommen ggf. Unterschiede in der Behandlungsdauer, Unterbrechungen des Prozessablaufs oder auch Unterschiede des chemischen Energieeintrags der einzelnen Stahlschmelzen in Betracht. Ferner verändern sich auch die Zusammensetzung der Rohstoffe sowie die Zufuhr von O₂ und Schlackebildnern. Diese Einflussgrößen wurden im Rahmen dieser Untersuchung nicht vertieft analysiert.

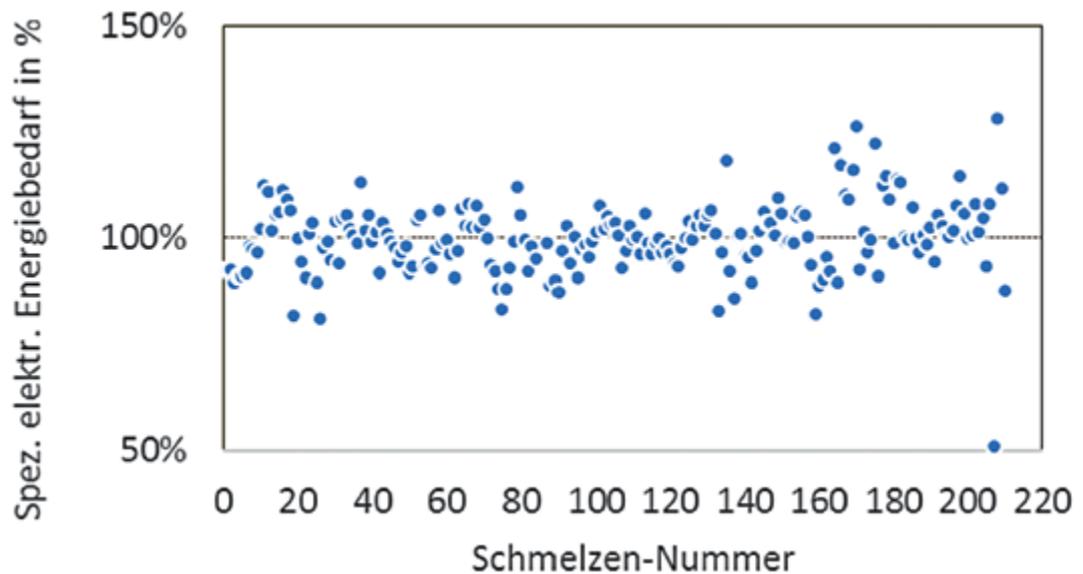


Abb. 8.5: Streubreite des spezifischen elektrischen Energiebedarfs je Schmelze

8.2.5 Dauerlinie eines Elektrolichtbogenofens

Die zeitliche Entwicklung der Energieaufnahme eines Elektrolichtbogenofens kann z.B. anhand der Dauerlinie beurteilt werden, die in Abbildung 8.6 dargestellt wurde. Die Abbildung zeigt drei Dauerlinien, die aus den 5 Sekunden-Mittelwerten (blau), den 15 Minuten-Mittelwerten (rot) und den 1 Std.-Mittelwerten (grün) gebildet wurden. Die Energieaufnahme wurde jeweils auf die installierte Leistung (hier: 120 MW) bezogen. Die drei Dauerlinien lassen erkennen, mit welchen Zeitanteilen die Anlage in den jeweiligen Lastbereichen betrieben wurde.

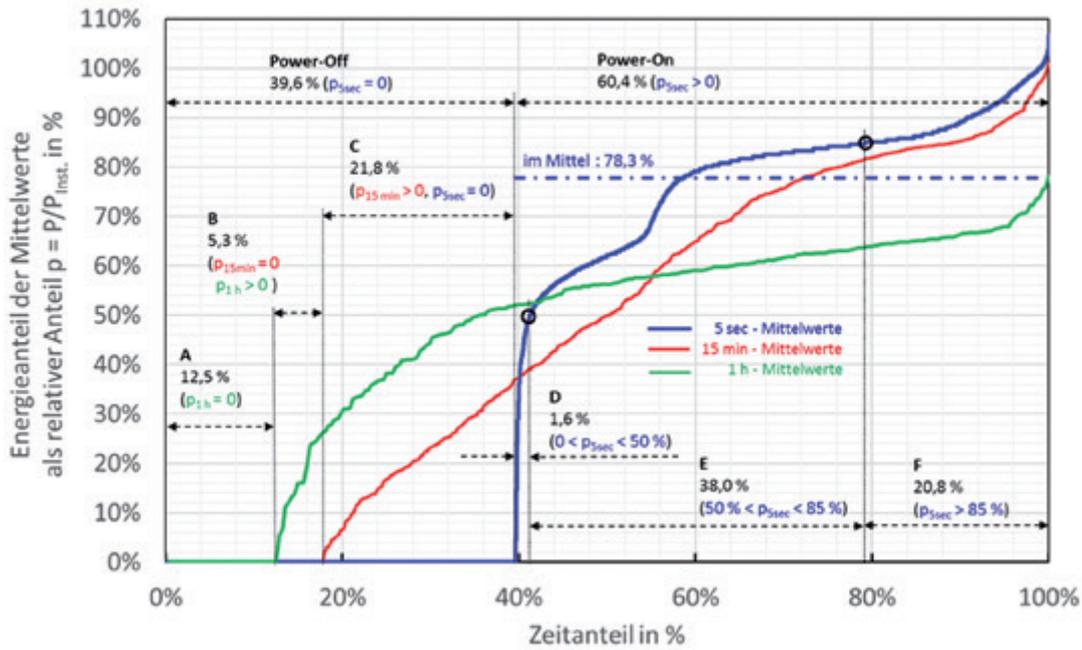


Abb. 8.6: Dauerlinien der elektr. Leistung eines Elektrolichtbogenofens (blau: 5sec, rot: 15 min, grün: 1h)

Über den Zeitraum von 12 Tagen wurden insgesamt 1.152 15 min-Mittelwerte gebildet. Die Zeitabschnitte A bis F beziehen sich auf eine Differenzierung der power-off- und power-on-Betriebszeiten, sie werden in Tabelle 8.6 erläutert. Dabei kennzeichnen die Zeitabschnitte A, B und C drei unterschiedlich abgegrenzte power-off-Zeiträume. Hingegen beschreiben die Zeitabschnitte D, E und F die Betriebszeiten des power-on-Betriebs mit dem Anfahren, dem Mittellast- und dem Hochlastbetrieb.

Tabelle 8.6: Charakteristische Zeitabschnitte in Abbildung 8.6

Zeitabschnitt	Bezeichnung	Bezogene Leistung	Zeitanteil in %	
A	Power off	$p_{1h} = 0 \%$	12,5	39,6 %
B	Power off	$p_{15min} = 0 \%, p_{1h} > 0 \%$	5,3	
C	Power off	$p_{5sec} = 0 \%, p_{15min} > 0 \%$	21,8	
D	Anfahren	$0 \% < p_{5sec} < 50 \%$	1,6	60,4 %
E	Mittellast	$50 \% < p_{5sec} < 85 \%$	38,0	
F	Hochlast	$85 \% < p_{5sec} < 105 \%$	20,8	
Summe				100,0 %

Auf die power-off-Betriebszeit (39,6 %), entfallen:

- 12,5 % der Zeitanteile, in denen die 1-Std.-Mittelwerte = 0 sind (Zeitanteil A),
- 5,3 % des Zeitanteils B, in denen die 15 min-Mittelwerte gleich Null sind.
- Bei An- und Abfahrvorgängen werden 15 min-Mittelwerte teilweise über power-off-Zeiten hinweg gemittelt. Ihr Anteil C beträgt hier 21,8 %.

Dem Kurvenverlauf in Abbildung 8.6 ist ferner zu entnehmen, dass die power-on-Zeit insgesamt 60,4 % der Betriebszeit beträgt und sich in die Zeitanteile D, E und F gliedert:

- Der Zeitanteil D entfällt auf das An- und Abfahren der Anlage mit $< 50 \%$ der installierten Leistung. Er beträgt nur rd. 1,6 % der Betriebszeit.

- Auf den Mittellastbereich der Gruppe E mit einer relativen Leistung zwischen 50 und 85 % entfällt ein Zeitanteil von 38 % und
- auf die Lastgruppe F mit dem Hochlastbereich > 85 % der installierten Leistung entfällt ein Zeitanteil von insgesamt 20,8 % der Betriebszeit.

Werden mehrere Elektrolichtbogenöfen zeitgleich betrieben, so sind deren Leistungskennlinien i.d.R. zueinander versetzt. Eine „räumliche“ Aggregation mehrerer Anlagen (z.B. durch Pooling über ÜNB-Grenzen hinweg) bewirkt, dass deren gemeinsame Dauerlinie im Vergleich zur Einzelanlage einen neuen, flacheren Verlauf zeigt.

8.3 Flexibilität einer Sauerstofferzeugungsanlage

Die Lech-Stahlwerke (LSW) betreiben eine Sauerstofferzeugungsanlage, die auf der Basis einer Druckwechseladsorption arbeitet (PVSA) (s. Abbildung 8.7).

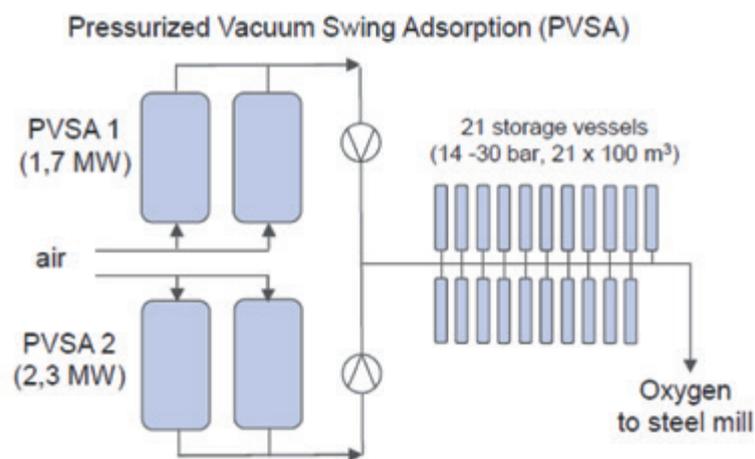


Abb. 8.7: Fließbild einer Anlage zur O₂-Erzeugung [3]

Diese Anlage bietet im Rahmen der Kapazität der vorhandenen Pufferspeicher und der möglichen Varianz der Sauerstoffabnahme durch das Stahlwerk eine begrenzte Flexibilität zur Nutzung der abschaltbaren Verdichterleistung als positive Regelenergie. LSW hat Betriebserfahrungen mit der Flexibilisierung der Sauerstofferzeugungsanlage ausgewertet [3]. In einer Versuchszeit von mehreren Monaten wurde in Kooperation mit der Fa. ENERNOC eine der beiden PVSA-Sauerstofferzeugungsanlagen durch flexiblen, kurzzeitigen Leistungsverzicht in Höhe von ca. 1,8 MW am Regelenergiemarkt beteiligt. Dabei konnten insgesamt 5 Betriebsunterbrechungen der Anlage von je ca. 8 min Dauer automatisch abgerufen werden. Es zeigte sich allerdings, dass der vollautomatische Start beim Wiederanfahren der Anlage nach den Unterbrechungen nicht einwandfrei funktionierte. Deshalb wurde der Versuchsbetrieb zunächst beendet. LSW beabsichtigt, den automatisierten An- und Abfahrbetrieb der Anlage für einen flexiblen Einsatz der Anlage weiter zu optimieren.

8.4 Betrieb von Pflannenöfen in der Sekundärmetallurgie

In den in [1] dargestellten Arbeiten wurde der Strombedarf des Elektrolichtbogenofens untersucht, der das Hauptaggregat der Prozessroute der Elektrostahlherstellung darstellt. Er benötigt für das Einschmelzen der Rohstoffe in der „Primärmetallurgie“ dieser Prozessroute den größten Anteil des elektrischen Energiebedarfs. Aber auch in der nachfolgenden „Sekundärmetallurgie“ wird zusätzliche elektrische Energie eingesetzt, insbesondere zum Wiedererwärmen des flüssigen Stahls in Pflannenöfen. Im nachfolgenden Kapitel wird deshalb untersucht, ob auch der Pflannenofen ein mögliches Potential für Flexibilitätsmaßnahmen besitzen könnte.

In der Sekundärmetallurgie werden zur Qualitätsoptimierung hochwertiger Stahlqualitäten zusätzliche Behandlungsschritte des Flüssigstahls durchgeführt [4]. So werden z.B. für hochfeste Premi-

um-Stahlqualitäten Legierungsanteile ergänzt und störende Gehalte an Phosphor und Schwefel aus dem Stahl abgetrennt. Bei vielen Stahlqualitäten wird der Flüssigstahl zusätzlich mittels einer Vakuumbehandlung entgast und desoxidiert. Vor dem Vergießen des Stahls muss schließlich die in der Sekundärmetallurgie eingetretene Abkühlung der Schmelzen durch Beheizung im Pfanneofen kompensiert werden.

In den letzten Jahren wurden mehrere neue Pfanneöfen in Stahlwerken installiert, auch in integrierten Hüttenwerken zwischen dem Konverter und der Stranggießanlage. Über die Erfahrungen bei diesen Investitionsvorhaben wurde an verschiedenen Stellen berichtet [5-10]. Demnach verbessert ein Pfanneofen die Flexibilität der Prozesse erheblich und ermöglicht damit zusätzliche Behandlungsschritte in der Sekundärmetallurgie zur Erzielung höherer Produktqualitäten.

Abbildung 8.8 zeigt die installierte elektrische Leistung von 40 Pfanneöfen in Deutschland in Abhängigkeit von der Pfannegröße und zwar für integrierte Hüttenwerke (blau) und Elektrostahlwerke (rot). Dem Bild ist zu entnehmen, dass sich die installierte Leistung der betrachteten Pfanneöfen annähernd proportional zu ihrer Pfannegröße verhält. Sie beträgt in den Beispielen zwischen 5 bis 55 MVA je Anlage bzw. rd. 152 kVA/t RS. Insgesamt beträgt die installierte Leistung aller 40 Pfanneöfen der Stahlindustrie kumuliert rd. 889 MVA.

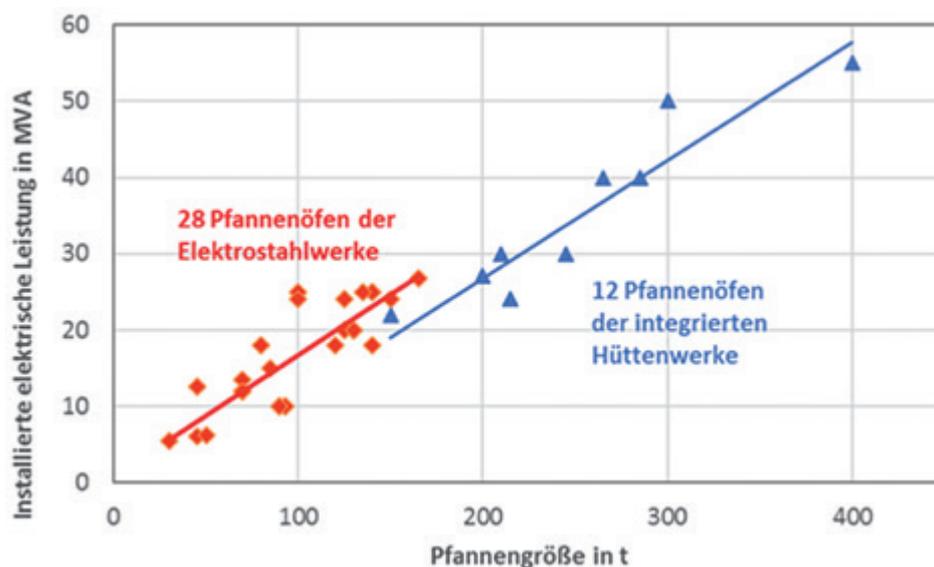


Abb. 8.8: Installierte Leistung von Pfanneöfen in der Sekundärmetallurgie (Quelle: Stahlinstitut VDEh, database PLANTFACTS)

Abbildung 8.9 zeigt beispielhaft den Temperaturverlauf von Flüssigstahl als Funktion der Zeit nach dem Abstich des Elektrolichtbogenofens. Pfanneöfen werden chargenweise betrieben und elektrisch über den Lichtbogen beheizt. In ihnen wird der Flüssigstahl nach Vorgaben von rechnergestützten Prozessmodellen wiedererwärmt, damit zum Gießen des Stahls in der Stranggießanlage die benötigte Soll-Temperatur genau eingestellt werden kann.

In Abbildung 8.9 sind dem mit einem Prozessmodell berechneten Verlauf der Temperatur einzelne Temperatur-Messungen gegenübergestellt. Die Schmelze wurde in dem Beispiel nach dem Abstich bzw. vor ihrer Behandlung im Argon-Spülstand zunächst im Pfanneofen auf eine höhere Temperatur erhitzt. Die Aufheizung im Pfanneofen erfolgt nach [11] über variierende Zeitabschnitte mit einer Dauer von ca. 5-25 min. Die Aufheizrate beträgt dabei nach [6] und [11] ca. 4 bzw. 5 K/min mit einem spez. elektr. Energiebedarf von ca. 0,4 kWh/K/t [11]. Die Abkühlgeschwindigkeit im Argon-Spülstand beträgt im Beispiel von Abbildung 8.9 ca. 1 K/min.

Die Einsatzzeiten von Pfanneöfen sind wie in Abbildung 8.9 gezeigt genau auf die thermische Situation der einzelnen Schmelze und den geplanten Temperatur- und Zeitverlauf innerhalb der Behandlungsfolge der Sekundärmetallurgie eingestellt. Nur so kann sichergestellt werden, dass die einzelne Schmelze zur geplanten Zeit die Temperatur-Sollwerte erreicht und in der nachfolgenden Stranggießanlage rechtzeitig vergossen werden kann. Damit wird die durch einen Pfanneofen geschaffene Flexibilität in der thermischen Bilanz von Stahlschmelzen im Stahlwerk zugleich einer

strikten Ablauf- und Logistiksteuerung der zeitgleich im Stahlwerk behandelten Pfannen unterworfen und Bestandteil des Produktionsmanagements.

Ein ungeplanter externer Abruf von „Energieflexibilität“ würde die komplizierten und vernetzten Abläufe innerhalb der Sekundärmetallurgie erheblich stören. Die jeweils gerade behandelte Schmelze könnte nicht zeitgerecht fertiggestellt werden. Dies würde schließlich zum Produktionsstopp und zur Unterbrechung des Stranggussbetriebes führen. Deshalb muss gegenwärtig festgestellt werden, dass aufgrund der engen Einbindung von Pfannenöfen in die Prozessstruktur der jeweiligen Stahlwerke keine extern abrufbare Energieflexibilität des Pfannenofens zur Verfügung gestellt werden kann.

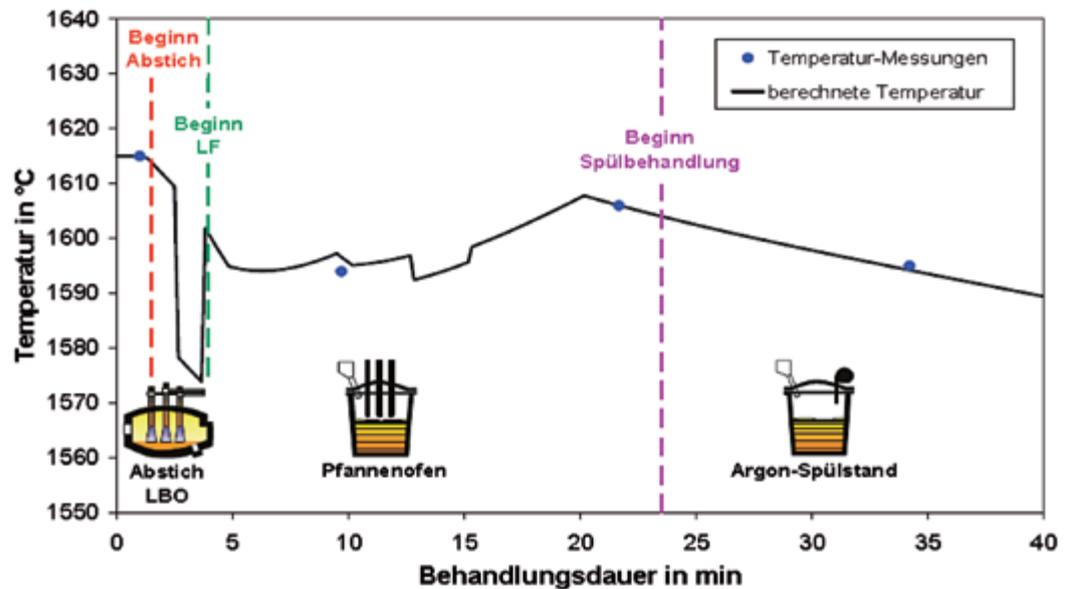


Abb. 8.9: Temperaturverlauf einer Flüssigstahl-Schmelze bei Aufheizung im Pfannenofen (Quelle: B. Kleimt, Stahlakademie des Stahlinstituts VDEh [5])

8.5 Perspektiven der hybriden Wärmebereitstellung im Warmwalzwerk

Die Stahlindustrie Deutschlands hat einen jährlichen Erdgasverbrauch von ca. 112,5 PJ [16], wovon der Großteil energetisch genutzt wird. Im Bereich der Walzwerke werden allein ca. 55 PJ genutzt. In einem Warmwalzwerk wird der Stahl in sogenannten Wärmeföfen zumeist mit Erdgas aufgeheizt und dann durch Umformung, dem Walzen, in eine Zwischen- oder Fertigteilform überführt. Typische Produkte eines Warmwalzwerkes sind z.B. Bleche, Profile, Draht oder Rohre.

In Abbildung 8.10 ist das Energiefließbild eines Warmwalzwerkes für Warmband dargestellt. Es werden ca. 1.500 MJ/t an Brennstoffenergie benötigt.

Eine Perspektive für die Nutzung von elektrischem Strom in Warmwalzwerken besteht in der Hybridisierung bei der Wärmeversorgung, um einen Teil der für die Prozesse benötigten Energie durch Strom bereit zu stellen. Ein dauerhafter Ersatz von Gas durch Strom ist allenfalls in Teilbereichen möglich, neben Fragen der Sicherheit, Qualität und Prozesstechnik ist auch die Wirtschaftlichkeit ein Hemmnis. Aus CO₂-Sicht muss Strom aus erneuerbaren Energiequellen verwendet werden (Überschussstrom).

Um Perspektiven für eine hybride Wärmebereitstellung zu erschließen, müssen Investitionen in neue Anlagen und Verfahren vorgenommen werden. Parallel dazu ist die genutzte Automatisierungstechnik zu erweitern, um schnell und flexibel zwischen unterschiedlichen Energieträgern umschalten zu können. Darüber hinaus muss berücksichtigt werden, dass die neuen Lösungen zusätzliche Lasten für das Energienetz darstellen können.

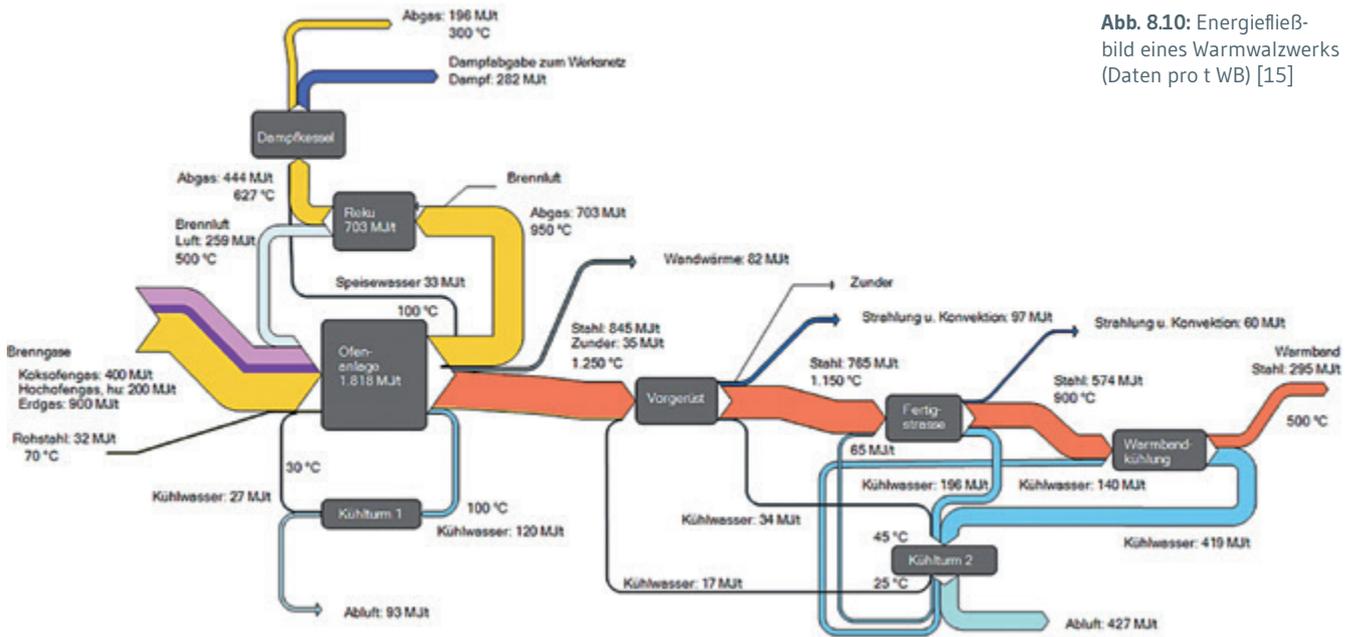


Abb. 8.10: Energiefließbild eines Warmwalzwerks (Daten pro t WB) [15]

Eine untersuchte mögliche Perspektive ist die hybride Medienvorwärmung. In [12] wird die Einbindung elektrischer Heizelemente in einen Rohrbündelrekuperator vorgestellt. Dieser hybride Rekupe­rator soll als flexibler elektrischer Verbraucher die im Prozess genutzte Verbrennungsluft zusätzlich vorwärmen. Überschussstrom aus erneuerbaren Energien könnte so genutzt und die Energieeffizienz des Verbrennungsprozesses verbessert werden. In Abbildung 8.11 ist das Funktionsprinzip dieses Hybrid-Rekuperators schematisch dargestellt.

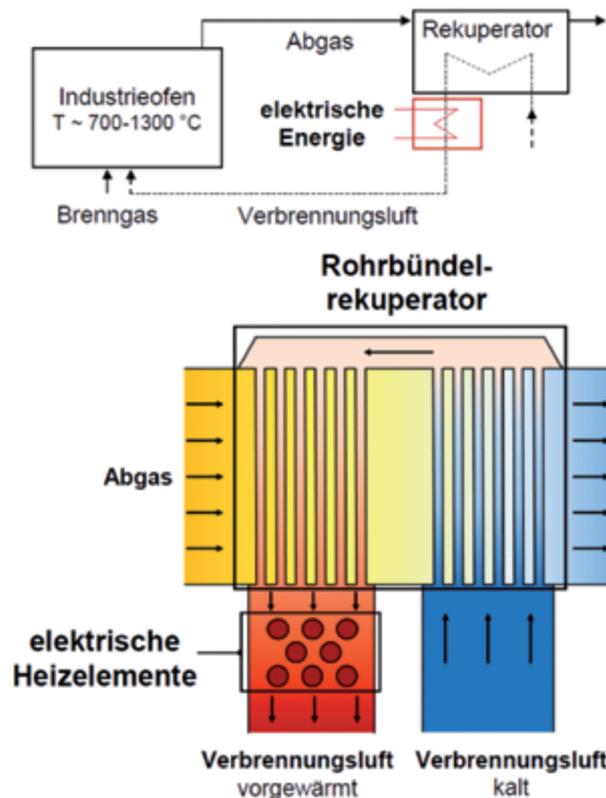


Abb. 8.11: Hybrider Rekupe­rator als flexibler Verbraucher [12]

Ein Prototyp eines solchen Hybrid-Rekuperators wurde angefertigt und im Rahmen eines Forschungsprojektes untersucht [14]. Eine Auslegung für den industriellen Maßstab ist vorgesehen, ein Einsatzszenario in einem Schmiedebetrie­b wird aktuell untersucht [12].

Ein anderer Ansatz zur Nutzung hybrider Wärmeeinkopplung ist die Verwendung von Induktionstechnologie. In [13] wird eine solche Lösung vorgestellt. Wie in Abbildung 8.12 dargestellt, soll hierbei eine Wärmeeinbringung in das metallische Nutzgut durch den Wärmofen vor- oder nachgeschaltete Induktionsanlagen umgesetzt werden.

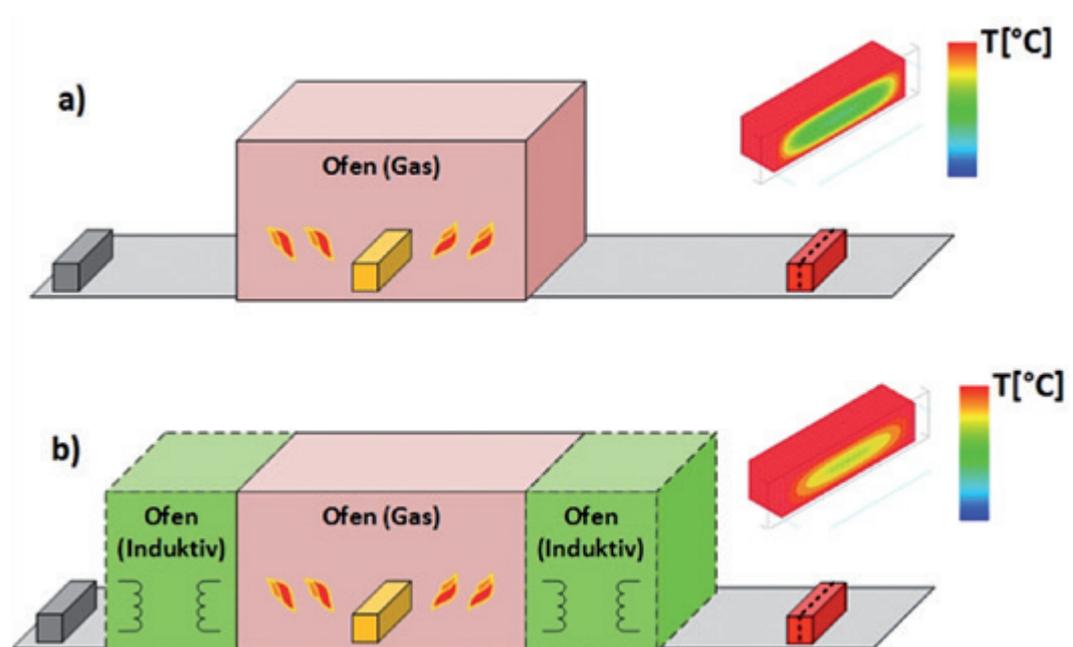


Abb. 8.12: Vergleichmäßigung der Wärmezufuhr durch Induktion [13]

Ansatzpunkte sind hier die Erhöhung der Energieeffizienz, des Durchsatzes und die ökonomisch sinnvolle Nutzung der elektrischen Wärmetechnologie im Rahmen des Energiemarktes. Das neue hybride Wärmekonzept zielt auf den gasbefeuerten als auch einen elektrischen Betrieb von Industrieofenanlagen ab. Hierfür sind neben der Investition in die Induktionsanlage auch Aufwendungen für zusätzliche Steuerungen notwendig. Optional kann ein Energiemanagement gekoppelt werden, um die jeweils effizienteste Arbeitsweise zu nutzen, z.B. mit Strom, wenn im Netz ausreichend günstiger Strom aus erneuerbaren Quellen bereitsteht.

Allen vorgestellten Perspektiven zur hybriden Wärmebereitstellung in der Stahlindustrie ist gemein, dass sie teils erhebliche Investitionen erfordern und nicht kurzfristig und flächendeckend eingesetzt werden können. Die Einbindung in die Prozesse und Anlagen erfordert darüber hinaus neue Konzepte und Lösungen für flexible Steuerungstechnik und schnelle Umschaltmöglichkeiten zwischen verschiedenen Energieträgern. Eine interdisziplinäre Zusammenarbeit zur Umsetzung ist erforderlich, beispielsweise zwischen Anlagenbauern, -betreibern, Automatisierungstechnik und Netzbetreibern.

8.6 Nutzung synthetischer Gase in der Stahlindustrie

In den Prozessen der Eisen- und Stahlindustrie werden fossile Energieträger zur Beheizung, Reduktion und zum Schmelzen eingesetzt. Hierbei handelt es sich um feste Kohlenstoffträger, kohlenwasserstoffhaltige Gase und CO/H₂-haltige Prozessgase. Um Perspektiven für einen Austausch von konventionellen Energieträgern durch synthetische Gase aufzuzeigen wurden zunächst die branchenspezifischen Prozesse bei der Stahlherstellung identifiziert.

Die Verwendung von synthetischen Gasen bei der Stahlherstellung zielt auf Möglichkeiten ab, die bisherige Gasnutzung in Zukunft ökologischer und dabei weiterhin technisch und wirtschaftlich praktikabel für das Unternehmen zu gestalten. Von entscheidender Bedeutung ist dabei die Reduzierung der CO₂-Emissionen. Die Betrachtung zum Austausch von Gasen bei einzelnen Prozessen erfolgte basierend auf bereits umgesetzten sowie auf zurzeit in der technischen und theoretischen Planung bzw. Untersuchung befindlichen Lösungen. So wurden als praktikable Möglichkeiten für die Verwendung synthetischer Gase im Bereich der Stahlindustrie einige Einsatzfelder beispielhaft herausgearbeitet:

- Einsatz von Wasserstoff als Reduktionsgas anstelle von kohlenstoffhaltigen Energieträgern
- Verstärkte Nutzung von Wasserstoff als Spülgas bei Glühprozessen
- Austausch von Erdgas durch Biogas im Bereich von Heiz- und Schmelzprozessen

Aufgrund des großen Potentials wurde der Fokus der Betrachtung auf den Einsatz bzw. die Verwendung von Wasserstoff gelegt, welcher heutzutage hauptsächlich in chemischen Prozessen und den damit zusammenhängenden Erzeugungs- und Speicherungstechnologien angewendet wird. Die Mengen an Wasserstoff, die zurzeit und zukünftig benötigt werden, sind bei den einzelnen Anwendungen in der Stahlindustrie unterschiedlich hoch, sie bewegen sich von wenigen Kubikmetern Wasserstoff pro Stunde bei Spülvorgängen bis zu mehreren Tausend Kubikmetern Wasserstoff pro Stunde bei Reduktionsvorgängen.

Vor allem die Verwendung von Wasserstoff als Reduktionsgas stellt eine große Perspektive für die Nutzung eines synthetischen Gases im Bereich der Stahlherstellung dar. Die Reduktion des Eisenerzes durch Wasserstoff erfolgt dabei stöchiometrisch analog zu der Reduktion mit Kohlenmonoxid. Die vereinfachte Summenreaktion der Reduktion lautet für die beiden Reduktionsprozesse wie folgt:



Nach den beiden oben angeführten vereinfachten Summenreaktionen wird beim Direktreduktionsprozess mit CO/H_2 als Reduktionsgas das Eisenerz zu Eisenschwamm reduziert [15, 16].

Aktuell wird in zahlreichen Stahlunternehmen der verstärkte Einsatz von Wasserstoff als Reduktionsgas sowohl theoretisch als auch praktisch untersucht [17-20]. Der Schwerpunkt der Untersuchungen liegt dabei auf:

- Einsatz von Wasserstoff als Reduktionsgas im Hochofen anstelle von fossilen, kohlenstoffhaltigen Energieträgern
- Einsatz von reinem Wasserstoff als Reduktionsgas beim Direktreduktionsprozess

Der Einsatz von Wasserstoff im Hochofen stellt dabei eine Brückentechnologie dar, um kurzfristig mit vorhandenen Anlagen die CO_2 -Emissionen bei der Stahlherstellung zu verringern (s. Abbildung 8.13).

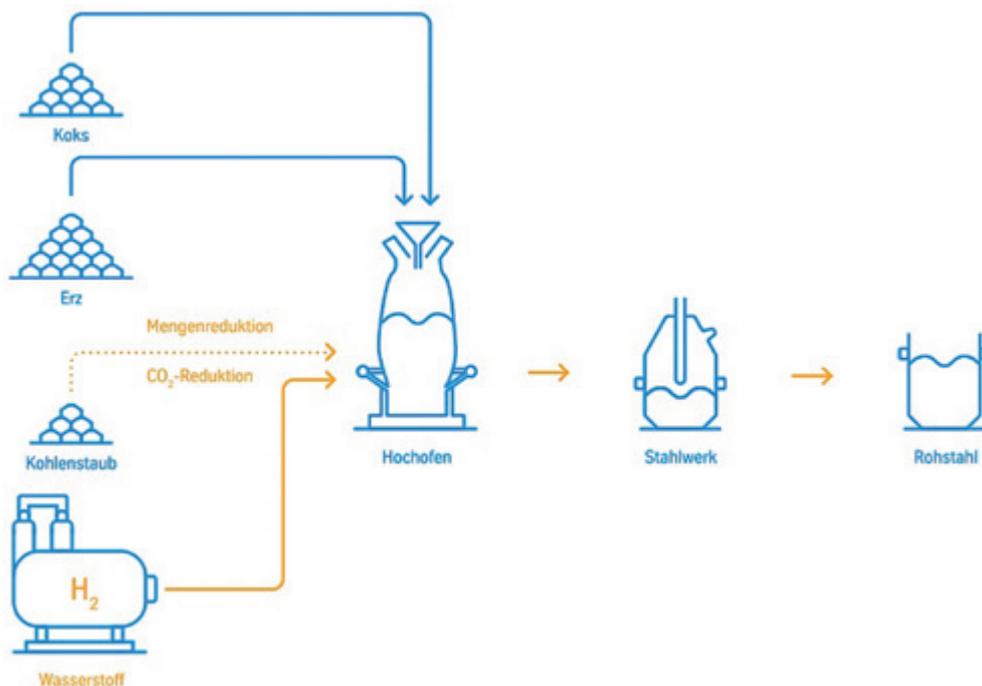
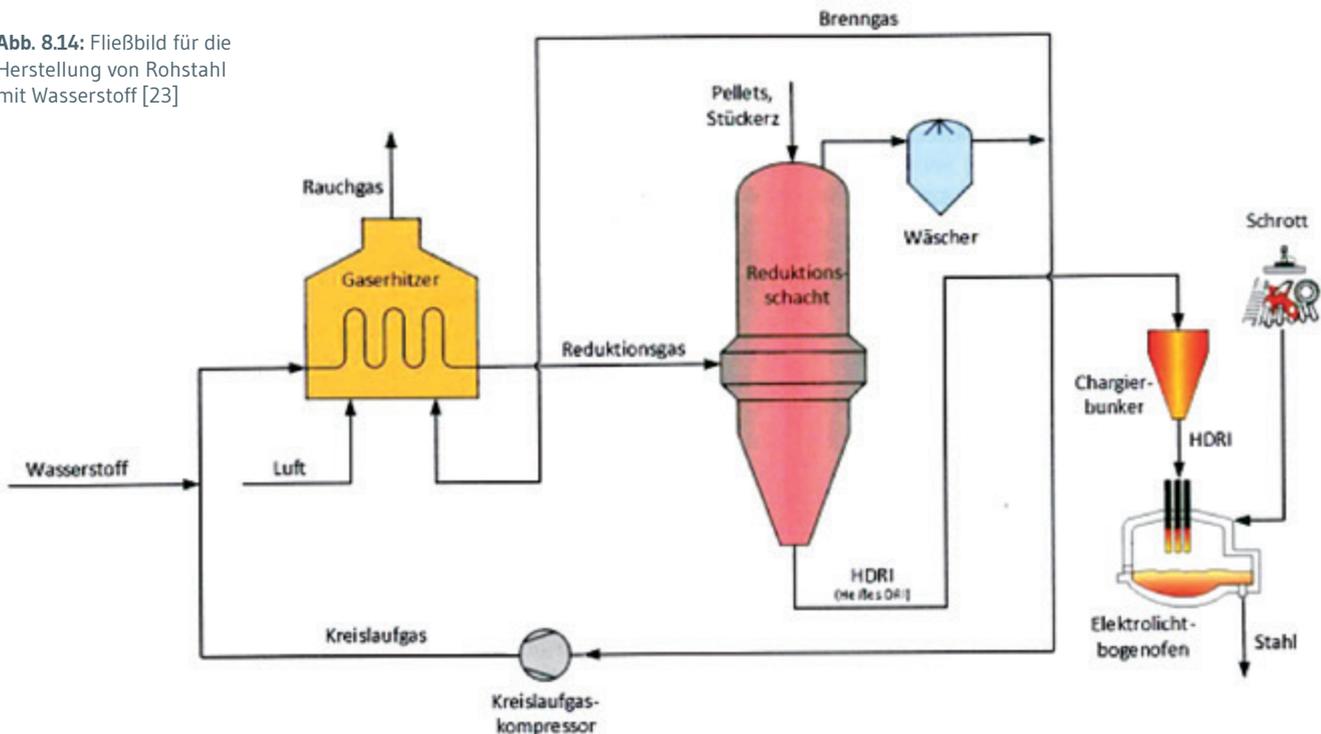


Abb. 8.13: Wasserstoff als Reduktionsmittel am Hochofen [19]

Durch die Injektion von Wasserstoff in den Hochofen können metallurgische Fragestellungen zum Reduktionsverhalten untersucht und die Erkenntnisse auf die Zieltechnologie, die Direktreduktion mit Wasserstoff, übertragen werden.

Der Einsatz von reinem Wasserstoff als Reduktionsmittel beim Direktreduktionsverfahren (DRI-Verfahren) für die Herstellung von Eisenschwamm, wie in Abbildung 8.14 dargestellt, bedarf noch weitreichenderer Untersuchungen.

Abb. 8.14: Fließbild für die Herstellung von Rohstahl mit Wasserstoff [23]



Derzeit wird das DRI-Verfahren mit Erdgas betrieben, welches in einem Reformer in Wasserstoff und Kohlenmonoxid aufgespalten und dem Reduktionsschacht heiß zugeführt wird. Beim Direktreduktionsverfahren z.B. im Reduktionsschacht (MIDREX-Verfahren) wird das Reduktionsgas im Gegenstrom zum zu reduzierenden Eisen geführt. Das Eisenerz wird von oben in den Schacht eingebracht, aufgewärmt und in der heißen Zone des Schachtofens zu metallischem Eisen reduziert. Das Produkt ist ein schwammartiges poriges Produkt mit einem Eisengehalt von etwa 92–95 %, was auch als Eisenschwamm bezeichnet wird. Der in einem Reduktionsschacht produzierte Eisenschwamm kann heiß in einem Elektrolichtbogenofen eingesetzt werden. Eine Perspektive für den Einsatz von synthetischen Gasen stellt der schrittweise Austausch von Erdgas durch Wasserstoff dar.

Da keine Erfahrungen vorliegen, muss der (fluktuierende) Austausch von Erdgas durch Wasserstoff in ausgeführten Anlagen stufenweise erprobt werden, um die Veränderungen im Produktionsprozess und in der Produktqualität zu erkennen und wenn nötig zu kompensieren. Die Erhöhung des Wasserstoffanteils im Reduktionsgas auf 100 % würde den Verfahrensschritt der Reformierung erübrigen. Erste Schätzungen nach jetzigem Stand gehen von einer benötigten Wasserstoffmenge von über 600 m³ i. N. pro Tonne in der DRI-Anlage erzeugten Eisens bzw. Eisenschwamms aus, für deren Herstellung mittels Elektrolyse eine elektrische Energie von mindestens 3,3 MWh benötigt würde. [24]

Durch den Einsatz von 100 % Wasserstoff enthält der Eisenschwamm im Vergleich zu den heute marktüblichen Qualitäten von DRI und HBI keinen Kohlenstoff. Die Integration der einzelnen Einheiten muss jedoch in einer Betriebsanlage noch nachgewiesen werden.

Hinsichtlich der Nutzung von Wasserstoff als Reduktionsgas müssen daher die technischen Hemmnisse bzw. auch Auswirkungen auf nachfolgende Prozessschritte durch umfangreiche Entwicklungs- bzw. Forschungsarbeiten erarbeitet werden. Eine technische Umstellung derartiger Produktions-

verfahren auf die Verwendung synthetischer Gase wie Wasserstoff ist mit sehr hohen Kosten für die Stahlindustrie verbunden.

Darüber hinaus müssen Fragen zur Menge und Bereitstellung der benötigten Energien bzw. zu den infrastrukturellen Gegebenheiten der jeweiligen Werke beantwortet werden. Neben der bereits heute benötigten elektrischen Energie kommen noch zusätzliche Mengen für die Erzeugung von regenerativ erzeugtem Wasserstoff sowie für die zusätzlich benötigten Kapazitäten an Elektrolichtbogenofenanlagen hinzu.

8.7 Literaturverzeichnis

- [1] Ausfelder, F., et al.: Flexibilitätsoptionen in der Grundstoffindustrie, Frankfurt 2018, ISBN: 978-3-89746-206-9.
- [2] Hoffmann, M., et al.: Integration of Long-Term Time Series Data into Energy System Optimization Models. https://www.researchgate.net/publication/333429257_Integration_of_Long-Term_Time_Series_Data_into_Energy_System_Optimization_Models.
- [3] Marchiori, F., et al.: Integrated dynamic energy management for steel production (DYNERGYSteel). European Commission, Brüssel 2019. ISBN 978-92-79-98335-1.
- [4] Stahlinstitut VDEh: Stahlfibel, Verlag Stahleisen GmbH, Düsseldorf 2015. ISBN 978-3-514-00815-1
- [5] Kleimt, B.: Energetische Modellierung des Lichtbogenofen-Prozesses. Stahl-Akademie im Stahlzentrum, März 2016.
- [6] saarstahl: Flyer Neue Sekundärmetallurgie im LD-Stahlwerk, <https://www.saarstahl.de/sag/downloads/download/9314>
- [7] thyssenkrupp, Pressemitteilung v. 08.11.2018: Bedeutendes Investitionsprojekt bei thyssenkrupp vor dem Abschluss: Neuer Pfannenofen im Stahlwerk ist jetzt in der Erprobungsphase. Verfügbar unter: <https://www.thyssenkrupp-steel.com/de/newsroom/pressemitteilungen/pressemitteilung-106689.html>
- [8] WAZ-Artikel vom 14.11.2018: Erste Schmelzen im neuen Pfannenofen von thyssenkrupp.
- [9] ArcelorMittal Bremen, Pressemitteilung v. 24. April 2014: Erfahrungen mit dem neuen Pfannenofen im Stahlwerk. Verfügbar unter: https://www.stahltv.de/bereiche/stahlwerk/der_pfannenofen_im_stahlwerk/
- [10] ArcelorMittal Hamburg, Pressemitteilung v. 25.03.2013: Neuer Pfannenofen für Hamburger Stahlwerke. Verfügbar unter: <https://germany.arcelormittal.com/icc/arcelor/med/3f7/3f768d81-6b1b-d31c-8fb9-39607d7b2f25,11111111-1111-1111-1111-111111111111.pdf>
- [11] Ponamarenko, A. et al.: The first production results of a new ladle-furnace in Oxygen Steel Plant No. 2. Vortrag zur METEC & 4th ESTAD 2019, Düsseldorf, Juni 2019.
- [12] Bender, W.: Hybride Rekuperatoren als flexible Verbraucher: Einbindungsmöglichkeiten; Innovationsforum „Hybrid Heating“; Aachen, 12.04.2019
- [13] Denker, J.; Zander, D. Göttsche, M.: Flexibilisierung bestehender Ofenanlagen – Ofenführung 4.0, stahleisen 137(2017)8, S. 47-50
- [14] Schwotzer, C.; Scheck, F., Pfeifer, H. Bender, W.: Hybrider Rekuperator für den Einsatz erneuerbarer Energien im Industrieofenbau, prozesswärme 03/2018, S. 87-95
- [15] Sprecher, M.; Lungen, H. B.; Stranzinger, B.; Rosemann, H.; Adler, W.: Abwärmernutzungspotenziale in Anlagen integrierter Hüttenwerke der Stahlindustrie. Forschungsbericht des Umweltbundesamtes, Dessau-Roßlau, November 2018. ISSN 1862-4804.
- [16] 10. CO₂-Monitoring-Fortschrittsbericht der Stahlindustrie in Deutschland, Stahlinstitut VDEh, 2010, S. 84
- [17] Weigel, M.: Ganzheitliche Bewertung zukünftig verfügbarer primärer Stahlherstellungsverfahren; Dissertation Bergischen Universität Wuppertal 2014
- [18] Yilmaz, C.: Maßnahmen zur Dekarbonisierung des Hochofenprozesses durch Einsatz von Wasserstoff; Schriftenreihe des Energie-Forschungszentrums Niedersachsen, Band 54; Cuvillier Verlag Göttingen 2018
- [19] thyssenkrupp Steel Europe: Wasserstoff statt Kohle für eine klimafreundliche Stahlproduktion; Stahl + Technik 1 (2019) Nr. 6/7
- [20] Kainersdorfer, F.: Dekarbonisierung der Stahlproduktion; Vortrag auf Energiekonferenz „energy2050: Am Marktplatz Energiezukunft: Was wollen Kunden, was kann die Branche?“; Hof 2017
- [21] Hille, V.: Dekarbonisierung der Stahlproduktion durch signifikanten Einsatz von Wasserstoff – das Projekt SALCOS; Kurzvortrag VIK-Jahrestagung, Berlin 2017
- [22] Schaper, R.: CO₂-Reduktion in der Industrie: Grüner Wasserstoff im Hüttenwerk; Vortrag im Rahmen der Zehnten Niedersächsischen Energietage Fachforum 1: Dekarbonisierung des Gesamtsystems, Hannover 2017
- [23] Bäck, E.; Schenk, J.; Badr, K.; Sormann, A.; Plaul, J. F.: Wasserstoff als Reduktionsmittel für die Eisen- und Rohstahlerzeugung – Ist Situation, Potentiale und Herausforderungen; BHM (2015) Vol. 160 (3)
- [24] Hölling, M.; Weng, M.; Gellert, S.: Bewertung der Herstellung von Eisenschwamm unter Verwendung von Wasserstoff; stahl und eisen 137 (2017) Nr. 6

9 FLEXIBILITÄTSPOTENTIAL UND PERSPEKTIVEN DER GLASINDUSTRIE BEZÜGLICH DES EINSATZES ERNEUERBARER ELEKTRISCHER ENERGIE

Verantwortlicher Autor

Bernhard Fleischmann fleischmann@hvg-dgg.de

Hüttentechnische Vereinigung der Deutschen Glasindustrie e.V., Siemensstraße 45, 63071 Offenbach am Main

9.1 Flexibilitätspotential

Zur Ermittlung der Flexibilität der schmelzenden Glasindustrie in Deutschland wurden die beiden Herstellungsprozesse der sog. Massengläser näher betrachtet. Der Glasherstellungsprozess ist generell ein kontinuierlicher Prozess, bei dem die Prozessschritte Einlegen, Schmelzen, Konditionieren, Formgebung, spannungsarm Kühlen, Qualitätsprüfung und Verpacken allen Glasherstellungsprozessen gemeinsam sind. Dabei gibt es zwei als sog. Schlüsselprozesse eingestufte Prozessketten, die ca. 85% der Glasproduktion in Deutschland repräsentieren und die näher untersucht werden. Kennzeichnend für die Glasherstellung sind zum Einen die über viele Jahre (10 bis 18 Jahre) laufenden, ohne Unterbrechung der Energiezufuhr betriebenen Schmelzanlagen und zum Anderen die enge Verzahnung der einzelnen Produktionsschritte, so dass die Einflussnahme auf einen Prozessschritt sich sofort auf die gesamte Kette auswirkt und die Produktqualität beeinflusst.

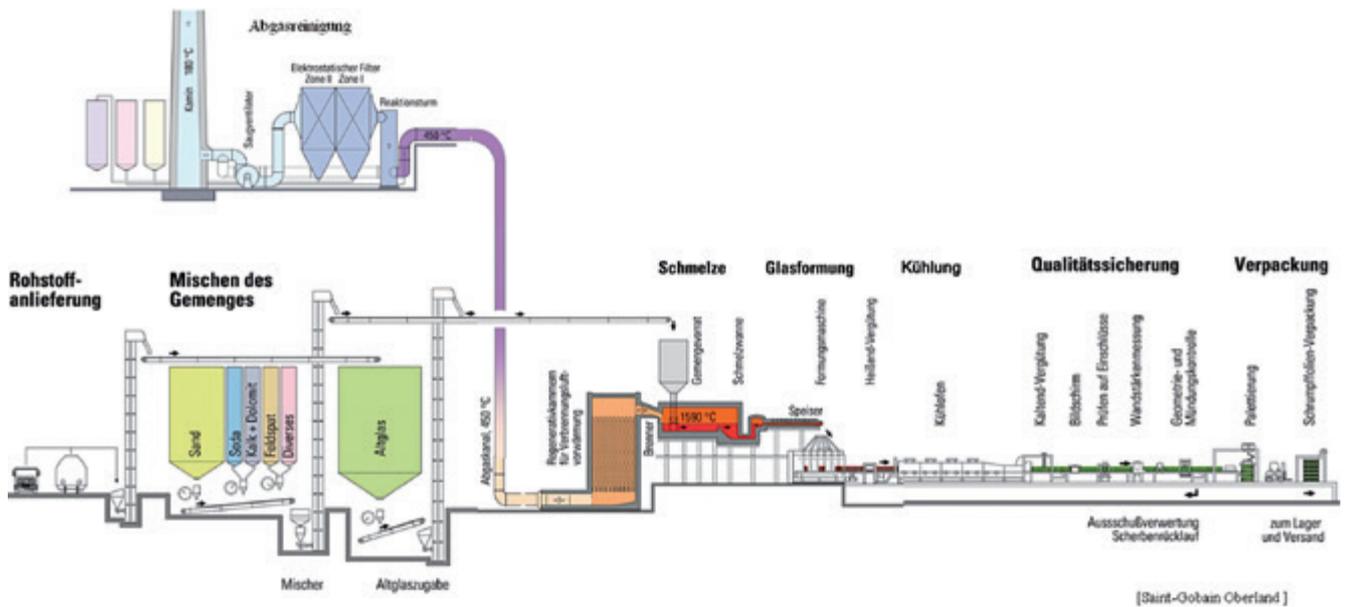
9.1.1 Behälterglasproduktion

Die Ergebnisse [1] der Betrachtung der Behälterglasproduktion (Abbildung 9.1) sind hier noch einmal kurz zusammengefasst. Die relevanten Prozessschritte mit nennenswertem Strombezug sind bei der Behälterglasproduktion:

- Elektrozusatzheizung (EZH) der Schmelzaggregate mit einer verbrennungsbasierten Wärmezufuhr (ca. 75 % der ca. 60 Behälterglaswannen sind mit einer EZH ausgerüstet)
- Druckluftherzeugung, Betrieb von Gebläsen und Ventilatoren
- Steuerung der Mess- und Regeltechnik, Automatisierung, PCs.

Die genannten Verbraucher sind annähernd zu je 1/3 am Verbrauch der elektrischen Energie beteiligt. Die Elektrozusatzheizung (EZH) wird heute schon bei einigen Glasherstellern zur Netzstabilisierung im Rahmen des Demand-Side-Management (DSM) zur Verfügung gestellt. Es liegen also auch schon praktische Erfahrungen zur Flexibilität, den technischen Möglichkeiten und Hemmnissen vor [1].

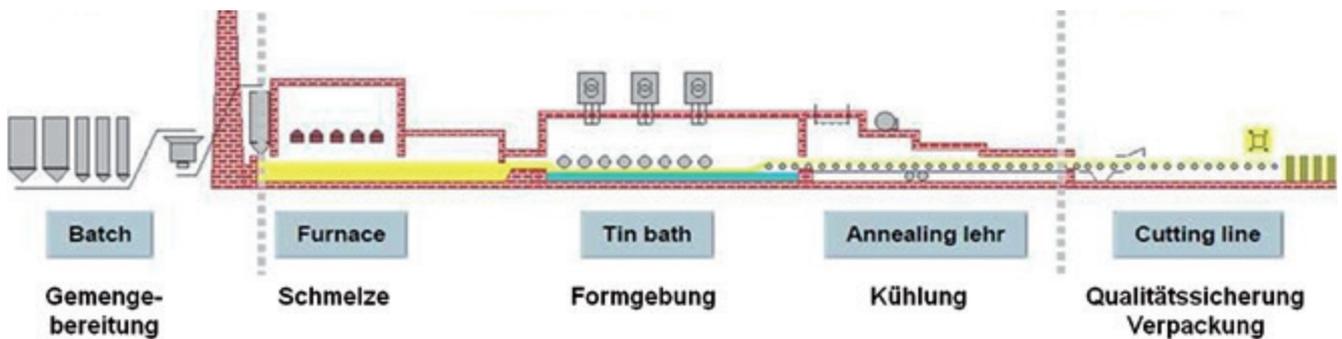
Der in [1] ermittelte Wert der maximalen technischen Flexibilität unter den Randbedingungen des Kurzzeit-Flexibilitätsprofils 1 [1] von ± 550 GWh pro Jahr berücksichtigt dabei, dass nicht immer alle EZH in allen Wannan und selten mit Maximallast betrieben werden. Für die Flexibilitätsprofile 2 und 3 (Mittelfristig und Langfristig) konnte kein Potential nachgewiesen werden.



9.1.2 Flachglasherstellung

Beim zweiten Schlüsselprozess, der Floatglasherstellung ist die Verzahnung der einzelnen Prozessschritte noch stärker ausgeprägt (Abbildung 9.2).

Abb. 9.1: Produktionskette der Behälterglasherstellung mit ihren wesentlichen Prozessschritten und der angeschlossenen Abgasreinigungsanlage



Dabei sind die Prozessstufen mit nennenswertem Strombezug,

- die Glasschmelzwanne, nur falls eine EZH vorhanden ist (4 von 11 Wannen)
- das Float- bzw. Zinnbad: da eine Schutzgasatmosphäre (N_2 , H_2 -Mischung) für den Prozessschritt benötigt wird, kann die benötigte Wärmezufuhr nur elektrisch erfolgen.
- die Kühlung: am wenigsten Energie im Vergleich zu anderen beiden Teilprozessen wird hierfür benötigt

Abb. 9.2: Produktionskette der Floatglasherstellung mit ihren wesentlichen Prozessschritten

Die noch engere Verzahnung der einzelnen Prozessschritte wird schon dadurch verdeutlicht, dass es ein durchgängiges Produktband vom Auslauf/Überlauf des Ofens bis zum Zuschneid am Ende der Produktion gibt. Die Geschwindigkeit, mit der die Glasschmelze das Zinnbad durchläuft wird von der Bandgeschwindigkeit des Kühllofens bestimmt (also ein durchgängiger Prozess von Schmelze über Zinnbad bis Kühlung). Ein nennbares Flexibilitätspotential konnte nicht nachgewiesen werden.

9.2 Flexibilitätsperspektive

Um den kontinuierlichen Glasschmelz- und -herstellungsprozess bezüglich des Einsatzes von elektrischer Energie flexibler gestalten zu können, müssen Änderungen an den Anlagen und der Prozess-

kette vorgenommen werden. Bei einer Ofenreise (Laufzeit der Anlage von kalt zu kalt, ohne Wechsel der Ausmauerung) von ca. 15 Jahren (10 bis zu über 18 Jahren) können Änderungen nur langsam flächendeckend zum Einsatz kommen.

Folgende Optionen wurden näher betrachtet, um die Flexibilitätsperspektiven für die Zeithorizonte 2030 und 2050 bei gleichzeitiger Minderung der CO₂-Emissionen zu erhöhen: Konstruktive und technologische Änderungen am Schmelzaggregat (Hybridwanne und vollelektrische Wannen) sowie der Einsatz von zusätzlichen Hochtemperaturwärmespeichern.

9.2.1 Anpassung des Schmelzaggregates an erneuerbare elektrische Energie: vollelektrische Wannen

Unter der Prämisse, dass die zur Verfügung gestellte elektrische Energie aus erneuerbaren, CO₂-neutralen Quellen stammt, ist die Elektrifizierung die offensichtlichste Methode, um den CO₂-Austoss zu minimieren.

Heutzutage werden in Deutschland fast alle Glasschmelzwannen mit fossilen Brennstoffen beheizt. Über 90 % der fossil beheizten Schmelzaggregate werden mit Erdgas und weniger als 10 % mit Erdöl befeuert. Ca. 5 % aller Schmelzanlagen mit einer Tagestonnage von mindestens 10 t/d sind vollelektrische Schmelzaggregate, in denen meist kleinere Tonnagen (<50 t/d) erschmolzen werden, während Behälterglaswannen im Mittel ca. 220 t/d und Floatanlagen 500 t/d und mehr erschmelzen.

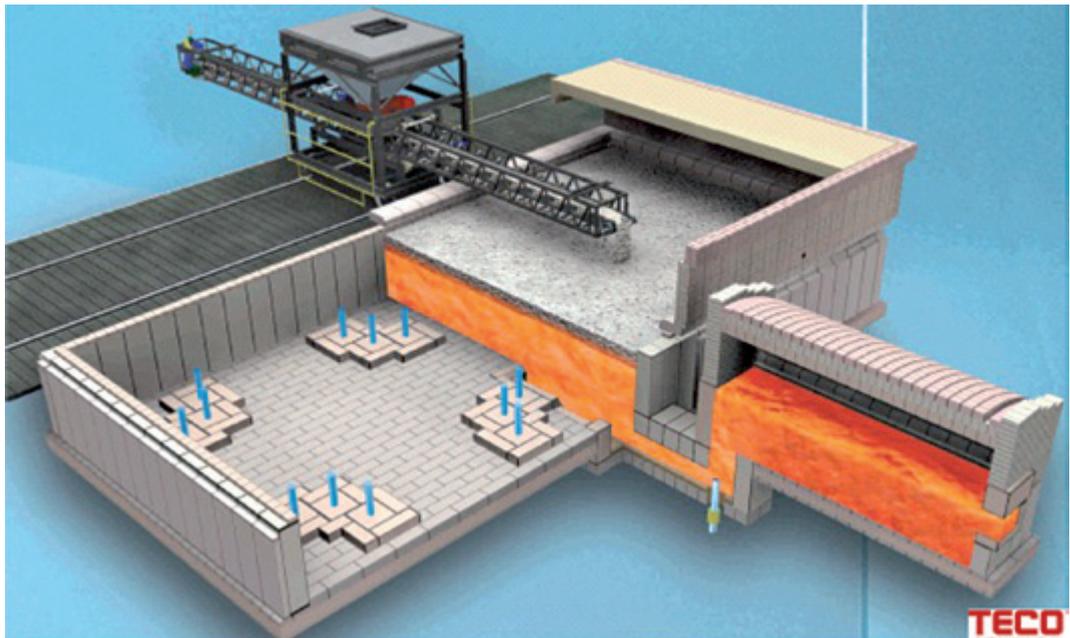


Abb. 9.3: Vollelektrische Glasschmelzwanne für Behälterglas mit einer Maximaltonnage von ca. 200 t/d

Die z.Zt. weltweit größten vollelektrisch betriebenen Glasschmelzwannen erschmelzen >200 t/d [2] (vereinzelt Berichte bis 250 t/d), vgl. Abbildung 9.3. Zur Anwendung kommt dabei das sog. Cold-Top-Verfahren, bei dem eine kalte Gemengedecke die Schmelze nach oben abschließt. Die kalte Gemengedecke hat u.a. den Vorteil, dass keine Verdampfung aus der freien Oberfläche stattfindet und somit keine Verarmung an leicht flüchtigen Komponenten. Außerdem ist der Aufwand bei der „Abgas“reinigung geringer, da weniger Emissionen erfolgen, da der „Abgas“strom gering ist und dessen Temperaturen deutlich geringer sind als bei konventionell befeuerten Wannen. Auch die Strahlungsverluste der heißen Schmelze entfallen, da die Schmelzoberfläche vom kalten Gemenge bedeckt ist und daher keine Wärmestrahlung verloren geht, sondern zum Abschmelzen der Gemengedecke genutzt wird. Die Wärmebelastung des oberen Teils des Ofens ist damit auch verringert und preiswertere feuerfeste Materialien können eingesetzt werden.

In konventionellen Glasschmelzwannen sind die einzelnen Teilschritte (Rauhschmelze, Läutern, Abstehen) des Schmelzens horizontal nebeneinander angeordnet, während bei den elektrischen Schmelzanlagen die einzelnen Schritte vertikal übereinander angeordnet sind.

Die CFD-Modellierungen von zukünftigen, größer ausgelegten Elektrowannen erfolgt z.Zt., auch um die Anordnung und Platzierung der Elektroden zu optimieren. Einige Ofenbauer gehen von einem möglichen Ausbau bis zu 300 t/d aus [2]. Eine andere Möglichkeit hohe Tagestonnagen zu erreichen, ist das Konzept, mehrere „kleinere“ Aggregate zur Versorgung mehrerer Linien mit Hilfe einer Querverbindung (gemeinsamer Verteilerkanal) [2] zu kombinieren. Gerade letztere Möglichkeit bietet den Vorteil, dass eine Wanne repariert bzw. erneuert werden kann und die Produktion der nahestehenden Linie mit Hilfe der anderen Wannen aufrecht erhalten werden kann. Außerdem können so kleinere Wanneneinheiten gebaut werden, deren Funktionstüchtigkeit hinreichend bewiesen wurde. Es wird auch die Möglichkeit diskutiert, das Konzept „eine Wanne (bis ca. 150 t/d) für eine Linie“ zur präferieren, um unnötig große Schmelzaggregate zu vermeiden.

Es gibt aber auch einige grundlegenden Probleme und kritische Fragestellungen bezüglich des Einsatzes vollelektrischer Wannen, die hier noch einmal zusammengefasst werden.

- Elektrisch bedeutet nicht flexibel.
Ohne entsprechende (Zwischen-)Speicher besteht der Glasherstellungsprozess immer noch aus einer eng verflochtenen Prozesskette mit direkt verknüpften Prozessschritten, die ohne Auswirkung auf die Produktqualität nicht gestört oder in ihrer Taktung verändert werden darf.
- Die elektrische Leitfähigkeit der zu erschmelzenden Glasart.
Beim elektrischen Schmelzen ist die elektrische Leitfähigkeit bei hohen Temperaturen Ausschlag gebend, vor allem im Vergleich zur elektrischen Leitfähigkeit der feuerfesten Steine bei denselben hohen Temperaturen. Da die Refraktärwerkstoffe meist die gleichen Hauptkomponenten aufweisen wie die zu erschmelzende Glasschmelze, nähert sich das elektrische Verhalten beider Massen bei hohen Temperaturen oft einander an. Dies ist auch durch die Eindiffusion von Glasinhaltsstoffen in (die Glasphase) des feuerfesten Materials bedingt, da diese leicht beweglichen Bestandteile auch die elektrische Leitfähigkeit maßgeblich mit bestimmen. Dies kann dann auf Grund eines nicht unerheblichen Stromflusses im feuerfesten Material zu vorausweisendem Verschleiß und zu sehr schneller Korrosion führen, so dass geringere Laufzeiten mit einem Schmelzaggregat erreicht werden als vorgesehen. Die Laufzeit von vollelektrischen Wannen ist dabei grundsätzlich kürzer (4 bis 7(8) Jahre bei Massengläsern) als bei konventionellen Wannen (für Massengläser: 10 bis 18 (20) Jahre).
- Elektrodenkorrosion.
Vor allem Farbgläser aber auch „Sonder“-Gläser können Bestandteile enthalten, die beim gebräuchlichen Elektrodenwerkstoff (Molybdän) zu erhöhter Korrosion führen. Zum Einen führt die vermehrte Elektrodenkorrosion zu unerwünschten Farberscheinungen bzw. Fehlfarben im Glasprodukt, zum Anderen ist Molybdän ein Rohstoff, der auch für andere Anwendungen in weit größeren Mengen benötigt wird. Da der hohe Preis für Molybdän durch diesen anderen Anwendungen bestimmt wird, ist eine verstärkte Korrosion mit hohem und schnellem Verbrauch des Molybdän zu vermeiden.
- Cold-Top und Scherbengehalt.
Will man oder kann man das Prinzip des Cold-Top nicht verlassen, dann sind aus der heutigen Erfahrung heraus Scherbengehalte über 60% ein Problem. Mit höherem Scherbengehalt reißt die Gemengedecke gerne auf und die Materialien des eigentlich kalten Oberofens werden höheren Temperaturen als den üblichen 200 bis 250 °C ausgesetzt und drohen zu versagen oder zumindest deutlich schneller zu verschleifen als vorgesehen. Außerdem läuft man bei vielen Einlegetechnologien Gefahr, dass die metallischen Bauteile versagen, wenn sie unerwartet Temperaturen bis 1000°C ausgesetzt werden.

Lösungen die z. Zt. diskutiert und durch Modellierung und Simulationsrechnungen auf der Basis von CFD abgeschätzt, berechnet und beurteilt werden [3], sind

- bei größeren Schmelzaggregaten vom vertikalen Schmelzverlauf wieder zur horizontalen Anordnung zurück zu kehren;

- außerdem das Prinzip des Cold-Top mit all seinen Vorteilen aufzugeben und zu Semi Hot-Top überzugehen. Der Oberofen kann dabei Temperaturen um die 1100°C und mehr erreichen (im Vergleich: heute zwischen 1500 und 1600°C) und sowohl mit elektrisch beheizten Strahlungskörpern betrieben oder auch mit synthetischen, CO₂-neutralen Brennstoffen mit Hilfe der üblichen Brennertechnologien beheizt werden.

Ein erster Schritt in Sachen Flexibilisierung von voll elektrischen Wannen ist in Neuseeland umgesetzt worden. Zum Abbau von Spitzenlasten im lokalen Netz können an zwei voll elektrischen Behälterglaswannen, in denen Farbglas erschmolzen wird, bis zu 30 % der benötigten Leistung für einige Stunden heraus genommen und die Glasproduktion dabei aufrecht erhalten werden. Über die Häufigkeit der Umsetzung dieser Maßnahme und über die Erholungszeit liegen keine Informationen vor. Um das Schmelzaggregat zu diesem Verhalten zu befähigen, musste auch das Refraktärmaterial des Oberofens angepasst werden, damit die Temperaturschwankungen unbeschadet überstanden werden. Auch hier sind keine detaillierten Informationen verfügbar [4].

Ein weiteres Problem stellt der zusätzliche Leistungsbezug für das Werk bei voller Elektrifizierung dar. Die derzeitig installierten (Zu-)Leitungen und Installationen sind in den meisten Werken bzw. Standorten nicht für den zur vollen Elektrifizierung nötigen Bezug an elektrischer Energie ausgelegt. Hier muss die Infrastruktur angepasst werden und die Kosten für Umrüstung der Strominfrastruktur sind unklar. Werksintern wären zudem zusätzliche Trafos, Verteiler etc. nötig. Auch die lokalen Verteilernetze stoßen dabei oft an ihre Grenzen.

9.2.2 Hybridwannen

Bei der Diskussion um einen hybriden bzw. bimodalen Betrieb von Glasschmelzaggregaten ist die einhellige Meinung, dass ein Wechsel 100 % elektrisch auf 100 % Brennstoff in einem Schritt und kurzer Zeit nicht möglich ist, ohne die Produktqualität massiv zu beeinflussen. Die zwei wichtigsten Hemmnisse sind das Verhalten der feuerfesten Materialien und die Einflussnahme auf Konvektionsströmungen in der Schmelze, was zu extremen Qualitätsproblemen führen wird. Konsens ist, dass ein Schmelzaggregat mit deutlich erhöhtem Anteil an Elektrozusatzheizung im Schmelzbereich und ein Läuter-/Abstehbereich mit freier Oberfläche und Strahlungserwärmung durch Brenner oder Strahlungsrohre eine mögliche Lösung ist. Damit sollte ein maximaler Anteil der elektrischen Energie von bis zu 60 % (in der aktuellen Diskussion [3]: Superboost bis 80 %) und ein minimaler Anteil von ca. 10 % realisierbar sein. Auch hier kommt man auf Grund von Simulationsrechnungen zu folgendem, möglicherweise umsetzbaren Lösungsweg: horizontaler Anordnung der Prozessschritte und semi hot-top, mit hohem Elektrifizierungsgrad (60-80 %), freier Schmelzbadoberfläche im Läuterbereich und Strahlungsbrenner bzw. -rohre, für Tonnagen auch über 600 t/d. Eine Frage die auch hier noch offen bleibt, und durch Simulationsrechnungen nicht ohne weiteres beantwortbar ist, ist das zu verwendete feuerfeste Material für die Auskleidung der Schmelzanlage und dessen Korrosionsverhalten. Ein weiteres Ergebnis der Simulationsrechnungen ist, dass der Wechsel des Energieträgers nur in kleinen Schritten (bis ca. 10 % pro Schritt) erfolgen darf, da ansonsten die Strömungsprofile in der Schmelze schlagartig so stark verändert werden, dass Schmelzrelikte als Fehler im Produkt erscheinen. Größere Sprünge in der Verteilung der Energieträger müssen also stufenweise und über Tage verteilt erfolgen.

9.2.3 Hochtemperaturwärmespeicher bei der Glasherstellung

Regeneratoren sind als Hochtemperatur-Wärmespeicher für sensible Wärme seit Erfindung des Wannenofens durch die Gebrüder Siemens im Jahr 1867 integraler Bestandteil der Glasschmelzwannen. Die Regeneratoren werden dabei als Kurzzeit- bzw. Verschiebespeicher genutzt. Dabei wird ca. 1/3 der zur Schmelze in das Schmelzaggregat eingebrachten Energie bei der Massenglasherstellung durch die Luftvorwärmung in Form von thermischer Energie in den Schmelzprozess eingebracht. Die Effizienz der Luftvorwärmung ist heute nahe am physikalischen Maximum. Die thermische Energie, die so auf direktem Wege wieder dem Prozess zugeführt wird, beträgt ca. 16 PJ/a. Würde die thermische Verwertung, der im Abgas beim Verlassen des Verbrennungsraumes enthaltenen Energie nicht erfolgen, müsste mehr als dieser Betrag durch andere Energieträger (elektrische Energie

oder Brennstoffe) ersetzt werden, um dieselbe Menge an Glasprodukten in vergleichbarer Qualität in der selben Zeit mit der gleichen Anzahl an Wannen zu erzeugen.

Im Rahmen des Vorhabens wurden Überlegungen angestellt, ob und wie weitere (Hochtemperatur-)Wärmespeicher in die bestehende Prozesskette integriert werden können, und dies mit den Industriepartnern diskutiert. Die Ergebnisse dieser Überlegungen sind in Kapitel 3.5 genauer dargestellt. Grundsätzlich handelt es sich dabei um Teilprozesse bei denen eine gezielte Erwärmung (Temper- bzw. Kühlöfen) bzw. Vorerwärmung (erste Stufe der Vorwärmung der Verbrennungsluft bzw. des Gemenges) mit Hilfe eines Mediums (Luft) vorgenommen werden kann. Die Erwärmung des Speichermediums erfolgt mit elektrischer Energie, wenn diese ausreichend und preiswert zur Verfügung steht. In Zeiten in denen die elektrische Energie aus regenerativen Quellen nicht verfügbar ist, kann dann die zum Erhalt des Prozesses nötige Wärme aus dem Speicher entnommen und prozesstechnisch genutzt werden.

9.3 Zusammenfassung

Zur Beurteilung der Flexibilität der Glasindustrie in Deutschland bezüglich der zeitlich schwankenden Verfügbarkeit erneuerbarer Energien wurden zwei sog. Schlüsselprozesse näher betrachtet: die Behälter- und die Flachglasherstellung. Beide Glasherstellungsprozesse decken ca. 85 % der Jahrestonnage ab und repräsentieren auch ca. 85 % des Energiebedarfs zur Glasherstellung in Deutschland. Während bei der Behälterglasherstellung ein gewisses technisches Flexibilitätspotential für kurzzeitige Maßnahmen auf Grund der vorhandenen Elektrozusatzheizung (EZH) ermittelt werden konnte, wurde bei der Flachglasherstellung praktisch keine Flexibilität für die abgefragten Profile erkannt bzw. von den Herstellern kein erkennbares Potential ausgewiesen. Als maximales technisches Flexibilitätspotential ergibt sich somit 550 GWh/a in positiver wie in negativer Richtung bei einem aktuellen Strombezug von rund 3000 GWh/a der schmelzenden Betriebe.

Die Diskussion um die Anpassung bzw. Adaption der Glasschmelzanlagen an die Forderung der CO₂-neutralen Schmelze ist in vollem Gange. Hier werden zurzeit national wie international die beiden grundlegenden Konzepte „vollelektrische Wanne“ und „Hybridwanne“ diskutiert und mit Hilfe von Simulations- und Modellrechnungen eine Beurteilung bzw. Abschätzung der unterschiedlichsten Varianten vorgenommen.

Unabhängig davon nahm im Laufe der Arbeiten eine Idee Gestalt an, einen geschlossenen CO₂-Kreislauf um eine Wanne zu errichten. In einem Nachfolgeprojekt soll eine Machbarkeitsstudie klären, welche Technologien einsatzbereit sind sowie mit hoher Effizienz zur Verfügung stehen und ob diese mit den speziellen Randbedingungen (Temperatur, Verunreinigungen, Staubbelastung) der Glasherstellung zu Rande kommen. Außerdem soll geklärt werden, wo entsprechende Speicher in dieser Kette integriert und wie sie ausgelegt werden müssen, um eine hohe Flexibilität des CO₂-Kreislaufes zu gewährleisten.

9.4 Literatur

- [a] Ausfelder, F.; Seitz, A.: von Roon, S. (Hrsg.): Flexibilitätsoptionen in der Grundstoffindustrie. Methodik – Potenziale – Hemmnisse. Februar 2018. Frankfurt am Main. ISBN: 978-3-89746-206-9
- [b] Interview m. Vertretern der Flachglasindustrie. Februar 2019.
- [c] 060_Tab02_mit_GH_2017.xlsx des statistischen Bundesamtes Wiesbaden
- [1] Ausfelder, F.; Seitz, A.: von Roon, S. (Hrsg.): Flexibilitätsoptionen in der Grundstoffindustrie. Methodik – Potenziale – Hemmnisse. Februar 2018. Frankfurt am Main. ISBN: 978-3-89746-206-9
- [2] Reynolds, A.: Larger capacity all-electric furnaces. Furnaces international 2017-Dec, 16-19
- [3] International Congress on Glass ICG, Boston (USA), 09. bis 14.06.2019. Vorträge und Diskussionen, persönliche Gespräche
- [4] persönliches Gespräch am Rande des ICG Congress on Glass, Boston (USA), 09. - 14.06.2019 nach Vortrag über Ergebnisse von SynErgie

10 EINSCHÄTZUNG DES FLEXIBILITÄTSPOTENTIALS BEI DER ZEMENTMAHLUNG

Verantwortliche Autoren

Johannes Ruppert	johannes.ruppert@vdz-online.de
VDZ gGmbH, Tannenstraße 2, 40476 Düsseldorf	
Sebastian Rösch	sebastian.roesch@vdz-online.de
VDZ gGmbH, Tannenstraße 2, 40476 Düsseldorf	
Stefan Seemann	stefan.seemann@vdz-online.de
VDZ gGmbH, Tannenstraße 2, 40476 Düsseldorf	
Kevin Treiber	kevin.treiber@vdz-online.de
VDZ gGmbH, Tannenstraße 2, 40476 Düsseldorf	
Stefan Lindner	stefan.lindner@rohrdorfer.eu
Rohrdorfer Gruppe, Sinning 1, 83101 Rohrdorf	

10.1 Einleitung

Im SynErgie-Projekt wurden zunächst Möglichkeiten für den flexiblen Betrieb von Mahlprozessen bei der Zementherstellung beschrieben und ihre maximalen technischen Potentiale eingeschätzt [1]. Darauf aufbauend hat der VDZ in Zusammenarbeit mit der Rohrdorfer Gruppe ein Modell entwickelt, welches unter Berücksichtigung von realen Produktionsdaten eine detailliertere Einschätzung des Flexibilitätspotentials für den Zementmühlenbetrieb ermöglicht [2]. Das bestehende Modell wurde erweitert und genutzt, um das Flexibilitätspotential anhand der Produktionsdaten von zwei Referenzwerken und für die beiden im Projekt übergreifend definierten Anforderungsprofile 1 und 2 für kurzfristige und mittelfristige Flexibilität zu untersuchen. Zudem wurde für Anforderungsprofil 3 die praktische Umsetzbarkeit einer langfristigen Lastflexibilisierung von 1-5 Tagen bei der Zementmahlung anhand von Modellergebnissen evaluiert.

10.2 Modell-Eingangsdaten

Das Referenzwerk 1 verfügte in zwei modellierten Jahren im ersten Referenzjahr über drei Zementmühlen. Im Referenzjahr 2 waren nur noch zwei Zementmühlen in Betrieb und gleichzeitig sind diese erheblich stärker ausgelastet. Die Zementmühlen verfügen über installierte Antriebsleistungen von jeweils 2,3 MW, 5,0 MW und 1,1 MW. Auf den Zementmühlen wurden acht unterschiedliche Zementarten produziert. Für die Produktlagerung und um eine kontinuierliche Verfügbarkeit der Produkte für die Kunden des Zementwerks sicherzustellen, stehen dreizehn Silos mit einer Gesamtkapazität von knapp über 40.000 Tonnen zur Verfügung. Diese Größenordnung ist vergleichbar mit der ermittelten Gesamtsilokapazität von 35.000 Tonnen in durchschnittlichen integrierten Zementwerken. [1, S. 107].

Im Referenzwerk 2 wurden in den beiden modellierten Jahren neunzehn verschiedene Zementprodukte auf zwei Kugelmühlen produziert. Die gesamte Silokapazität der vierundzwanzig Zementsilos dieses Zementwerks liegt bei etwa 28.000 Tonnen für alle Zementprodukte und ist somit im Vergleich zur mittleren Gesamtsilokapazität integrierter Zementwerke von 35.000 Tonnen geringer [1, S. 107]. Die beiden Kugelmühlen verfügen über installierte Antriebsleistungen von jeweils 1,3 MW und 3,6 MW.

10.3 Modellergebnisse

Die ermittelten Ergebnisse basieren auf der entwickelten Modellstruktur [2, S. 9] zur Abbildung des Lastflexibilisierungspotentials von Zementmühlen. Im Unterschied zu der ersten Anwendung des Modells [2, S. 14] wurde das Strompreiskriterium in den aktuellen Modellberechnungen variiert. Es werden weiterhin unterschiedliche Strompreis-Perzentile je nach Referenzjahr verwendet, die sich nun jedoch auf einen gleitenden Bezugszeitraum von einem Monat beziehen. Der Bezugszeitraum für die Berechnung des Strompreislimits (*Glossar*) für den flexiblen Mühlenbetrieb wird somit unabhängig von den einzelnen Anforderungsprofilen berechnet und stündliche Schwankungen des genutzten Kostenindex (*Glossar*) wirken sich weniger stark auf das berechnete Strompreislimit im Modellmühlenbetrieb aus. Die im Modell ermittelte flexibel nutzbare Regelenergie (*Glossar*) basiert hierbei auf einer Maximalabschätzung für die beiden Referenzwerke, da die installierte Mühlenantriebsleistung den Berechnungen zugrunde gelegt wird und nicht die tatsächlich abgerufene Mühlenantriebsenergie im Jahresmittel.

10.3.1 Ergebnisse Anforderungsprofil 1 und 2

Abbildung 10.1 zeigt die verfügbare Regelenergie gemäß Anforderungsprofil 1 der beiden Referenzwerke bei einer Mindestmühlenbetriebszeit von 4 Stunden im Vergleich. In Summe können im ersten Referenzjahr im Fall des ersten Referenzwerks etwa 13.300 MWh an positiver Regelenergie (Lastreduktion) zur Verfügung gestellt werden, im zweiten Referenzjahr hingegen lediglich 2.800 MWh. Die Reduktion der positiven Regelenergie zwischen den ersten beiden Referenzjahren bei Referenzwerk 1 lässt sich auf die Abschaltung der Zementmühle 3 sowie auf die höhere Mühlenauslastung insgesamt im zweiten Referenzjahr zurückführen. Für das untersuchte zweite Referenzwerk liegt die gesamt verfügbare Regelenergie zwischen 6.200 MWh im ersten Referenzjahr und 8.700 MWh im zweiten Referenzjahr. Der Anstieg ist im Wesentlichen auf die reduzierte Auslastung der größeren Zementmühle 2 mit einer installierten Antriebsleistung von 3,6 MW zurückzuführen. Die Regelenergiebeiträge der einzelnen Zementmühlen aus beiden Referenzwerken zum Gesamtergebnis sind in Abbildung 10.1 jeweils in einem Balken dargestellt.

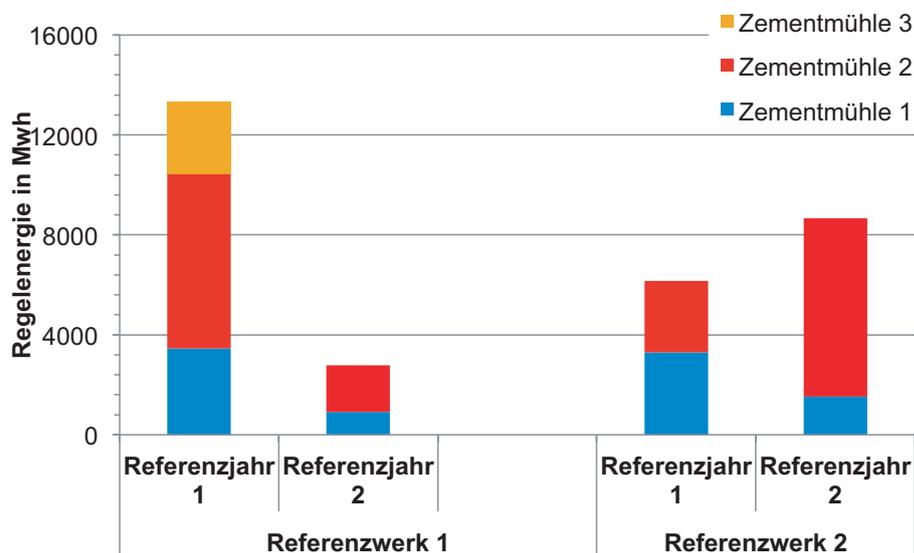


Abb. 10.1: Vergleich der flexibel eingesetzten positiven Regelenergie für zwei unterschiedliche Referenzwerke und Referenzjahre für Anforderungsprofil 1

In Tabelle 10.1 sind die Ergebnisse gemäß Anforderungsprofil 2 für zwei unterschiedliche Referenzwerke jeweils bei einer Mindestmühlenbetriebszeit von 4 Stunden zusammengefasst. Für das erste Referenzwerk sind die Ergebnisse nochmals vergleichend in der ersten Tabellenhälfte gegenübergestellt (links: Regelenergie mit Energiepreislimit je Anforderungsprofil, rechts: Regelenergie bei verändertem monatlichem Energiepreislimit). Aus der Änderung des Kriteriums für den flexiblen Mühlenbetrieb resultiert ein Anstieg der verfügbaren Regelenergie größer 30% unabhängig vom betrachteten Referenzjahr.

Tabelle 10.1: Modellierte jährliche Regelenergie der Zementmühlen aus zwei Referenzwerken nach Anforderungsprofil 2 (links: *Regelenergie mit Strompreislimit je Anforderungsprofil [2], rechts: Regelenergie bei verändertem monatlichem Strompreislimit).

Regelenergie in MWh	Referenzjahr 1		Referenzjahr 2	
	positiv (Lastminderung)	negativ (Lasterhöhung)	positiv (Lastminderung)	negativ (Lasterhöhung)
Referenzwerk 1				
Zementmühle 1	2300 / 3500	1800 / 2900	500 / 900	500 / 900
Zementmühle 2	4500 / 6100	4600 / 7900	1400 / 1700	1300 / 1400
Zementmühle 3	1300 / 3000	1600 / 1500	-	-
Referenzwerk 2				
Zementmühle 1	2600	2100	1700	6000
Zementmühle 2	3700	2900	6000	1500

In Abbildung 10.2 ist der Zusammenhang zwischen bereitgestellter positiver Regelenergie und der prozentualen Mühlenauslastung dargestellt. Die berechnete Regelenergie bzw. das Lastflexibilisierungspotential hängt maßgeblich von der abgerufenen Antriebsleistung einer Kugelmühle ab. Um eine einheitliche Darstellung für alle Zementmühlen mit unterschiedlichen Antriebsleistungen zu ermöglichen, wurde in der nachfolgenden Abbildung 10.2 eine normierte Antriebsleistung verwendet. Das Diagramm verdeutlicht, dass eine Steigerung der Mühlenauslastung unmittelbar zur Verringerung der bereitgestellten positiven Regelenergie führt. Die Daten weisen dabei einen annähernd linearen Verlauf auf.

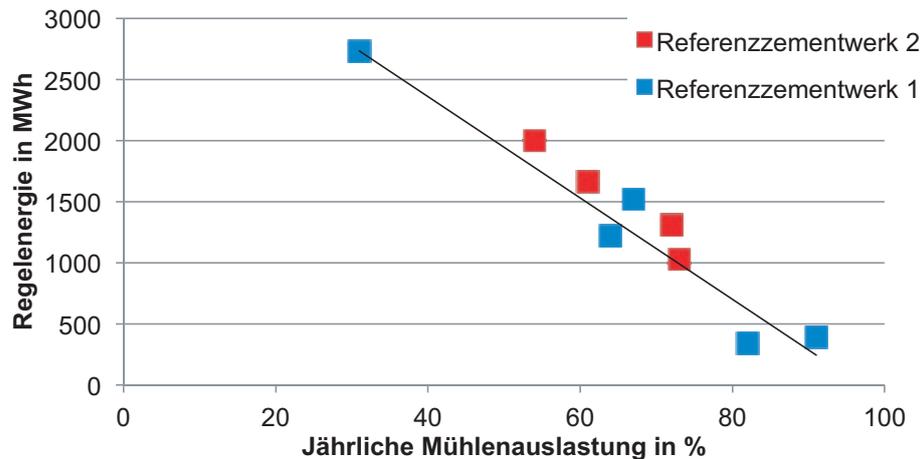


Abb. 10.2: Korrelation zwischen Mühlenauslastung und verfügbarer Regelenergie bei einer normierten Mühlenantriebsleistung für zwei unterschiedliche Referenzwerke und Referenzjahre nach Anforderungsprofil 2

10.3.2 Ergebnisse Anforderungsprofil 3

Vor dem Hintergrund einer zunehmenden Integration von erneuerbaren Energieträgern in die Versorgungsstruktur gewinnt das Anforderungsprofil 3 zur Abdeckung von längeren Stromknappheitsperioden zwischen 1 und 5 Tagen (sogenannte Dunkelflauten) in Zukunft zunehmend an Bedeutung [3, S. 34, Abb. 1.8]. Die Auftrittshäufigkeit einer Dunkelflaute in Zukunft ist stark von den genutzten Wetterdaten und der zukünftigen räumlichen Verteilung der Erzeuger abhängig, sodass sich unterschiedliche Szenarien ergeben [3, S. 37]. In Abhängigkeit des betrachteten Szenarios treten solche Ereignisse mit einer relativ geringen Wahrscheinlichkeit auf, die stark von der Netzeinspeisung aus Wind- und Sonnenenergie sowie dem Kriterium zur Definition einer Dunkelflaute abhängt [3, S. 37, Abb. 1.11].

Eine langfristige Lastreduktion bzw. Lasterhöhung setzt zur fortwährenden Gewährleistung der Versandfähigkeit jedoch ausreichende Silofüllstände voraus. Zur Quantifizierung des Lastflexibilisierungspotentials bei Verwendung der Randbedingungen aus Anforderungsprofil 3 wurde das Modell genutzt und eine Parameterstudie durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Berechnungen sind nachfolgend dargestellt.

Erhöhung der Silokapazität

Abbildung 10.3 zeigt exemplarisch die Häufigkeiten der potentiellen positiven Lastflexibilisierung, also einer Lastreduktion durch Mühlenabschaltung, in Abhängigkeit der Gesamtsilokapazität. Diese Häufigkeiten beziehen sich hierbei auf theoretisch maximal mögliche Lastflexibilisierungszeiträume zwischen 1 und 5 Tagen entsprechend des Modellmühlenbetriebs bei veränderter Silokapazität.

Auf der Abszisse wurde die Dauer der Mühlenabschaltung zwischen 1 und 5 Tagen variiert, während auf der Ordinate die jährlichen Häufigkeiten einer Lastflexibilisierung summarisch für alle Zementmühlen eines Zementwerks dargestellt sind. Die Erhöhung der Silokapazität führt, wie erwartet, zu einem Anstieg des Lastflexibilisierungspotentials. Mit zunehmender Dauer der Abschaltung verringert sich dieser Effekt jedoch deutlich.

Es ist darüber hinaus zu erkennen, dass bei kürzeren Abschaltdauern die Häufigkeit steigt. Im realen Betrieb ist hier aber eine deutlich diffusere Zeitspanne zu erwarten. Aufgrund der geringen Auftretswahrscheinlichkeit einer Dunkelflaute in Abhängigkeit der Residuallast im Netz und vor dem Hintergrund der hohen Investitionskosten zur Erweiterung der Silokapazität bleibt der ökonomische Nutzen einer erhöhten Silokapazität zur Steigerung des Lastflexibilisierungspotentials nach Anforderungsprofil 3 jedoch fraglich. Die beiden Referenzwerke weisen hierbei, gemessen an den Häufigkeiten, ein ähnliches Potential zur Lastflexibilisierung auf. Eine Silokapazität von 200 % entspricht hierbei einer Verdoppelung der bestehenden Silokapazität im betrachteten Zementwerk.

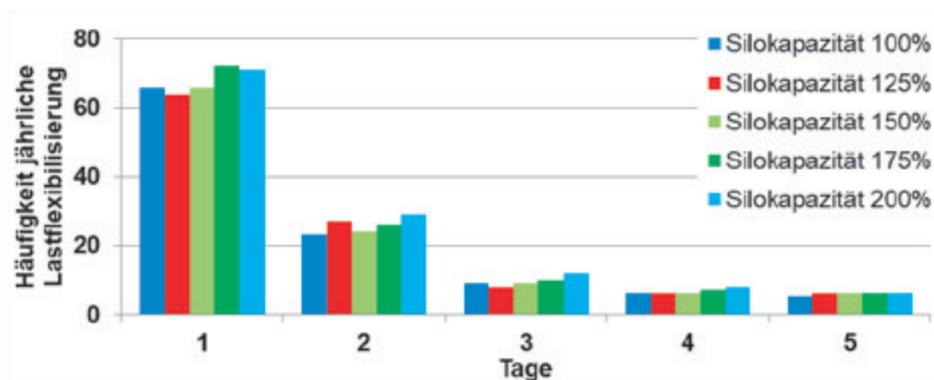


Abb. 10.3: Häufigkeiten einer potentiellen positiven Lastflexibilisierung über 1-5 Tage gemäß Anforderungsprofil 3 bei Erhöhung der Silokapazität jeweils für alle Zementmühlen in Referenzwerk 2

Erhöhung der Mühlenkapazität

Abbildung 10.4 sowie Abbildung 10.5 stellen den Einfluss einer erhöhten Mühlenkapazität auf die Häufigkeiten der potentiellen Lastflexibilisierung gemäß Anforderungsprofil 3 für alle Zementmühlen dar. Diese Häufigkeiten beziehen sich wiederum auf theoretisch maximal mögliche Lastflexibilisierungszeiträume zwischen 1 und 5 Tagen entsprechend des Modellmühlenbetriebs bei veränderter Mühlenkapazität. Es wurde eine Variation der Mühlenkapazität zwischen 100 % und 200 % untersucht. Unabhängig von der Dauer der Lastflexibilisierung zeigt sich, dass bei Erhöhung der Mühlenkapazität längere Abschaltzeiten möglich sind, da Produktionsziele in kürzeren Zeiträumen erreicht werden können. Eine Lasterhöhung durch Mühleneinschaltung, die im Falle einer Hellbrise (Stromüberschuss über einen längeren Zeitraum gemäß Anforderungsprofil 3) relevant werden kann, ist für dieses Szenario aufgrund der gesteigerten Produktionsleistung bei gleichbleibender Silokapazität jedoch nur noch in reduziertem Maß möglich (Abbildung 10.5).

Abb. 10.4: Häufigkeiten einer positiven Lastflexibilisierung (Mühlenabschaltung) über 1-5 Tage gemäß Anforderungsprofil 3 bei Erhöhung der Mühlenkapazität für Referenzwerk 2

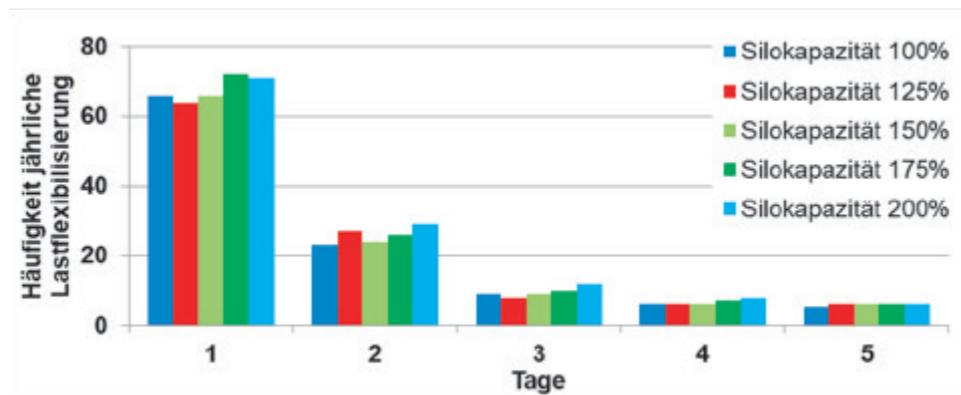
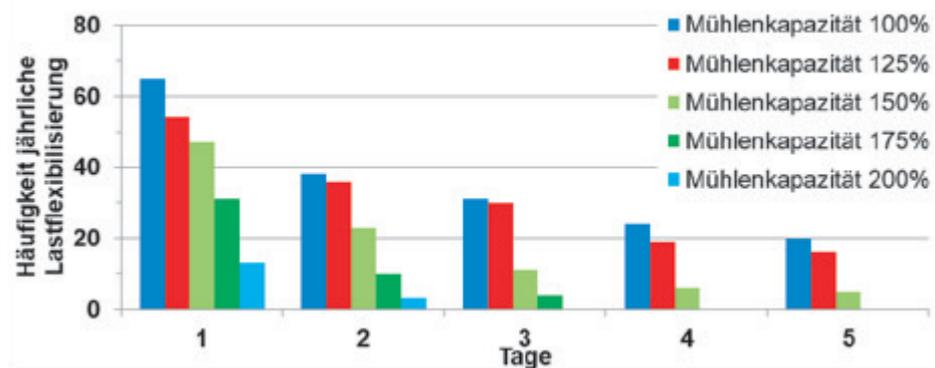


Abb. 10.5: Häufigkeiten einer negativen Lastflexibilisierung (Mühlen-einschaltung) über 1-5 Tage gemäß Anforderungsprofil 3 bei Erhöhung der Mühlenkapazität für Referenzwerk 2.



10.4 Rahmenbedingungen des flexiblen Mühlenbetriebs und Kostenindizes

Die untersuchten Szenarien beziehen sich auf Daten zum Mühlenbetrieb aus zwei Zementwerken und in zwei unterschiedlichen Referenzjahren. Zusätzlich wurde der potentielle Mühlenbetrieb im Jahr 2030 unter Berücksichtigung von zwei unterschiedlichen Strompreisszenarien modelliert, um die Auswirkungen zukünftiger Strompreisentwicklungen auf das Ergebnis untersuchen zu können. Die beiden Referenzjahre 1 und 2 beziehen sich dabei auf Daten aus der jüngeren Vergangenheit und die beiden Strompreisszenarien 1 und 2 auf modellierte Jahreszeitreihen für das Jahr 2030.

Als Maß für das Lastflexibilisierungspotential ist die berechnete Regelenergie im Modell im Wesentlichen an den zeitlichen Verlauf eines Kostenindex im Jahr und die damit verbundenen Mühlenbetriebszeiten gekoppelt. Für die Vergleichbarkeit der Modellergebnisse entsprechen die Produktionsziele für das Jahr 2030 hierbei denen aus dem Referenzjahr 1. Das Nachholen der durch den flexiblen Betrieb ggf. ausgefallenen Produktion wird im Modell durch das unveränderte Produktionsziel sichergestellt. In den drei Szenarien des Modells wird also eine konstante Produktion angenommen und lediglich der Kostenindex als Kriterium zur Mühlein- und Mühlenabschaltung wurde verändert.

Die genutzten Kostenindizes wurden aus den Börsenstrompreisen in Deutschland abgeleitet. Hierbei muss beachtet werden, dass es sich bei diesen Kostenindizes um fiktive Daten zur Abbildung der variablen Anteile der Stromkosten handelt. Ein direkter Bezug auf effektive Gesamtstromkosten und -preise für Industriebetriebe ist unter anderem aus Gründen des Wettbewerbs an dieser Stelle nicht möglich. Die in der Industriepraxis ebenfalls relevanten fixen Kostenanteile, Steuern und Netzentgelte wurden nicht miteinbezogen. Vielmehr wurden sie vereinfachend für den Vergleich der Ergebnisse als konstant und für eine zunehmend flexible Mühlenbetriebsweise als zunächst nicht ausschlaggebend angenommen.

Abbildung 10.6 zeigt die statistische Auswertung der genutzten Kostenindizes für die beiden Referenzjahre sowie für die beiden unterschiedlichen Strompreisszenarien im Jahr 2030. Insgesamt wird in den Kostenindizes der Strompreisszenarien 1 und 2 von einem bis 2030 deutlich steigenden variablen Anteil im Strompreis ausgegangen (Abbildung 10.6, Zeilen 3 und 4, mit annähernde Verdopp-

lung oder Verdreifachung im Mittelwert und Median). Während die Daten im Strompreisszenario 1 eine ähnliche Verteilung und Breite wie in den Referenzjahren aufweisen, wird im Strompreisszenario 2 eine breitere Verteilung mit deutlich abgesetzten Minimal- und Maximalwerten im Kostenindex angenommen (Abbildung 10.6, Zeile 4). Im Strompreisszenario 1 werden negative Börsenstrompreise ausgeschlossen und zu Null gesetzt. Dies könnte aus einer insgesamt zunehmenden Nutzung von unterschiedlichen Technologien zur Stromspeicherung resultieren. Im Kostenindex des Strompreisszenarios 1 ist dadurch die Häufigkeit des Minimalwertes 0 €/MWh auf ca. 5 % der Jahresstunden erhöht und die Verteilung bei diesem Wert nach unten abgeschnitten (Abbildung 10.6, Zeile 3). Mit den beiden Strompreisszenarien 1 und 2 für 2030 lassen sich die Auswirkungen auf das ökonomische Potential beim flexiblen Betrieb von Zementmühlen somit in einer gewissen Bandbreite von möglichen Entwicklungen der variablen Strompreisanteile im Modell untersuchen.

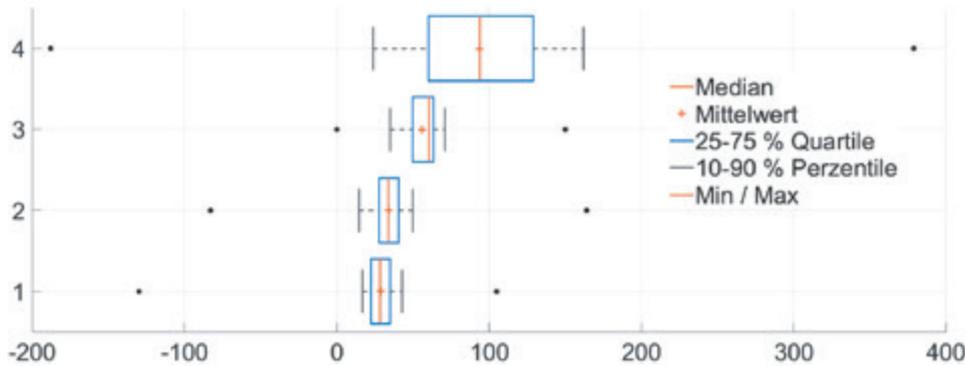


Abb. 10.6: Statistische Auswertung der Jahresverläufe der genutzten Kostenindizes, von unten nach oben in Zeilen: 1 = Referenzjahr 1, 2 = Referenzjahr 2, 3 = Strompreisszenario 1 und 4 = Strompreisszenario 2. Kostenindizes für die beiden Referenzjahre 1 und 2 [4] sowie für die Strompreisszenarien 1 und 2 für 2030 [5,6]

10.4.1 Modellergebnisse für unterschiedliche Strompreisszenarien

Abbildung 10.7 zeigt die Entwicklung der positiven Regelennergie (Mühlenabschaltung) nach Anforderungsprofil 2 für eine mittelfristige Flexibilität (3-12 Std.) in den zwei Referenzwerken in Abhängigkeit der Kostenindizes für das Referenzjahr 1 und der beiden Strompreisszenarien 1 und 2 für 2030. Die modellierte Summe der Regelennergie der Zementmühlen weist insgesamt nur geringe Änderungen bei Nutzung der verschiedenen Kostenindizes in den beiden Referenzwerken auf. Während für den Mühlenbetrieb des ersten Referenzwerkes die Summe der Regelennergie im Jahr 2030 um maximal 10 % zunimmt, fällt diese im Fall des zweiten Referenzwerkes um maximal 15 %. Dabei ist der absolute Unterschied der verfügbaren Regelennergie zwischen Referenzwerk 1 und Referenzwerk 2 auf die unterschiedli-

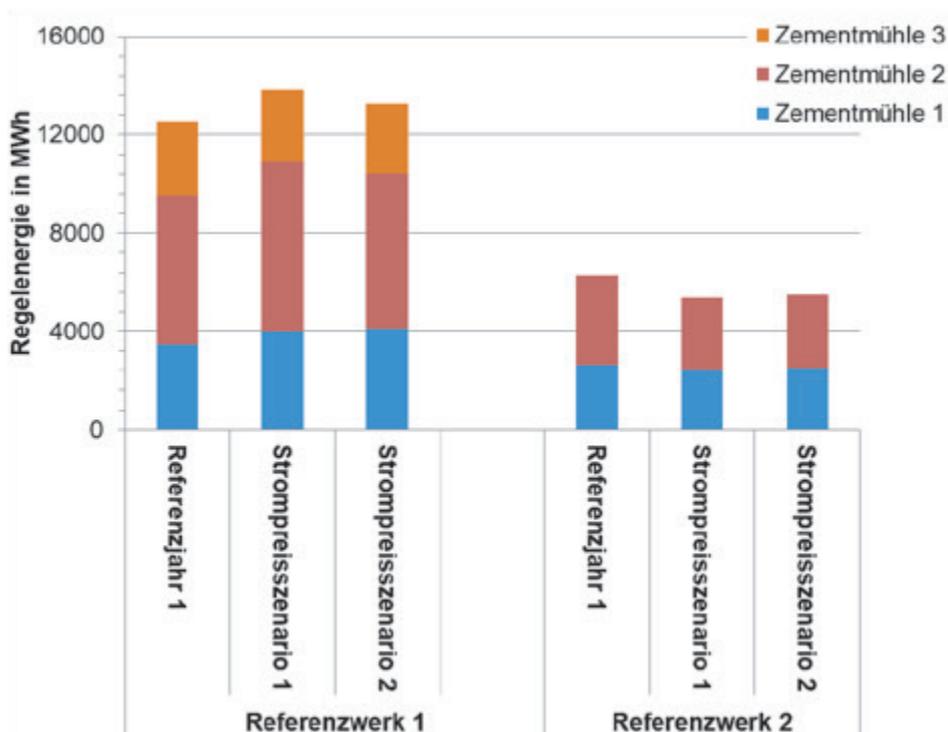


Abb. 10.7: In der Zementmahlung nach Anforderungsprofil 2 flexibel eingesetzte positive Regelennergie bei unterschiedlichen Kostenindizes und bei einer Mindestmühlenbetriebszeit von 4 Stunden in zwei Referenzwerken

che Mühlenantriebsleistung sowie auf Unterschiede der Mühlenauslastung der Zementmühlen von etwa 10 % zurückzuführen. Ein zunächst erwarteter Effekt auf die Regelenergie durch den Anreiz besonderer Extremwerte im Kostenindex des Strompreisszenarios 2 für 2030 und eine deutliche Auswirkung auf die Jahressumme der verfügbaren Regelenergie nach Anforderungsprofil 2 bleiben aus.

10.5 Hemmnisanalyse

Die bisherigen wirtschaftlichen Analysen ergaben hinsichtlich der Kostenreduktion eher geringe Effekte bis -7 % auf dem Kostenindex durch die zusätzlichen Flexibilität im Modellbetrieb [2]. Insbesondere zeigte sich, dass im Fall starker Einschränkung der technischen Möglichkeiten zum flexiblen Betrieb bei hoher Auslastung der Mühlen Abbildung 10.1 nur äußerst geringe Möglichkeiten zur Kostenreduktion von -2 % verbleiben. In der erneuten Untersuchung mit einem im Modell erhöhten Maß an zeitlicher Flexibilität zum Nachholen von Produktionszeiten wird die sehr starke Einschränkung der wirtschaftlichen Vorteile bei hoher Auslastung als Ergebnis mit -2 % bestätigt (Tabelle 10.2, Referenzjahr 2). Die höhere Flexibilität erlaubt eine etwas weitere Reduktion im angenommenen Kostenindex von -11 % bei geringerer Auslastung der Produktionskapazitäten (Tabelle 10.2, Referenzjahr 1).

Im Vergleich zum Referenzjahr 1 steigen in beiden Strompreisszenarien für 2030 die Kostenindizes für den flexiblen Anteil in den Stromkosten (+90 %, +210 %) deutlich an und hiernach auch die absoluten Beträge für die Reduktion in den Kostenindizes durch flexiblen Betrieb. Es zeigt sich jedoch bei ähnlich breiter Verteilung im Strompreisszenario 1 kein positiver Effekt auf die relative Reduktion im Kostenindex. Lediglich bei deutlich breiterer Verteilung im Kostenindex (Abbildung 10.6) mit äußerst extremen Einzelwerten im Strompreisszenario 2 ergibt sich eine größere relative Einsparung von -16 % in Bezug auf den Kostenindex für den Anteil der variablen Stromkosten.

Tabelle 10.2: Änderung der jährlichen Kostenindizes durch flexiblen Betrieb der Zementmühlen nach Anforderungsprofil 2

	Zeitliche Auslastung der Zementmühlen	Kostenindex im Referenzbetrieb (ohne zusätzliche Flexibilität) in €/a	Reduktion im Kostenindex, absolut in €/a	Reduktion im Kostenindex, relativ
Referenzjahr 1	63 %	1.330.000	-141.000	-11 %
Referenzjahr 2	84 %	1.756.000	-43.000	-2 %
im Vergleich zu Referenzjahr 1				
Strompreisszenario 1	62 %	2.538.000, +90 %	-232.000	-9 %
Strompreisszenario 2	61 %	4.126.000, +210 %	-643.000	-16 %

Insgesamt zeigen die Ergebnisse allerdings, dass nur begrenzte wirtschaftliche Einsparpotentiale entstehen, auch bei erstens extremen Änderungen in der Verteilung der variablen Anteile in den Stromkosten und zweitens verhältnismäßig geringer Auslastung der Produktionskapazitäten. Erst wenn die wirtschaftlichen Vorteile deutlich über dem zusätzlichen Aufwand für die Bereitstellung der Flexibilität liegen und wenn der zusätzliche organisatorische und personelle Aufwand kompensiert werden kann, ergeben sich wirtschaftlich sinnvolle Potentiale zur Nutzung der Flexibilität beim Zementmühlenbetrieb.

Gezielte Investitionen zur Erhöhung der Silo- und Mühlenkapazitäten eines Zementwerks scheinen deshalb zunächst nur aus anderem Grund möglich. Die in den Experteninterviews abgefragten Kosten für den Neubau eines größeren Silos belaufen sich auf etwa 10 Mio. €. Nach Berücksichtigung der zusätzlichen Betriebskosten scheint eine Amortisation erst nach sehr vielen Jahren möglich. Für eine Investition in zusätzliche Mühlenkapazität müssten höhere Kosten (Kapitel 10.6.5) und Zeiten zur Amortisation angesetzt werden. Gleichzeitig droht eine zusätzliche Kostenbelastung durch insgesamt steigende Strompreise finanzielle Mittel für Investitionen durch Unternehmen in steigenden Produktionskosten zu binden. Der wirtschaftliche Vorteil einer Erhöhung der Mühlenkapazität zur Steigerung der Flexibilität bleibt auch im Hinblick auf das voraussichtlich äußerst seltene Wetterphänomen Dunkelflaute (Anforderungsprofil 3, Kapitel 10.3.2) fraglich. Eine geringfügige Steigerung der Mühlenproduktionsleistung bestehender Anlagen um 3 bis 5 % lässt sich unter Umständen

durch verfahrenstechnische Maßnahmen wie Anpassung der Kugelmühlengattung realisieren. Diese Maßnahme weist allerdings im Hinblick auf die Steigerung flexibler Regelenergie ein vernachlässigbares Optimierungspotential auf.

Die Möglichkeit zur Nutzung der Flexibilität bei der Zementmahlung in der Praxis wird stark von standortspezifischen Gegebenheiten abhängen. Insbesondere die nach Produktionskapazität und Produktnachfrage schwankende Auslastung der Kapazitäten bei der Zementmahlung und -lagerung in Silos, aufwendige organisatorische Voraussetzungen, zusätzlicher Bedarf an qualifiziertem Personal und die stark begrenzte Wirtschaftlichkeit für die Nutzung zusätzlicher Flexibilitätspotenziale sind einschränkend zu berücksichtigen.

10.6 Flexibilisierungspotentiale der separaten Feinstmahlung

Bei der konventionellen Mahlung wird das gesamte Produkt in einer Mahlanlage beansprucht und klassiert, sodass eine gezielte Beeinflussung des Feinanteils der Korngrößenverteilung nur sehr bedingt möglich ist. Die in Deutschland überwiegend eingesetzten Kugelmühlen produzieren zwar in der Regel gewünschte Kornbänder, weisen aber eine geringe Energieeffizienz auf. Bei der separaten Feinstmahlung werden hocheffiziente Zerkleinerungsverfahren (hier Gutbett-Walzenmühle) genutzt, um ein Vorprodukt herzustellen. Diese Vorprodukte werden anteilig in einer oder mehreren kleinen Feinstmühlen (hier: Rührwerkskugelmühlen) nachzerkleinert. Durch die separate Feinstmahlung kann der spezifische Energiebedarf der Zementmahlung reduziert werden, ohne die Zementeigenschaften negativ zu beeinflussen [7]. Um eine Vergleichbarkeit hinsichtlich Eigenschaften der Zemente zu erreichen, ist es maßgebend, dass die entstehenden Zemente zumindest ähnliche Korngrößenverteilungen aufweisen. Um dieses zu erreichen, ist es nötig mit 10-30 % eines Klinkermehles bei einer typischen Feinheit von 4000 cm²/g nach Blaine in die Mischung zu gehen. Nachfolgend wird der Einfluss der separaten Feinstmahlung auf die Flexibilisierung der Zementmahlung exemplarisch dargestellt.

10.6.1 Vorzerkleinerung in der Gutbett-Walzenmühle

Für die energetisch effiziente Mahlung von Zementen kommen heute hauptsächlich zwei unterschiedliche Mühlentypen zum Einsatz. Diese beiden Mühlentypen sind die Vertikalwälmühle und die Gutbett-Walzenmühle. Im Rahmen dieses Projektes wurde das System Gutbett-Walzenmühle für die Mahlung des gröberen Anteiles favorisiert, da sich in der Praxis gezeigt hat, dass dieses Mahlsystem insbesondere bei dem hier geforderten Produkt sehr effizient arbeitet. In Abbildung 10.8 ist das vereinfachte Fließbild einer Fertigmahlanlage mit Gutbett-Walzenmühle dargestellt wie es vielfach in der Zement- und Mineralindustrie heute eingesetzt wird.

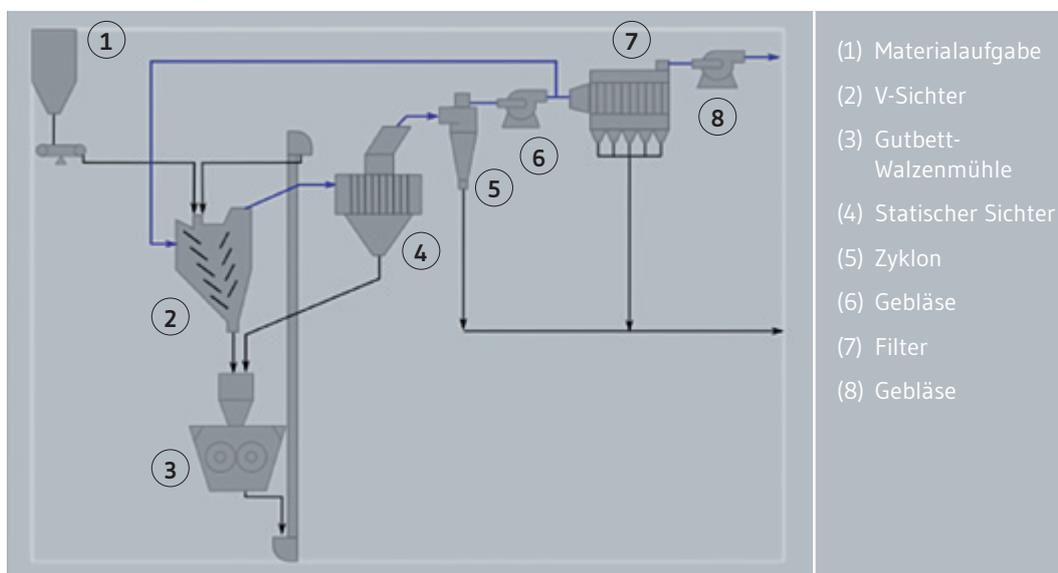


Abb. 10.8: Vereinfachtes Fließbild einer Fertigmahlanlage mit Gutbett-Walzenmühle

Im nötigen Feinheitsbereich hat sich gezeigt, dass Gutbett-Walzenmühlen mit sehr hohen Umfangsgeschwindigkeiten betrieben werden können und damit die Investition je Tonne und Stunde Produkt niedriger ausfällt. Auch kann bei einem solch niedrigen Feinheitswert der Einfluss des spezifischen Energiebedarfs der Sichttechnik reduziert werden, da die Umläufe der Anlage verhältnismäßig niedrig sind. Diese Faktoren führen dazu, dass mit einem Gutbett-Walzenmühlensystem der geringste spezifische Energiebedarf zu erwarten ist.

Die nötige Produktionsleistung wurde für diesen Fall mit 35 t/h ermittelt und orientiert sich damit an der Kugelmühle, die substituiert wird. Als Basisdaten für die Ausarbeitung eines solchen Mahlkreislaufes wurde eine Mahlbarkeit aus der bestehenden Anlage abgeleitet und mit 23,5 kWh/t bei 3000 cm²/g nach Blaine festgelegt.

Die Anlage besteht aus mindestens zwei Frischgutbunkern mit Bandwaagen zur Dosierung von Klinker und Gips. Dieses Frischgut wird über Gurtbandförderer dem Mahl-Sichtkreislauf aufgegeben und vermahlen. Dabei wird Material in der Gutbett-Walzenmühle zerkleinert und anschließend einem meist statischen Sichter aufgegeben und in einem ersten Schritt in sehr grobes Material und fein bzw. mittelfeines Material getrennt. In einem zweiten Sichtschrift wird das in Luft dispergierte Fein- und Mittelfeingut dem dynamischen Sichter aufgegeben und auf Produktfeinheit gesichtet. Um die zu realisierende Leistung von 35 t/h unter der Festlegung einer Mahlbarkeit ermahlen zu können, ist im Folgenden die Anlage technisch spezifiziert:

- Produktionsleistung: 35 t/h CEM I
- Produktfeinheit: 4000 cm²/g nach Blaine

Gutbett-Walzenmühle

- $P_{\text{Mühle}} = 620 \text{ kW}$, installierte Motoren 2x 350 kW
- $P_{\text{Ventilator}} = \text{ca. } 148 \text{ kW}$ (Hauptventilator)
- $P_{\text{Ventilator}} = \text{ca. } 15 \text{ kW}$ (Entstaubung)
- $P_{\text{Nebenaggregate}} \approx 120 \text{ kW}$

Aus den gegebenen technischen Details lässt sich ein spezifischer Energiebedarf der gesamten Anlage von ca. 25 kWh/t bei einer Feinheit von 4000 cm²/g abschätzen. Die ist ein recht niedriger Wert und unterstreicht damit die Effizienz der Gutbett-Walzenmühle.

10.6.2 Anteilige Feinstmahlung in der Rührwerkskugelmühle

Rührwerkskugelmühlen werden in verschiedenen Bauformen für die Feinstmahlung von mineralischen Materialien genutzt. Oft wird dieser Mühlentyp mit einer Suspension beschickt und dementsprechend nass betrieben, es sind jedoch auch trocken betriebene Bauarten am Markt verfügbar. Hierbei sind Rührwerkskugelmühlen mit stehenden Mahlkörpern (vertikal) und liegender Mahlkammer (horizontal) zu unterscheiden (Abbildung 10.9). Trocken betriebene Rührwerkskugelmühlen arbeiten mit kleinen Mahlkörpern (etwa 6 mm), diese werden durch einen Rotor im Mühlenrohr

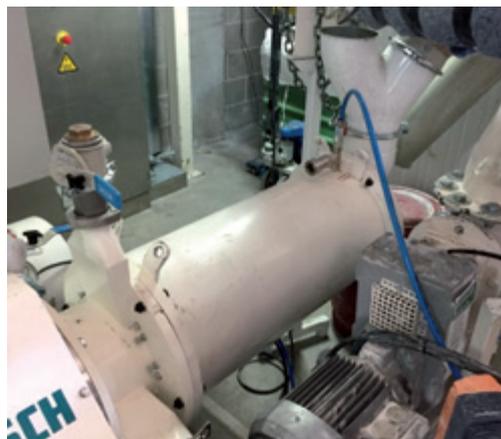


Abb. 10.9: Horizontale Rührwerkskugelmühle der Fa. Netzsch.

beschleunigt. Dies führt zu einer Beanspruchung mit hoher Intensität, was die Herstellung feinsten Partikel ermöglicht.

Rührwerkskugelmühlen werden in seltenen Fällen für Spezialanwendungen in der Zementindustrie eingesetzt. Im Wesentlichen bestehen zwischen dem Anlagendesign von klassischen Kugelmühlen, wie in der Zementproduktion häufig eingesetzt, und dem Anlagendesign von Rührwerkskugelmühlen (Abbildung 10.8) keine Unterschiede. Wie in Abbildung 10.10 dargestellt, kann die Rührwerkskugelmühle im geschlossenen Kreislauf mit einem Sichter betrieben werden.

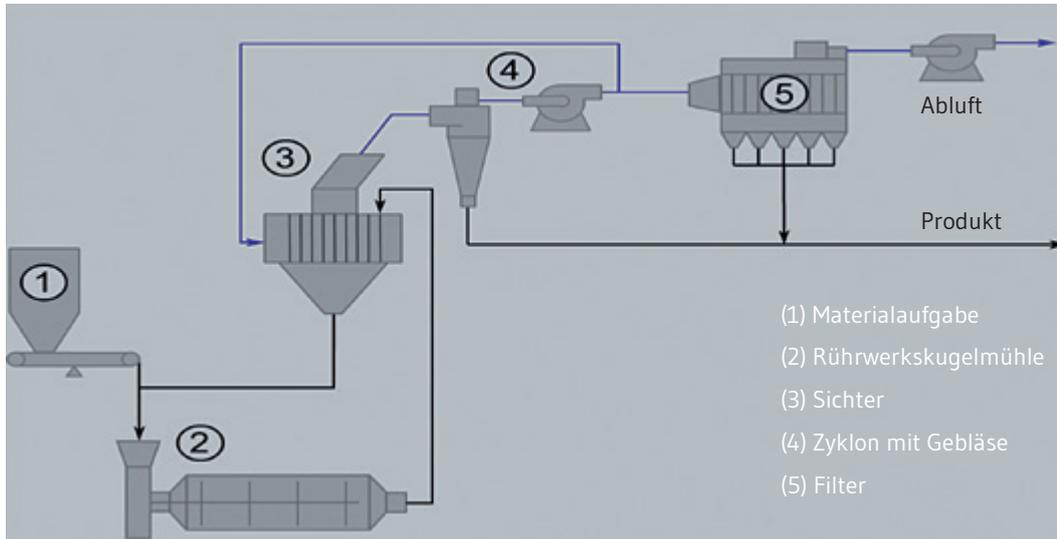


Abb. 10.10: Anlagenschaltung einer Rührwerkskugelmühle

10.6.3 Machbarkeitsstudie

Das Modell wurde zur Beurteilung des Lastflexibilisierungspotentials bei Einsatz der separaten Feinstmahlung genutzt. Es wurde exemplarisch der Mühlenbetrieb im ersten Referenzjahr und ersten Referenzwerk untersucht. Im Rahmen einer Parametervariation wurde nun der Einfluss einer unterschiedlichen Anzahl von Rührwerkskugelmühlen zur Feinstmahlung von insgesamt drei Zementprodukten auf das Gesamtergebnis der verfügbaren Regelenergie sprich dem Lastflexibilisierungspotential analysiert. Die Rührwerkskugelmühlen substituieren einen Teil der Kugelmühlenproduktion der Zementmühlen 1 und 2 sowie die Produktion in Zementmühle 3 im ersten Referenzwerk. In der vorgeschalteten Gutbett-Walzenmühle wird für die drei Zemente ein Vorprodukt produziert, welches in Zwischensilos gelagert werden kann. Der Betrieb der Gutbett-Walzenmühle erfolgt dabei kontinuierlich und ist somit nicht in die Lastflexibilisierung der anderen Zementmühlen eingebunden. Eine Limitierung für den Betrieb der Gutbett-Walzenmühle stellen hierbei lediglich die maximalen und minimalen Silofüllstände in den Zwischensilos dar. In Tabelle 10.3 sind die wesentlichen Kennzahlen der Gutbett-Walzenmühle sowie der Rührwerkskugelmühlen zur separaten Feinstmahlung zusammengefasst.

Tabelle 10.3: Kennzahlen der Gutbett-Walzenmühlen und Rührwerkskugelmühlenproduktion* Berechnungen zur Abschätzung der Anteile im Gesamtprodukt basieren auf den Korngrößenverteilungen. Trotz niedriger spezifischer Oberfläche reichen geringe Anteile dieser Korngrößenverteilung aus, um die Referenzprodukte nachzubilden.

		Gutbett-Walzenmühle	Rührwerkskugelmühle
Produktionsleistung	t/h	35 (CEM I)	8
Produktfeinheit	cm ² /g	3500	5000*
Spezifischer Energiebedarf	kWh/t	25,8	73

In Abbildung 10.11 ist die resultierende Regelenergie bei Einsatz einer unterschiedlichen Anzahl von Rührwerkskugelmühlen zur flexiblen Feinstmahlung dargestellt. Im Modell werden die Rührwerkskugelmühlen analog zum Kugelmühlenbetrieb entsprechend eines maximalen Energiepreislimits betrieben.

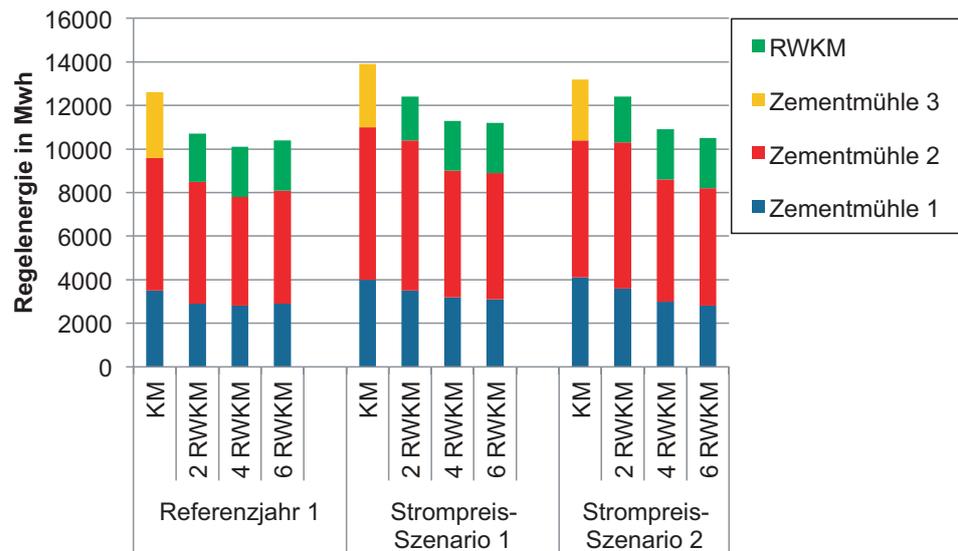


Abb. 10.11: Vergleich der verfügbaren positiven Regelenergie der Zementmühlen bei Einsatz von Rührwerkskugelmühlen gegenüber einer Mahlung in Kugelmühlen

Abbildung 10.11 zeigt die Entwicklung der ermittelten positiven Regelenergie für den Fall einer Mahlung in Kugelmühlen im Vergleich mit der Substitution einer Kugelmühle durch eine unterschiedliche Anzahl von Rührwerkskugelmühlen. Es zeigt sich, dass das Lastflexibilisierungspotential als Summe aus allen Zementmühlen bei Einsatz von Rührwerkskugelmühlen verringert wird, da nur ein geringer produktspezifischer Anteil auf den Rührwerkskugelmühlen gemahlen wird.

10.6.4 Technische Hemmnisse zur Flexibilisierung durch separate Feinstmahlung

Bei der Investition in eine neue Mahltechnologie müssen die Produktqualität, die Zuverlässigkeit und die Handhabbarkeit des neuen Systems sichergestellt werden. Die separate Feinstmahlung von Zementen mit Klinker als einzigem Hauptbestandteil (CEM I-Zemente) beeinflusst die Zementqualität nicht, wenn die Korngrößenverteilung des Produktes möglichst identisch mit der Korngrößenverteilung der bekannten Produkte ist. Die Anteile weiterer Hauptbestandteile, wie Hüttensand oder Kalkstein, können durch die separate Feinstmahlung gesteuert werden, was sich auf die Zement-eigenschaften auswirken kann. Dies ist Gegenstand aktueller Forschung. Die Implementierung der Rührwerkskugelmühle in die Zementmahlung und deren Zuverlässigkeit in der Prozesskette muss dargestellt werden. In anderen Industriezweigen sind jedoch Erfahrungen mit dem Betrieb von vor allem nass betriebenen Rührwerkskugelmühlen vorhanden, die deren Zuverlässigkeit bestätigen können. Mehrstufige Mahlverfahren erfordern immer einen größeren organisatorischen Aufwand, der eine höhere Qualifizierung des Personals erfordert. Hierzu sind jedoch gute Erfahrungen mit vorgeschalteten Gutbett-Walzenmühlen (z.B. Kombi-Mahlanlagen) vorhanden. Durch separate Feinstmahlung und gezielte Adaption der Feinstanteile können die Zement-eigenschaften gesteuert werden. Dies ist ebenfalls noch Gegenstand aktueller Forschung.

Neben den praktischen Anforderungen an die neue Mahlanlage, muss deren Implementierung auch einer wirtschaftlichen Betrachtung standhalten können. Die Beschaffung von Neuanlagen muss explizit geprüft und bewertet werden. Neben den Transportanlagen muss auch die Anpassung vorhandener Mahl-, Sicht- und Siloanlagen untersucht werden. Da das Vormahlaggregat den höchsten Anteil am CAPEX trägt, eignen sich Zementwerke, die bereits über ein derartiges Aggregat verfügen aus ökonomischer Sicht am besten für die separate Feinstmahlung. Aber auch vorhandene Kugelmühlen müssen hinsichtlich ihrer Eignung als Feinstmahlanlage untersucht und bewertet werden. Die höhere Anzahl an An- und Abschaltvorgängen kann, besonders beim Feinstmahlaggregat, höheren Verschleiß verursachen und so den OPEX erhöhen. Dies ist gesondert zu untersuchen.

Durch die Substitution von Kugelmühlen durch die separate Feinstmahlung kann der spezifische elektrische Energiebedarf bei der Zementmahlung sinken. Das Flexibilisierungspotential kann dadurch, bei entsprechender Auslastung, jedoch reduziert werden. Es sind jedoch auch Feinstmahlanlagen am Markt verfügbar, die wesentlich höhere Energiebedarfe als Rührwerkskugelmühlen

aufweisen. Auch die Verschiebung der Zerkleinerungsarbeit von der Vormahlung auf die Feinstmahlung ist denkbar. So kann in der Vorzerkleinerung möglicherweise ein gröberes Produkt hergestellt werden, um mehr Arbeit in der Feinstmühle leisten zu müssen. Für die Industrie muss dabei die Zukunftssicherheit für derartige Investitionen gewährleistet sein, um nachhaltige Investitionsentscheidungen zu treffen.

10.6.5 Wirtschaftliche Betrachtung

Die Investitionskosten einer Gutbett-Walzenmühle können in weiten Grenzen variieren. Örtliche Einschränkungen durch beispielsweise bestehende Gebäude, spezielle Anforderungen und die Fundamente durch Bodenbeschaffenheiten etc. sind unter Anderem Einflussfaktoren. Überschlägig kann für eine solche Anlage in schlüsselfertiger Bauweise ein Betrag von circa 15 Mio. Euro (+/- 10 %) in Deutschland bei der Integration in eine Bestandsanlage abgeschätzt werden.

Tabelle 10.4: Gegenüberstellung der Mahlanlagen

	Kapazität t/h	Feinheit in cm ² /g nach Blaine	spezifischer Energieverbrauch kWh/t	Instandhaltungs- kosten T€ pro Jahr incl. Verschleißteile (geschätzt)	Investitions- kosten für Neuanlage in Mio. €
Kugelmühle	42	5000	51	ca. 250	Bestandsanlage
Gutbett-Walzenmühle	35	4000	29,2	ca. 250	ca. 15
Rührwerkskugelmühle	9	9000	72	ca. 25	ca. 1,8

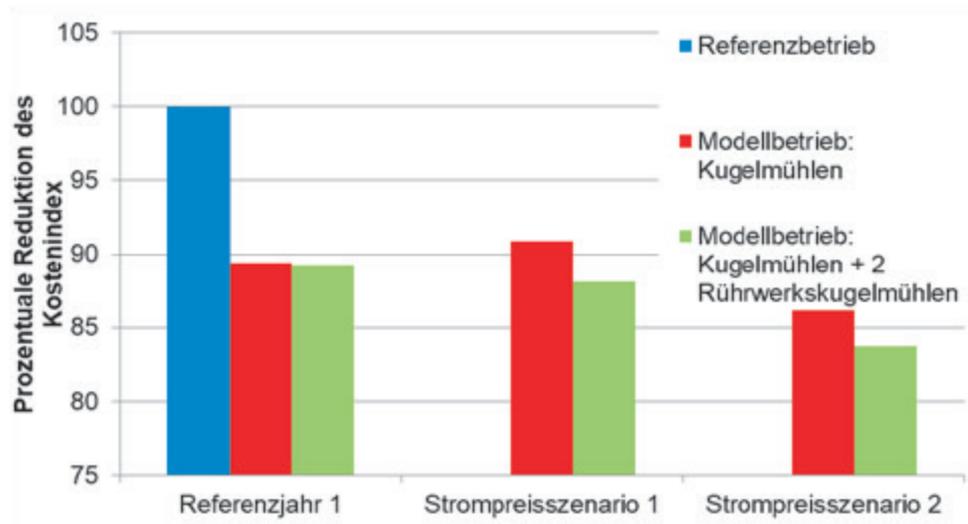
Zur Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der Produktionsanlage mit zwei Mahlkreisläufen müssen neben dem Gesamtinvestitionsbetrag auch die laufenden Kosten der neuen Mahlanlagen mit einer konventionellen Mahlanlage, in diesem Fall einer bestehenden Kugelmühle, verglichen werden. Zu den Betriebskosten zählen primär die Stromkosten aber auch Kosten für Wartung und Instandhaltung. Tabelle 10.4 zeigt hierbei eine Gegenüberstellung der eingesetzten Mahlanlagen.

Die angegebenen spezifischen Energieverbräuche für die Kugelmühle und auch die Gutbett-Walzenmühle gelten für die gesamte Zerkleinerung, da das aufgegebene Frischgut nicht vorzerkleinert ist. Bei der Rührwerksmühle hingegen wird der Mühle ein bereits vorgemahlenes Material (das Fertiggut der Gutbett-Walzenmühle) aufgegeben und weiter auf die benötigte Zielfeinheit zerkleinert. Um den gesamten Energieaufwand korrekt zu erfassen, muss daher neben dem Energieeinsatz der Rührwerkskugelmühle auch der der Gutbett-Walzenmühle mitbetrachtet werden. Der daraus resultierende spezifische Energiebedarf beläuft sich auf 101,2 kWh/t bei einer Feinheit von ca. 9000 cm²/g nach Blaine.

Bei einem angesetzten Mischungsverhältnis von 80 % Zement von dem Gutbett-Walzenmühlenkreislauf und 20 % Zement vom Rührwerkskugelmühlenkreislauf ergibt sich ein spezifischer Energiebedarf von 43,6 kWh/t, was einer Einsparung gegenüber der konventionellen Mahlung mit Kugelmühle von ca. 7,4 kWh/t entspricht. Bei einer angenommenen Jahresproduktion im nicht flexibilisierten Betrieb bei ca. 300.000 t Zement ergibt sich daraus eine theoretische Einsparung von 2.220 MWh an Energie. Bei einem angenommenen Energiepreis von 7 Eurocent/kWh ergibt sich ein theoretisches Einsparungspotential von ca. 150. T€. Neben den Energiekosten spielen auch die Instandhaltungskosten eine wichtige Rolle bei der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung. Diese belaufen sich bei der separaten Feinstmahlung auf ca. 275 T€ gegenüber 250 T€ bei der konventionellen Kugelmühlenmahlung. Daraus ergibt sich ein bereinigtes Einsparungspotential von ca. 125 T€.

Abbildung 10.12 zeigt nun die relative Kostenreduktion des Modellmühlenbetrieb im Vergleich mit dem Referenzmühlenbetrieb in Abhängigkeit des zugrunde liegenden Börsenstrompreisszenarios für maximal zwei Rührwerkskugelmühlen. Es stellt sich heraus, dass die relative Kostenreduktion jeweils in einer vergleichbaren Größenordnung für unterschiedliche Energiepreisszenarien bei Substitution einer Kugelmühle durch zwei Rührwerkskugelmühlen liegt. Für das Konzept der separaten Feinstmahlung ergibt sich jedoch in Abhängigkeit des Szenarios eine Kostenreduktion von maximal

Abb. 10.12: Prozentuale Kostenreduktion des Modellmühlenbetriebs mit Kugelmühlen sowie mit Kugelmühlen und 2 Rührwerkskugelmühlen basierend auf den unterschiedlichen Kostenindizes



4% (bei 2 Rührwerkskugelmühlen sowie Strompreisszenario 2 für das Jahr 2030) gegenüber dem Kugelmühlenbetrieb im Modell, da drei Zementprodukte energieeffizienter produziert werden können.

Schwieriger gestaltet sich die Einordnung der Amortisationsdauer da einer bestehenden Anlage eine komplett neue Anlage gegenübergestellt wird. Die aufzuwendenden 16,8 Mio. € wären bei einem Einsparungspotential von nur 125 T€ wirtschaftlich nicht zu rechtfertigen. Vielmehr muss hier der Vergleich mit einer Neuanlage bzw. der eingesparten Menge an CO₂ erfolgen.

Neben einer Verringerung der Strombezugskosten können durch die Flexibilisierung des Mühlenbetriebs mit Kugelmühlen und auch mit Rührwerkskugelmühlen indirekt gleichzeitig CO₂-Emissionen reduziert werden. Dies ist auf den zeitlich veränderten Strombezug und die damit verbundene Zunahme des regenerativen Erzeugungsanteils bei der Strombeschaffung zurückzuführen. Die zusätzlichen Informationen zur CO₂-Intensität des genutzten Strommixes für Strompreisszenario 1 [8] ermöglichen jedoch keine direkte Gegenüberstellung zu einem Referenzmühlenbetrieb für das Jahr 2030. Die abschätzbare Reduktion weist hierbei jedoch in Bezug auf die gesamten CO₂-Emissionen eines Zementwerks mit Klinkerproduktion geringe Senkungspotentiale auf.

10.7 Fazit

Die Ergebnisse für die beiden betrachteten Zementwerke für eine kurz- und mittelfristige Flexibilisierung des Zementmühlenbetriebs nach Anforderungsprofil 1 und 2 zeigen die bereits beschriebene starke Abhängigkeit des Lastflexibilisierungspotentials von der Mühlenauslastung. Der ermittelte Regelenergieanteil (flexible Energie in Bezug auf den jährlichen Energiebedarf) entsprechend Anforderungsprofil 2 liegt im ersten Referenzwerk für die größte Mühle zwischen 22 % und bei 5 % bei gesteigerter Mühlenauslastung im zweiten Referenzjahr. Im zweiten Referenzwerk liegt der Regelenergieanteil zwischen 16 % und 31 % in Abhängigkeit des Referenzjahrs. Insgesamt weist das zweite Referenzwerk trotz anderer Werksstruktur bezüglich der Zementmühlen, -silos und -sorten gegenüber dem ersten Referenzwerk ein in der Größenordnung vergleichbares Lastflexibilisierungspotential auf.

Hinsichtlich der Flexibilität für lange Zeiträume nach Anforderungsprofil 3 deuten die Modellergebnisse auf ein Potential zur Lastflexibilisierung über einen Zeitraum von einem Tag hin, welches jedoch für längere Zeiträumen zwischen 2 und 5 Tagen bei unveränderter Silo- und Mühlenkapazität eingeschränkt ist. Die Parameterstudie zur Anpassung der Silo- und Mühlenkapazität zeigt, dass die Erhöhung der Mühlenkapazität einen größeren Stellhebel hinsichtlich einer positiven Regelenergiebereitstellung durch Lastreduktion bei 1 bis 2 Tagen aufweist. Eine Erhöhung der Mühlenkapazität weist im Vergleich zur Erhöhung der Silokapazität insgesamt ein größeres Potential zur Lastflexibilisierung auf. Die hohen Investitionskosten zur Erhöhung der Mühlen- oder Silokapazität stellen hierbei jedoch einen wirtschaftlich limitierenden Faktor dar.

Die Implementierung der separaten Feinstmahlung zeigt eine Reduktion des Lastflexibilisierungspotentials bzw. der verfügbaren Regelenergie zwischen 15 % und 19 % in Abhängigkeit des Strompreisszenarios in der vorliegenden Anlagenkonfiguration mit zwei Rührwerkskugelmühlen. Der Anteil flexibel einsetzbarer Energie verringert sich insgesamt aufgrund der Substitution einer Kugelmühle durch eine Gutbett-Walzenmühle und einzelner Rührwerkskugelmühlen, welche neben den Kugelmühlen zur Lastflexibilisierung eingesetzt werden. Die Gutbett-Walzenmühle wird jedoch nicht entsprechend eines Strompreislimits betrieben und weist somit kein Potential zur Flexibilisierung auf. Das Potential der Rührwerkskugelmühlen zur Lastflexibilisierung ist zudem eingeschränkt aufgrund des produktspezifischen und geringen Anteils zwischen 10 % und 30 % des Produkts, das bei der Feinstmahlung eingesetzt werden kann. Insgesamt deutet die Implementierung des Konzepts zwar auf eine deutliche Reduktion der Energiekosten hin, diese amortisieren sich allerdings erst nach vielen Jahren in Abhängigkeit des Kostenindex.

Für Strompreisszenarien 1 und 2 zum flexiblen Stromeinsatz zeigt sich, dass durch die separate Feinstmahlung eine Reduktion des spezifischen Energiebedarfs von bis zu etwa 15 % im Vergleich zu der substituierten Kugelmühle möglich wäre. Im Modell konnte bei flexibler Fahrweise und abhängig vom genutzten Kostenindex für den variablen Stromkostenanteil eine Reduktion zwischen 11-16 % (Abbildung 10.12) bei Einsatz von zwei Rührwerkskugelmühlen bestimmt werden. Letztendlich lässt sich jedoch schlussfolgern, die separate Feinstmahlung wird erst ökonomisch vertretbar, wenn die sehr hohen Investitionskosten sinken. Unter Umständen könnte die Nutzung bereits vorhandener Mahlanlagen eine separate Feinstmahlung ermöglichen.

10.8 Glossar

Strompreislimit: Dieser variable Strompreis in Abhängigkeit des gewählten Strompreispercentils je Referenzjahr und in Abhängigkeit des Berechnungszeitraums stellt das maximale Strompreislimit für einen kostenoptimierten Mühlenbetrieb dar.

Kostenindex: Der Kostenindex beschreibt den variablen Stromkostenanteil. Er basiert auf Börsenstrompreisen in €/MWh. Für die tatsächliche Nutzung von elektrischer Energie im Zementwerk ist eine andere Kostenstruktur zu berücksichtigen.

Regelenergie: Der Begriff fasst alle Lastanpassungen nach den ausgewerteten Anforderungsprofilen im Jahresverlauf zusammen [2].

10.9 Literatur

- [1] RUPPERT, J. und K. TREIBER, Hg., 2018. Flexibilitätsoptionen in der Grundstoffindustrie : Methodik, Potenziale, Hemmnisse. Flexibilitätspotentiale und –perspektiven in der Roh- und Zementmahlung [online]. Verfügbar unter: <https://www.vdz-online.de/forschung/aktuelle-projekte/synergie/>
- [2] RUPPERT, J., S. RÖSCH und K. TREIBER, 2019. Energieflexibilität der deutschen Industrie. Einschätzung des Flexibilitätspotentials bei der Zementmahlung.
- [3] AUSFELDER, F., S.v. ROON und A. SEITZ, 2018. *Flexibilitätsoptionen in der Grundstoffindustrie : Methodik, Potenziale, Hemmnisse. Charakteristische Energiewirtschaftliche Situationen für die Bereitstellung von Flexibilität* [online]. Verfügbar unter: <https://www.vdz-online.de/forschung/aktuelle-projekte/synergie/>
- [4] EPEX-SPOT SE, Hg. Marktdaten der EPEX-Spot SE. ftp-Server der EPEX-Spot SE, Leipzig [online]. Verfügbar unter: <ftp://ftp.epexspot.com/>
- [5] SAMWEBER, F., S. KÖPPL und ET AL, 2017. *Projekt MONA 2030: Bewertung Netzoptimierender Maßnahmen gemäß technischer, ökonomischer, ökologischer, gesellschaftlicher und rechtlicher Kriterien. Teilbericht Einsatzreihenfolgen*. Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V. (fE). München
- [6] ÖKO-INSTITUT, 01/2015. Klimaschutzszenario 2050 - 2. Endbericht [online]. Öko-Institut. Berlin. Verfügbar unter: <https://www.oeko.de/publikationen/p-details/klimaschutzszenario-2050-2-endbericht/>
- [7] TREIBER, K. und P. FLEIGER, 2019. Steigerung der Energieeffizienz und Verbesserung der Zementeigenschaften durch separate Feinstmahlung. Verein Deutscher Zementwerke e.V. Cement International.
- [8] BÖING, F., A. MURMANN, C. PELLINGER und BRUCKMEIER ANDREAS. ISAAr Integriertes Simulationsmodell zur Anlageneinsatz- und Ausbauplanung mit Regionalisierung [Software]. Verfügbar unter: <https://www.ffe.de/die-methoden/modelle/625-isaar-integriertes-simulationsmodell>

11 PROZESSDAMPFBEREITSTELLUNG IN INTEGRIERTEN VERBUNDSTANDORTEN

Verantwortliche Autoren

Florian Ausfelder florian.ausfelder@dechema.de
DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V., Theodor-Heuss-Allee 25,
60486 Frankfurt am Main

Thomas Bayer thomas.bayer@Infraserv.com
Infraserv GmbH & Co. Höchst KG, Industriepark Höchst, 65926 Frankfurt am Main

Hanna Ewa Dura hanna.dura@dechema.de
DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V., Theodor-Heuss-Allee 25,
60486 Frankfurt am Main

Tobias Fischer tobias.fischer@Infraserv.com
Infraserv GmbH & Co. Höchst KG, Industriepark Höchst, 65926 Frankfurt am Main

Michael Frank michael.frank@Infraserv.com
Infraserv GmbH & Co. Höchst KG, Industriepark Höchst, 65926 Frankfurt am Main

11.1 Einleitung

Der zunehmende Ausbau erneuerbarer Stromerzeugung, hauptsächlich durch fluktuierende und intermittierende Photovoltaik und Windkraft, sowohl on-shore als auch off-shore, führt absehbar zu einer fundamental neuen Herausforderung für das Stromnetz. Im Gegensatz zu der vergangenen Situation, in der der jeweilige Bedarf nachfrageorientiert durch konventionelle thermische Kraftwerke gedeckt wurde, ist das Dargebot an erneuerbarem Strom abhängig von meteorologischen Gegebenheiten und ist unabhängig von der jeweiligen Nachfrage.

Mit einem zunehmenden Anteil an fluktuierender und intermittierender Stromerzeugung, wird die Sicherstellung eines stabilen Netzbetriebes, bei dem zu jedem Zeitpunkt Stromangebot und -nachfrage im Gleichgewicht sind, absehbar schwieriger. Einen Beitrag zur Stabilisierung können sogenannte flexible Lasten leisten, also Stromverbraucher, die je nach Situation im Stromnetz unterschiedlich große Lasten abrufen können. Wenn sie weniger als normal abrufen, ist der Effekt der reduzierten Nachfrage aus Sicht des Stromnetzes identisch mit dem einer erhöhten Erzeugung, also dem zuschalten eines thermischen Kraftwerks. Umgekehrt kann ein erhöhter Lastabruf, also eine Erhöhung der Nachfrage, ein vorhandenes Dargebot über den normalen Bedarf hinaus kompensieren.

Diese Funktionen werden auch in einem konventionell betriebenen System benötigt, allerdings in deutlich geringerem Umfang. So erfüllen aktuell z.B. Wasserpumpspeicherkraftwerke diese Aufgabe. In Zeiten eines hohen Dargebots an Strom und niedrigen Strompreisen wird Wasser vom Unterbecken in das Oberbecken gepumpt. In Zeiten einer hohen Nachfrage wird das Wasser durch die Turbinen zurück in das Unterbecken geleitet und Strom erzeugt.

In Zukunft können vermehrt Industrieprozesse als flexible Lasten einen Beitrag zur Stabilisierung des Stromnetzes leisten. Neben einzelnen Prozessen können auch hybride Systeme dem Stromnetz

Flexibilität zur Verfügung stellen, die z.B. zwischen elektrischer und gasbasierter Wärmeerzeugung hin- und herschalten können und damit je nach Betriebszustand eine Last im Stromnetz sind oder eben nicht. Darüber hinaus ergeben sich Flexibilitätspotenziale durch die geschickte Kombination verschiedener Elemente, die für sich genommen nicht notwendigerweise ein Flexibilitätspotenzial aufweisen würden. Häufig ergeben sich Flexibilitätspotenziale durch Sektorenkopplung, d.h. das Verschieben von Energie aus einem Sektor (Strom, Wärme, Verkehr) in einen anderen.

Die chemische Industrie ist in Deutschland die Branche mit dem höchsten Energieverbrauch mit einem Anteil von 28,9% des industriellen Energieverbrauchs [1]. Der Strombedarf der chemischen Industrie liegt bei 54 TWh/a. An den Standorten der chemischen Industrie werden Kraft-Wärme gekoppelte Anlagen hauptsächlich zur Wärmebereitstellung betrieben, die rund 17 TWh/a Strom als Eigenerzeugung bereitstellen [2].

Die integrierten Standorte der Chemiebranche eignen sich ganz besonders für Flexibilität durch die Konfiguration verschiedener, sektorübergreifender Energieumwandlungstechnologien, die häufig aus anderen Gründen bereits am Standort vorhanden sind.

Das Anbieten von Flexibilität wiederum ist jedoch kein Selbstzweck. Das Ziel ist eine verbesserte Einbindung von erneuerbarer Stromerzeugung mit dem gewünschten Effekt einer Absenkung von energiebedingten CO₂-Emissionen im Energiesektor. Sektorkopplungstechnologien können einem ähnlichen Ziel dienen, dem erhöhten Eintrag erneuerbarer Energien in Sektoren, die sonst wenige Möglichkeiten zur Reduzierung von Treibhausgasen haben.

Aus Sicht eines Flexibilität anbietenden, muss sich das Anbieten von Flexibilität lohnen und es sollte möglichst ein Beitrag zur Treibhausgasreduzierung erzielt werden. Welche Möglichkeiten sich im Rahmen dieser mehrfachen Zielsetzung, konkret: Flexibilität, Treibhausgasreduzierung und Kosten ergeben, soll im Folgenden für das Beispiel einer idealisierten Energieerzeugungsstruktur eines Chemieparks dargestellt werden.

11.2 Beschreibung des Industrieparks Höchst

Die Untersuchungen wurden an einem typischen größeren Chemiestandort durchgeführt, der sich an die Gegebenheiten des Industrieparks anlehnt. Der Industriepark Höchst ist im gleichnamigen Frankfurter Stadtteil angesiedelt. Ursprünglich für Chemie- und Pharmaproduktion ausgelegt, hat sich der Industriepark in den letzten Jahren immer weiter diversifiziert.

Insgesamt hat der Industriepark mit seinen Anlagen und Prozessen einen Strombedarf, der in etwa dem von 600.000 deutschen Haushalten entspricht; der Wärmebedarf entspricht dem von etwa 250.000 bundesdeutschen Einfamilienhäusern. Davon werden durch Wärmerückgewinnung aus den angeschlossenen Prozessen gut 20 % wieder eingespeist. Dieser Bedarf wird am Standort durch diverse KWK-Anlagen, Elektrodenkessel sowie weitere kleinere Wärmeerzeuger gedeckt.

Während der Austausch von Strom mit dem allgemeinen Stromnetz im Sinne dieser Arbeiten nicht limitiert ist und die Erdgasversorgung als gesichert angenommen werden kann, muss der Wärmebedarf vollständig durch eigene Dampferzeugung am Standort gedeckt werden. Der Betreiber des Industrieparks, die Firma Infraserb GmbH & Co. Höchst KG, kann dabei auf eine Vielzahl von Anlagen zur Strom- und Wärmeerzeugung am Standort zurückgreifen. Der gegenwärtige Erzeugungspark wird ständig angepasst, sodass eine aktuelle Einschätzung des Flexibilitätspotenzials wenig Aussagekraft für die Zukunft hätte.

Es wurde ein Modell entwickelt zur Simulation der Situation im Jahr 2030. In dieser Konfiguration stehen dem modellierten Industriepark mehrere Gas- und Dampf-(GuD)-KWK-Anlagen zur gekoppelten Strom- und Wärmeerzeugung zur Verfügung mit einer elektrischen Leistung von insgesamt ca. 300 MW_{el} und einer maximalen Dampferzeugung von ca. 400 t/h. Die GuD-KWK-Anlagen können zwischen minimaler Teillast (20 %) und maximaler Last (100 %) betrieben werden.

Darüber hinaus stehen Heizkessel mit Erzeugungskapazitäten von ca. 600 t/h für die Dampferzeugung aus Erdgas bereit sowie Elektrodenkessel mit einer Kapazität von 66 t/h. Der Dampfbedarf des Modell-Industrieparks ist einer saisonalen Schwankung unterworfen und variiert zwischen 320 und 460 t/h. Insgesamt gibt es drei Dampfnetze auf den Druckstufen 121, 16 und 4 bar.

Die saisonale Schwankung des Wärmebedarfs im Industriepark führt dazu, dass im Sommerhalbjahr die GuD-Kraftwerke nicht auf Volllast betrieben werden können, da nicht ausreichend Abnehmer für die erzeugte Wärme zur Verfügung stehen. Dies reduziert die Möglichkeiten, in diesem Zeitraum positive Flexibilität anzubieten. Daher wird für die Zwecke dieser Untersuchung beispielhaft auch ein thermischer Speicher im Abgasstrom der Gasturbine angenommen, um die diesen Effekt zu evaluieren.

Der lokale Verkehrsverbund hat die Anschaffung einer Flotte von Wasserstoff-betriebenen Brennstoffzellenzügen beschlossen, um zukünftig Diesel-betriebene Züge auf Strecken zu ersetzen, auf denen sich keine Elektrifizierung lohnt. Diese Züge werden im Industriepark mit Wasserstoff versorgt, der als Nebenprodukt in der vorhandenen Chlor-Alkali-Elektrolyse erzeugt wird. Da die Versorgung der Zugflotte unabhängig vom Betrieb der Chlor-Alkali Elektrolyse sichergestellt werden muss, wird die Installation einer Wasserelektrolyse erwogen, die ausschließlich in jenen Zeiten betrieben wird, in denen die Chlor-Alkali Elektrolyse nicht ausreichend Wasserstoff produzieren kann. Zu allen anderen Zeiten steht die Wasserelektrolyse im Prinzip zur Verfügung um negative Flexibilität anzubieten. Dabei wird von einer gesicherten Abnahme von Wasserstoff ausgegangen.

Diese Konfiguration und die Wechselwirkung mit dem Außenraum ist schematisch in Abbildung 11.1 dargestellt.

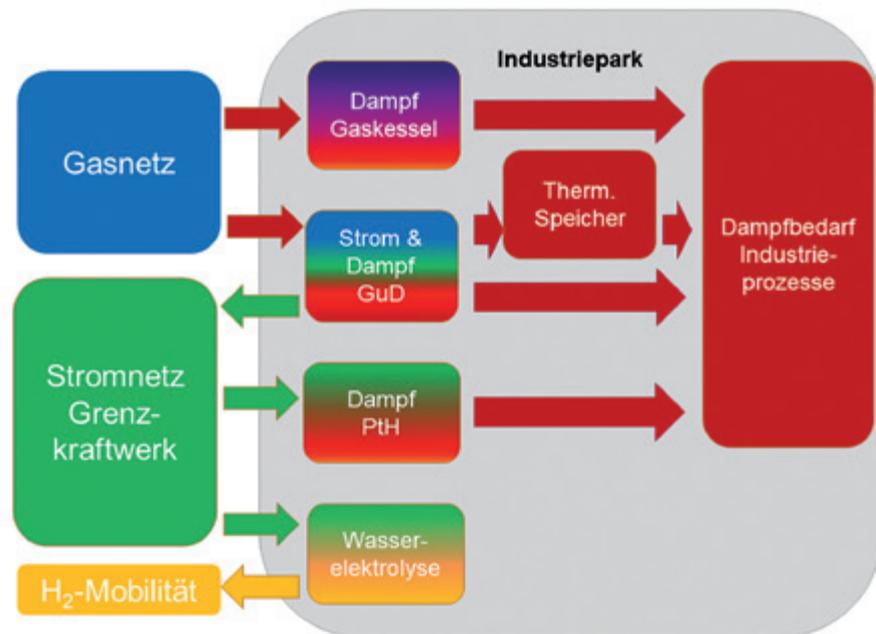


Abb. 11.1: Konfiguration der Wärme- und Stromerzeugung des modellhaften Industrieparks.

11.3 Beschreibung des MONA-Modells

Das Ziel der Modellierung ist eine Abschätzung des Flexibilitätspotenzials bei gleichzeitiger Untersuchung der Betriebskosten und der CO₂-Emissionen. Als Grundlage der Untersuchung dient die stundenscharfe Zeitreihe für das Jahr 2030 des MONA-Projekts für das Standard-Szenario [3].

Das MONA-Modell ist ein Kraftwerkseinsatzmodell. Für einen gegebenen Zeitpunkt wird auf Basis eines gemittelten Wetterjahrs das Dargebot an erneuerbaren Energien errechnet und der Einsatz der konventionellen Kraftwerke simuliert.

Dabei wird in der Iteration ein europäisches Modell unter Berücksichtigung der Kuppelkapazitäten zugrunde gelegt, so dass Import und Export sich aus dieser Iteration ergeben.

In einem zweiten Schritt optimiert das Modell den konventionellen Kraftwerkseinsatz auf nationaler Ebene unter Berücksichtigung von Netzrestriktionen und „must-run“ Kraftwerken. Ein Ausgleich kann über den Einsatz der angenommenen Kapazität von Pumpspeicherkraftwerken erfolgen, da Im-/Export bereits im vorhergehenden Schritt festgelegt wurden.

Durch die Berücksichtigung der Netzrestriktionen sind teilweise auch Kraftwerke im Einsatz, die in der Merit-Order ggfs. hinter dem eigentlichen, preisbildenden Grenzkraftwerk stehen.

Für die Berechnung der Grenzkosten sind Kostenparameter für die Brennstoffe und für CO₂-Emissionszertifikate hinterlegt, vgl. Tabelle 11.1. Das Modell erlaubt keine negativen Preise

Die aus dem Modell entstehende Zeitreihe wird genutzt, um eine stundenscharfe Einsatzplanung der Strom- und Wärmeerzeugung für die Konfiguration des Industrieparks durchzuführen. Dabei wird perfekte Voraussicht angenommen, sodass der Einsatz der Erzeugungseinheiten zu jeder Stunde im Sinne der gewählten Einsatzstrategie optimal ist.

Tabelle 11.1: Annahmen des MONA-Szenarios Standard [3].

Parameter	Einheit	Aktueller Stand 2015	2030 Referenzszenario Standard
CO ₂ -Preise	€/t	7,6	30
Brennstoffpreise			
Rohöl	€/MWh _{th}	35,9	52,4
Erdgas		21,8	28,8
Steinkohle		8,8	9,5
Braunkohle		1,5	1,5

11.4 Beschreibung des Datensatzes Standard

Auf Basis des im vorherigen Abschnitt dargestellten Modells steht eine Zeitreihe „Standard“ für das Jahr 2030 zur Verfügung. Die Zeitreihe hat eine stündliche Auflösung und umfasst die Erzeugung der erneuerbaren Energien, den Einsatz konventioneller Kraftwerke, Import und Export von Strom sowie den Einsatz von Wasserpumpspeicherkraftwerken, entweder im Pumpbetrieb oder im Turbinenbetrieb. Darüber hinaus wird der jeweilige Grenzkraftwerkstyp (Erneuerbare Energien, Braunkohle, Steinkohle, Gas- und Dampfkraftwerke, Gasturbinen und Ölkraftwerke) ausgewiesen, zusammen mit sich daraus ergebenden Strompreis sowie den CO₂-Emissionen des Grenzkraftwerkes und der gemittelten Emissionen.

Aus diesem Datensatz kann entsprechend die Residuallast und die Leistungsdauerlinie abgeleitet werden. Leider geben diese Darstellungen keinen Hinweis auf den zu einem gegebenen Zeitpunkt vorliegenden Flexibilitätsbedarf. Die Daten für Import und Export sind für eine Ableitung des Flexibilitätsbedarfs nicht geeignet, da diese auf der vorgeschalteten Optimierung des europäischen Kraftwerkseinsatzes beruhen. In vorhergegangenen Untersuchungen wurde pauschal ein negativer Flexibilitätsbedarf unterstellt, wenn zu einem Zeitpunkt erneuerbare Energien und ein positiver Flexibilitätsbedarf, wenn Gasturbinen und Ölkraftwerke das Grenzkraftwerk darstellten. Diese Pauschalisierung stellt jedoch eine starke Vereinfachung dar, so dass in der vorliegenden Arbeit ein anderer Ansatz verfolgt wurde.

Aufgrund der Äquivalenz des Einsatzes von Wasserpumpspeicherkraftwerken mit Flexibilitätsoptionen kann jedoch der Betriebszustand der Pumpspeicherkraftwerke als Maß dafür herangezogen werden, ob ein positiver Flexibilitätsbedarf (Turbinenmodus) oder ein negativer Flexibilitätsbedarf

(Pumpmodus) besteht. Diese Betrachtungsweise hat bei dem gegebenen Datensatz zur Folge, dass zu jedem Zeitpunkt entweder ein positiver oder ein negativer Flexibilitätsbedarf besteht. Die Aussage ist jedoch keineswegs, dass dieser Flexibilitätsbedarf nicht gedeckt wird. In dem Modell wird dieser gerade durch den Einsatz der Wasserpumpspeicherkraftwerke kompensiert. Eine gewählte Flexibilitätsop-tion würde also in direkter Konkurrenz zu dem Einsatz von Wasserpumpspeicherkraftwerken stehen.

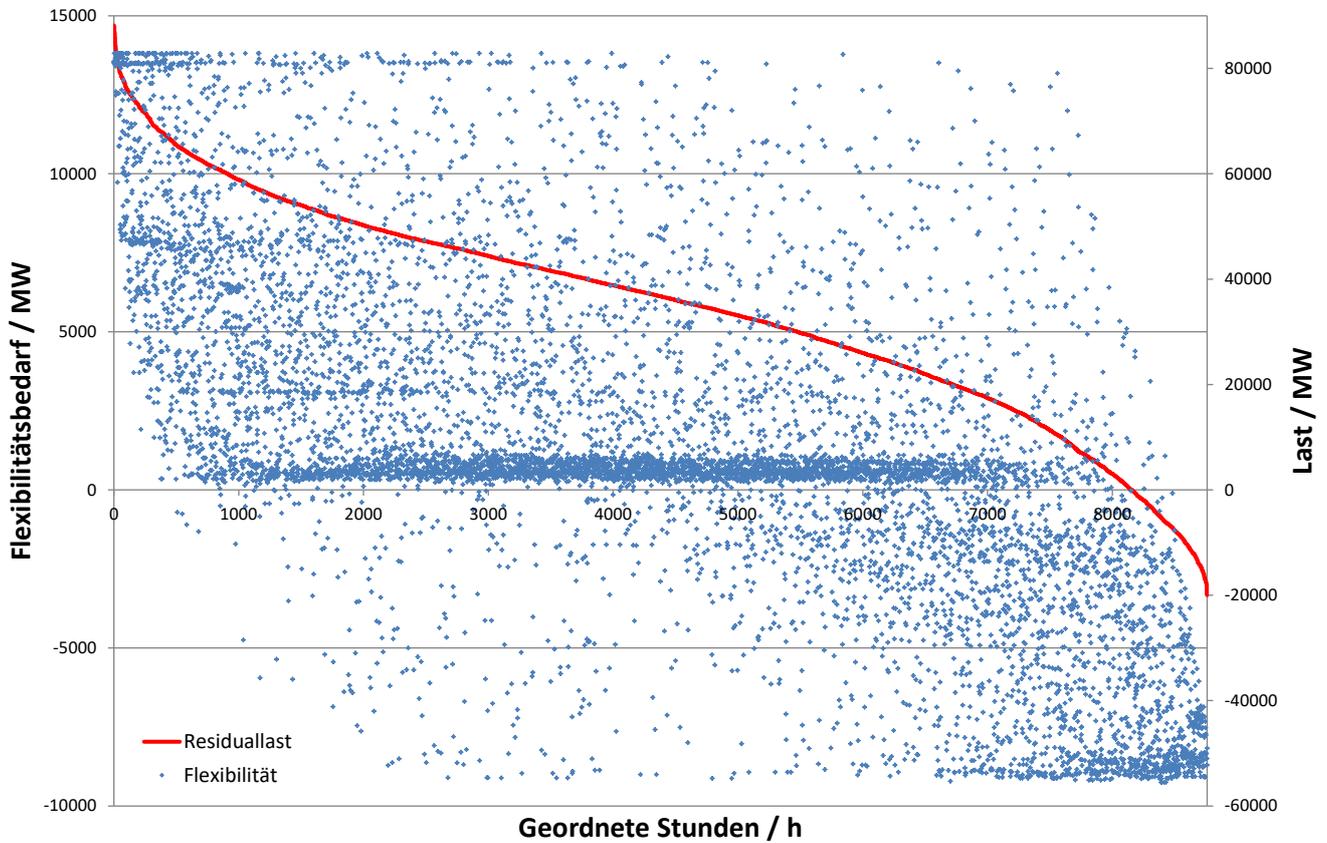


Abb. 11.2: Geordnete Leistungsdauerlinie (linke Skala) und Flexibilitätsbedarf (rechte Skala) abgeleitet vom Einsatz der Wasserpumpspeicherkraftwerke

Insgesamt entsteht durch diese Betrachtung ein im Durchschnitt leicht positives Flexibilitätspotenzial, da insgesamt ein Stromexport in dem Modell angenommen wird. Darüber hinaus verfügt ein Teil der Speicherkraftwerke über einen natürlichen Zufluss und leistet in Summe einen positiven Beitrag leistet.

Abbildung 11.2 stellt die Leistungsdauerlinie der „Standard“ Zeitreihe dar, zusammen mit dem jeweilig abgeleiteten Flexibilitätsbedarf. Insgesamt gibt es deutlich mehr Zeitpunkte mit einem

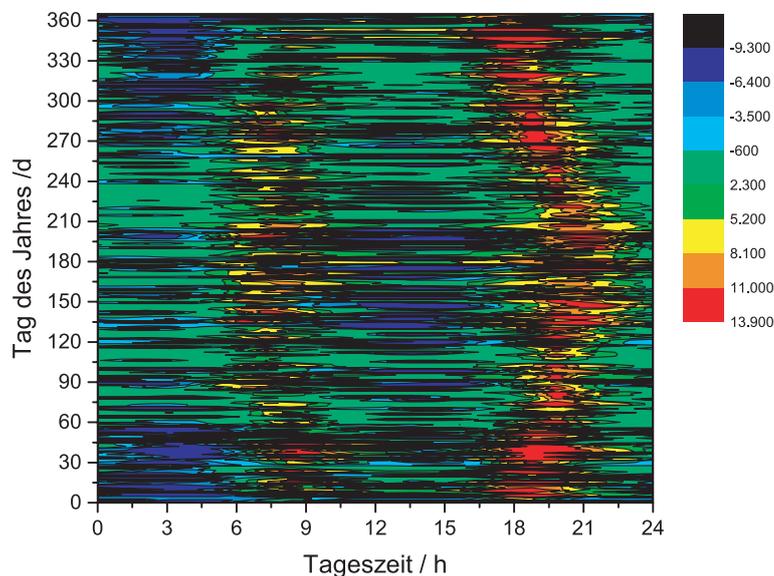


Abb. 11.3: Tägliche und stündliche Auflösung des Flexibilitätsbedarfs der MONA 2030 Standard Zeitreihe.

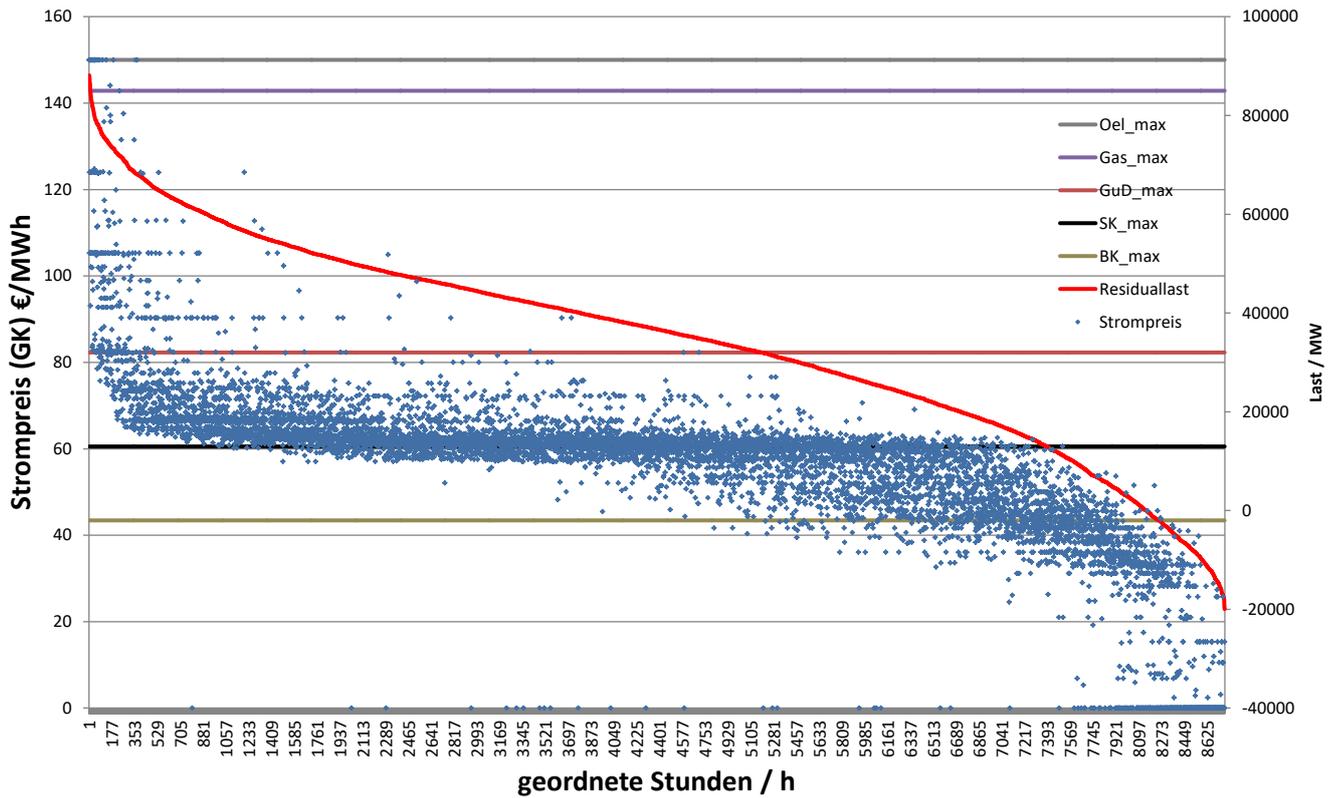


Abb. 11.4: Strompreisverteilung entlang der geordneten Leistungsdauerlinie. Die waagerechten Linien geben jeweils die höchsten Kosten des entsprechenden Grenzkraftwerks an.

positiven als mit einem negativen Flexibilitätsbedarf. Eine chronologische Darstellung des Flexibilitätsbedarfs ergibt komplementäre Informationen, vgl. Abbildung 11.3. Daraus geht hervor, dass es im Tagesverlauf jeweils zwei Zeiträume (Hochzeiten) mit überwiegend positivem Flexibilitätsbedarf (zwischen 6:00-10:00 sowie 17:00-22:00) und zwei Zeiträume (Niedrigzeiten) mit überwiegend negativem Flexibilitätsbedarf (zwischen 22:00 - 6:00 sowie zwischen 10:00 – 17:00) gibt. Diese Strukturen ändern sich leicht im Jahresverlauf, wobei insbesondere der spätere Zeitraum für positiven Flexibilitätsbedarf im Sommer leicht nach hinten verschoben wird.

Ein ganz analoges Bild ergibt sich für die Betrachtung der Strompreise, vgl. Abbildung 11.4 und Abbildung 11.5. Die relativ hohen Strompreise treten im Wesentlichen zu den gleichen Zeiten auf, in denen nach dem verwendeten Kriterium ein positiver Flexibilitätsbedarf vorliegt, also am Vormittag und frühen Abend. In den Wintermonaten treten besonders hohe Strompreise auf. Zur Einordnung können die maximalen Strompreise für die verschiedenen Kategorien der Grenzkraftwerke nach dem Modell herangezogen werden. Diese betragen 43,42 €/MWh für Braunkohlekraftwerke (BK),

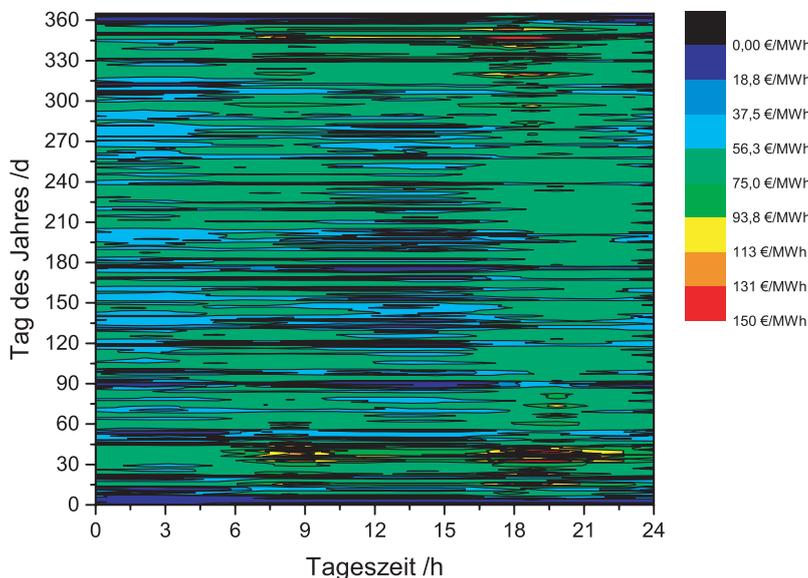


Abb. 11.5: Tägliche und stündliche Auflösung der Strompreise der MONA 2030 „Standard“ Zeitreihe.

60,55 €/MWh für Steinkohlekraftwerke, 82,30 €/MWh für GuD-Anlagen, 142,84 €/MWh für Gasturbinen und 150 €/MWh für Ölkraftwerke.

Die CO₂-Emissionen der jeweils aktiven Grenzkraftwerke sind in Abbildung 11.6 erfasst. Auffällig ist die teilweise sehr Differenz zwischen dem stündlichen Durchschnittswert der CO₂-Emissionen und den Emissionen des aktiven Grenzkraftwerks. Daraus folgt, dass ein mögliches Verdrängen, z.B. eines emissionsintensiven Grenzkraftwerkes durch eine emissionsarme Flexibilitätsoption einen nennenswerten Effekt auf die CO₂-Emissionen haben kann.

Die Emissionen der Grenzkraftwerke, vgl. Abbildung 11.7 zeigen in der täglichen und stündlichen Auflösung das komplementäre Bild zu Flexibilitätsbedarf und Strompreisen. Dies liegt darin begründet, dass in der Merit-Order-Logik nach den erneuerbaren Erzeugungsanlagen zuerst emissionsintensive Braun- und Steinkohlekraftwerke eingesetzt werden. Nur in Zeiten relativ hohen Bedarf kommen die emissionsärmeren GuD-Kraftwerke, Gasturbinen und Ölkraftwerke zum Einsatz, also in den Zeiten hoher Strompreise und positivem Flexibilitätsbedarf. Es ist aber darauf hinzuweisen, dass im Sinne der Merit-Order Logik auf die emissionsärmsten Stromerzeugungseinheiten aus erneuerbaren Energien direkt die emissionsintensivsten, die Braunkohlekraftwerke, folgen. Daher kommt es in Abbildung 11.7 zu starken Sprüngen in kurzen Zeitintervallen zwischen den Hoch- und Niedrigzeiten.

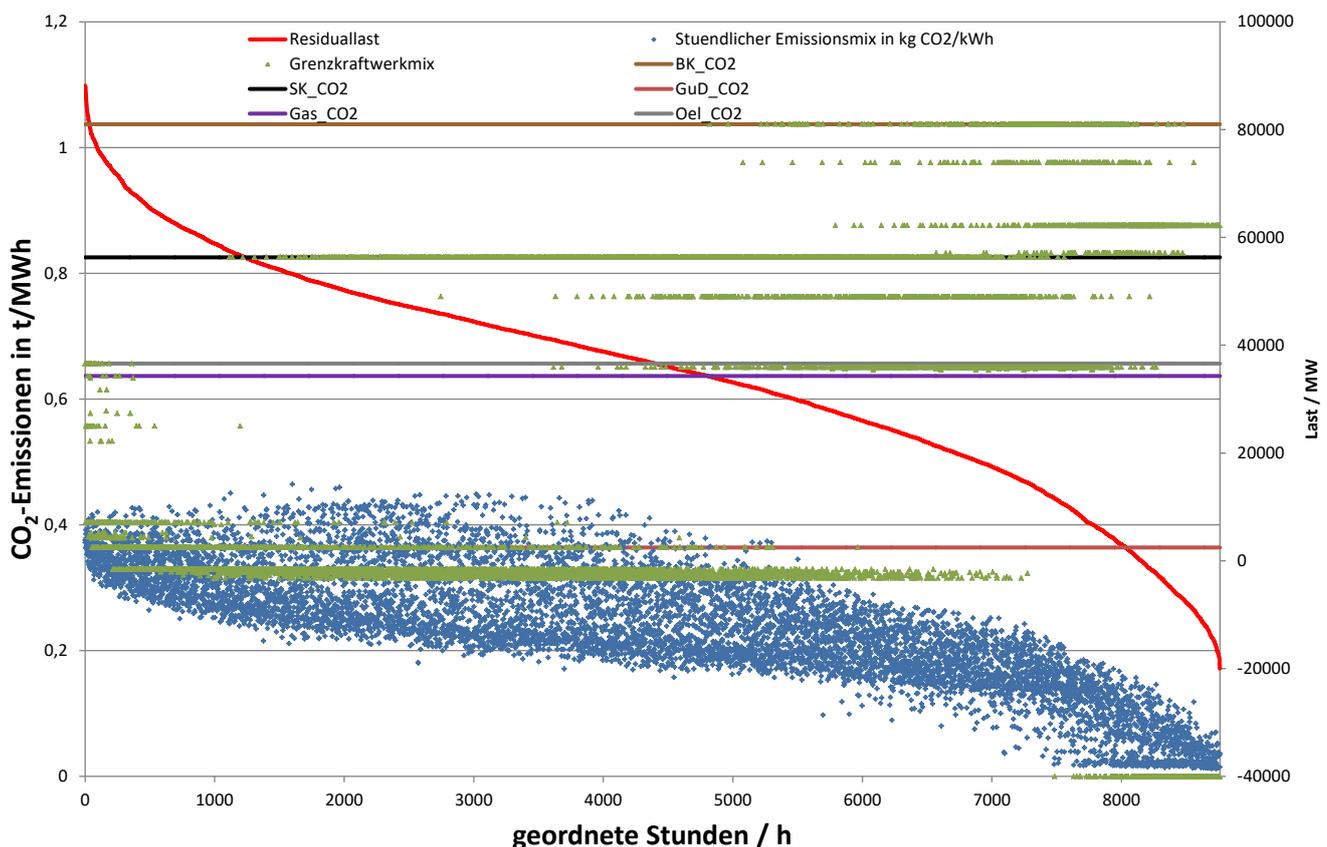


Abb. 11.6: CO₂-Emissionen (grüne Punkte) des jeweiligen Grenzkraftwerks und durchschnittlichen Emissionen (blaue Punkte) sowie die Emissionskennlinien für das jeweilig in seiner Kategorie emissionsintensivste Grenzkraftwerk.

Aus diesen Betrachtungen lassen sich mögliche Strategien für den Einsatz von Flexibilitätsoptionen ableiten. Der positive Flexibilitätsbedarf ist am stärksten zu den Hochzeiten (6:00-10:00 und 17:00-22:00), in denen auch die höchsten Strompreise erzielt werden. Eine positive Flexibilitätsoption in diesen Zeiträumen verdrängt jedoch hauptsächlich emissionsarme Grenzkraftwerke und sollte daher nach Möglichkeit nicht mehr Emissionen emittieren als das verdrängte Grenzkraftwerk. Der negative Flexibilitätsbedarf tritt hauptsächlich in den Niedrigzeiten auf (10:00-17:00 und 22:00-6:00) in denen die Strompreise tendenziell niedriger liegen aber dafür relativ emissionsintensive Grenzkraftwerke aktiv sind.

Auf Basis dieser Analyse ist der Einsatz von Flexibilitätsoptionen mit den gleichzeitigen Zielsetzungen einer CO₂-Reduzierung und der Ausnutzung von Strompreisunterschieden schwierig hinsichtlich beider Zielsetzungen umzusetzen.

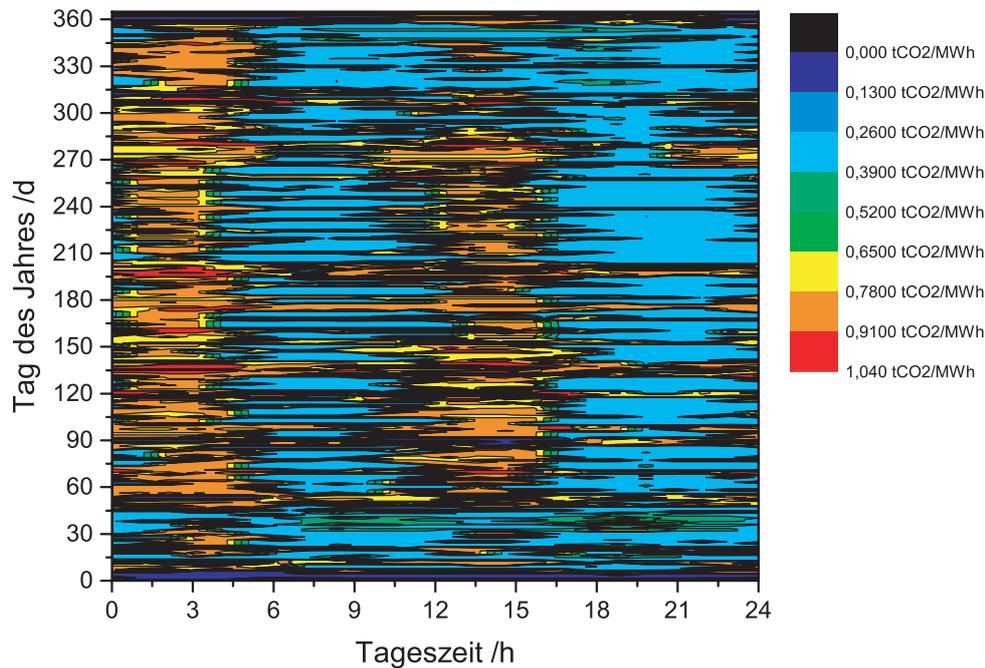


Abb. 11.7: Tägliche und stündliche Auflösung der CO₂-Emissionen der jeweiligen Grenzkraftwerke in der MONA 2030 „Standard“ Zeitreihe [3].

11.5 Einsatzstrategien

Die Frage nach der Verfügbarkeit von Flexibilitätsoptionen, die sich im Sinne einer Konfiguration wie in dem Industriepark ergeben, ist immer auch die Frage nach der Einsatzstrategie, wenn Flexibilität im Wesentlichen auf Seite desjenigen, der die Flexibilität zur Verfügung stellt eine Änderung einer Betriebsweise bedeutet.

Für die Energieversorgung des Industrieparks im Jahr 2030 werden fünf verschiedene Einsatzstrategien betrachtet. In allen Fällen muss berücksichtigt werden, dass, die Dampfversorgung im Industriepark gesichert ist und die technischen Parameter der Erzeugungsanlagen beachtet werden.

Zusätzlich werden die Strategien auch hinsichtlich eines möglichen Einsatzes eines (idealen) thermischen Speichers, der durch das Abgas der Gasturbine geheizt werden kann ergänzend betrachtet. Die Funktion des thermischen Speichers ist dabei, in Zeiten (Sommerhalbjahr), in denen der reduzierte Wärmebedarf ein Betreiben der GuD-Anlagen auf ihrem maximalen Betriebspunkt verhindert, zusätzlich Wärme aufzunehmen und damit ein Hochfahren der GuD-Kraftwerke zu ermöglichen. Zu anderen Zeiten wird der Speicher entladen und reduziert damit die notwendige Wärmebereitstellung durch Gaskessel. Der thermische Speicher erhöht damit das positive Flexibilitätspotential im Sommerhalbjahr. Er wird immer dann beladen, wenn ein positiver Flexibilitätsabruf zu einer Dampferzeugung der GuD-Anlagen führt, die über den aktuellen Dampfbedarf hinausgeht. Der Speicher wird entladen, wenn durch einen negativen Flexibilitätsabruf Gaskessel den zusätzlichen Dampfbedarf erzeugen würden.

Darüber hinaus wird für jede Einsatzstrategie auch der Einsatz einer Wasserelektrolyse mit einer Anschlussleistung von 14 MW evaluiert. Wie oben beschrieben, ist die Wasserelektrolyse ein zusätzlicher Verbraucher, die als Sektorkopplungstechnologie fungiert. Sie stellt ausschließlich negative Flexibilität zur Verfügung unter der Annahme, dass die Wasserstoffabnahme gesichert ist. Die Wasserelektrolyse wird eingesetzt, wenn es einen Bedarf für negative Flexibilität gibt und die Randbedingungen der jeweiligen Einsatzstrategie einen Einsatz zulassen, d.h. der erzeugte Wasserstoff entweder billiger (Betriebswirtschaftlich optimale Einsatzstrategie) oder emissionsärmer bereitgestellt wird als Wasserstoff aus der Dampfreformierung (Referenz).

Die Einsatzstrategien werden über den Jahreszeitraum auf Basis der Zeitreihe ausgewertet, nach Brennstoff- und CO₂-Kosten, erzielten Stromerlösen, CO₂-Emissionen sowie nach positiver und negativer Flexibilität.

(A) Wirtschaftlich

In dieser Strategie ist das Ziel, die Kosten für Brennstoffe und CO₂-Zertifikate zu minimieren und die Erlöse des Stromexports, definiert durch den Grenzkostenpreis, zu maximieren. Die Betriebsweise folgt dabei folgendem Muster: Ist das Grenzkraftwerk günstiger als die eigenen Kraftwerke, so werden diese auf minimaler Teillast betrieben und der benötigte Strom aus dem Netz importiert. Ansonsten werden die eigenen Kraftwerke zur maximalen Strom- und Wärmeerzeugung eingesetzt. Die Differenz zur benötigten Wärmeerzeugung wird durch Gaskessel oder Elektrodenkessel bereitgestellt, je nachdem, welche Umwandlung günstiger ist. Damit wird eine betriebswirtschaftlich-optimale Einsatzstrategie erreicht.

(B) Minimale Stromerzeugung

In dieser Strategie werden die GuD-KWK-Anlagen auf minimaler Teillast betrieben, um die Stromerzeugung zu minimieren, und die Elektrodenkessel werden auf Volllast zur Wärmebereitstellung eingesetzt. In dieser Einsatzstrategie kann das maximale positive Flexibilitätspotenzial verwirklicht werden.

(C) Maximale Stromerzeugung

In dieser Strategie werden die GuD-KWK-Anlagen auf maximaler Leistung betrieben, um eine möglichst hohe Stromerzeugung zu gewährleisten. Die Elektrodenkessel kommen nicht zur Dampferzeugung zum Einsatz. Nur in jenen Zeiträumen, in denen die Dampferzeugung der GuD-KWK-Anlagen den Dampfbedarf des Industrieparks übersteigt, wird die Kraftwerksleistung gedrosselt, da es keine zusätzlichen flexiblen Wärmeabnehmer gibt. In dieser Einsatzstrategie kann das maximale negative Flexibilitätspotenzial verwirklicht werden.

(D) Maximale Flexibilitätserhaltung für das Stromsystem

In dieser Strategie werden die Industriepark-eigenen Kraftwerke und Elektrodenkessel geplant auf mittlerer Teillast betrieben, um jederzeit positive und negative Flexibilität anbieten zu können. Bei mittlerer Teillast ist das Produkt aus positiver und negativer Flexibilität maximal. Der verbleibende Wärmebedarf wird durch Gaskessel abgedeckt.

(E) CO₂-Minimierung

Diese Strategie zielt auf eine maximale Minimierung der CO₂-Emissionen durch die Strom- und Wärmebereitstellung. Hier werden die eigenen Kraftwerke eingesetzt, wenn sie Strom mit geringeren CO₂-Emissionen erzeugen als das entsprechende Grenzkraftwerk. Die Elektrodenkessel (Power-to-Heat) kommen zum Einsatz, wenn erneuerbare Energien das Grenzkraftwerk definieren. Die Betriebsweise ist wie folgt definiert: Die eigenen Kraftwerke werden dann maximal eingesetzt, wenn die eigene Stromerzeugung weniger CO₂-Emissionen freisetzt als das Grenzkraftwerk. Die Stromerlöse richten sich aber weiterhin nach dem jeweiligen Grenzkraftwerk. Die Differenz zur benötigten Wärmeerzeugung wird durch Gaskessel oder Elektrodenkessel bedient, je nachdem, welche Umwandlung geringere CO₂-Emissionen freisetzt.

(F) Vollflexibler Betrieb

In diesem Betriebszustand werden die Strom- und Dampferzeugungsanlagen so betrieben, dass zu jedem Zeitpunkt, unter Sicherung der Dampfversorgung, entweder maximale Stromaufnahme und minimale Stromerzeugung im Fall eines negativen Flexibilitätsbedarf, bzw. minimale Stromaufnahme und maximale Stromerzeugung im Falle eines positiven Flexibilitätsbedarfs gewährleistet

ist. Die Differenzen zwischen den anderen Einsatzstrategien (A)-(E) und dem vollflexiblen Betrieb ergeben die jeweiligen Flexibilitätspotenziale und die anderen Kenngrößen.

11.6 Auswertung

Je nach Einsatzstrategie werden die einzelnen Komponenten der Gesamt Strom- und Dampferzeugungskonfiguration des Industrieparks unterschiedlich eingesetzt. Der Betrieb der GuD-Kraftwerke führt zur Stromerzeugung und zu einem Erdgasbedarf, der mit (internen) CO₂-Emissionen verbunden ist. Wenn der Einsatz der GuD-Kraftwerke weniger Emissionen verursacht als die Stromerzeugung des entsprechenden Grenzkraftwerkes, werden CO₂-Emissionen vermieden (verdrängt), die sonst in der externen Stromerzeugung anfallen würden. Der Einsatz der Elektrodenkessel führt zu einem Strombedarf, der ggfs. (extern) CO₂-Emissionen verursacht. Der Einsatz von Gaskesseln zur Dampferzeugung führt zu einem entsprechenden Erdgaseinsatz und den damit verbundenen (internen) CO₂-Emissionen. Die (Grenz-)Kosten ergeben sich aus den Kosten für den Bezug von Strom, Erdgas und den aus dem Erdgaseinsatz entstandenen Kosten für Emissionszertifikate für interne Emissionen. Erlöse werden durch die Stromerzeugung auf Basis des jeweils gültigen Strompreises der Zeitreihe generiert, d.h. der Strompreis der durch das jeweilige Grenzkraftwerk gebildet wird. Das Flexibilitätspotenzial gibt an, in wie weit durch Änderung der Betriebsparameter in einer Einsatzstrategie ein maximales positives oder negatives Flexibilitätspotenzial zugänglich wäre.

11.6.1 Vergleich der Einsatzstrategien

Die verschiedenen Einsatzstrategien verhalten sich in Bezug auf verschiedene Kennzahlen wie in Abbildung 11.8 dargestellt. Die Einsatzstrategien der maximalen Stromerzeugung und der CO₂-Minimierung verhalten sich sehr ähnlich, da die GuD-Anlagen des Industrieparks in fast allen Fällen, außer wenn erneuerbare Stromerzeugung das Grenzkraftwerk bildet, weniger CO₂ pro erzeugte MWh Strom emittieren als die entsprechenden konventionellen Grenzkraftwerke. Dies bedeutet aber auch eine Minimierung des positiven Flexibilitätspotentials, da die Stromerzeugung fast immer auf Volllast betrieben wird. Die Einsatzstrategie Wirtschaftlich optimiert die Kosten und Erlöse, hat aber ebenfalls kaum positives Flexibilitätspotenzial. Die Einsatzstrategie der minimalen Stromerzeugung hat das höchste positive Flexibilitätspotenzial, da die GuD-Anlagen konstant auf

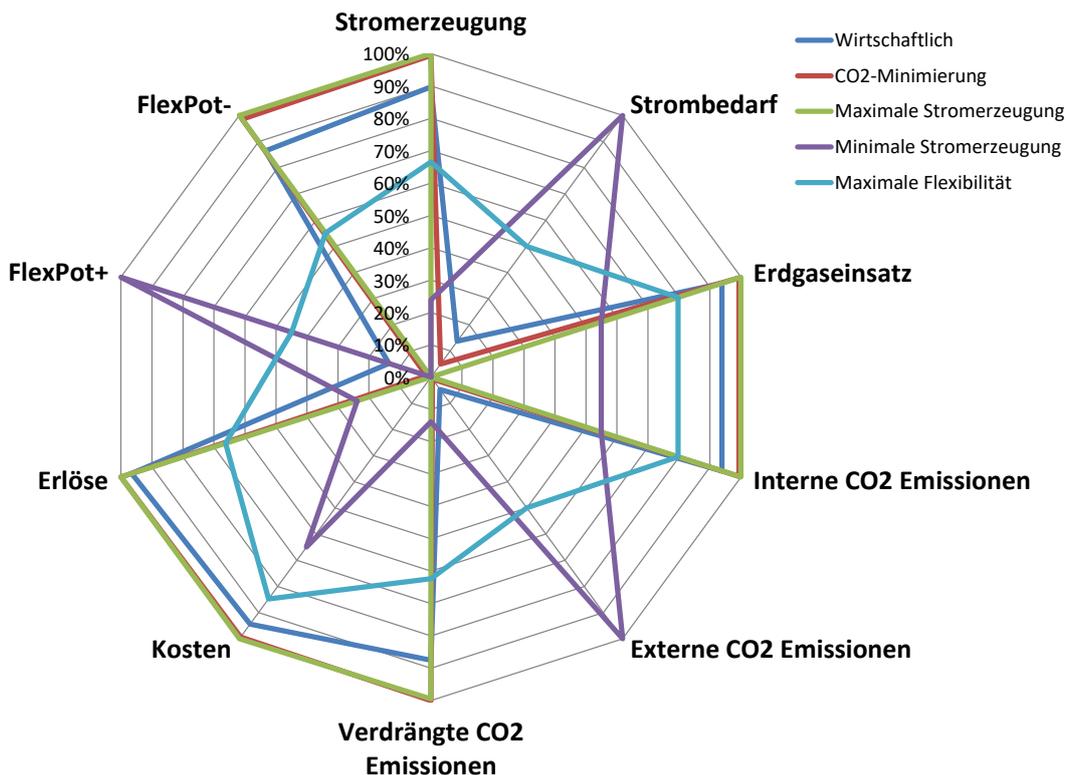


Abb. 11.8: Vergleich der Einsatzstrategien ohne Anwendung von Flexibilität.

minimaler Teillast betrieben werden, aber damit auch kein negatives Flexibilitätspotenzial. Eine Einsatzstrategie, die die Flexibilitätspotenziale optimiert, ist dafür den anderen Betriebsweisen in den anderen Kennzahlen unterlegen.

Für die verschiedenen Einsatzstrategien führt das Anbieten von Flexibilität als einziger Maßstab zu den jeweils gleichen Betriebsbedingungen, d.h. für positive Flexibilität eine maximale Auslastung der GuD-Kraftwerke und ein Abschalten der Elektrodenkessel, bzw. für negative Flexibilität ein Betrieb der GuD-Anlagen auf minimaler Teillast und Volllastbetrieb der Elektrodenkessel. In beiden Fällen wird ein ggfs. darüberhinausgehender Dampfbedarf durch die Gaskessel kompensiert. Dieser Betriebszustand wird im Folgenden „vollflexibler Betrieb“ genannt.

Aus dem Vergleich zum jeweiligen Referenzbetrieb lassen sich dann die Kennzahlen für den vollflexiblen Betrieb ableiten, vgl. auch die Werte in Tabelle 11.2 und Tabelle 11.3.

Tabelle 11.2: Kennzahlen für das Anbieten von positiver Flexibilität in den verschiedenen Einsatzstrategien.

Einsatzstrategie	Potenzial für positive Flexibilität	Abgerufene positive Flexibilität	# Stunden	Abgerufene positive Flexibilität	Durchschnittliche Kosten für positive Flexibilität
Einheit	MWh	MWh	h	%	€/MWh
Wirtschaftlich	294.126	26.138	105	9	24,71
Minimale Stromerzeugung	2.167.959	1.533.945	6.218	71	-23,00
Maximale Stromerzeugung	0	0	0	0	-
Maximale Flexibilität	974.409	686.742	6.218	70	-23,35
Minimale CO ₂ -Emissionen	30.757	1.168	105	4	41,75

Tabelle 11.3: Kennzahlen für das Anbieten von negativer Flexibilität in den verschiedenen Einsatzstrategien.

Einsatzstrategie	Potenzial für negative Flexibilität	Abgerufene negative Flexibilität	# Stunden	Abgerufene negative Flexibilität	Durchschnittliche Kosten für negative Flexibilität
Einheit	MWh	MWh	h	%	€/MWh
Wirtschaftlich	-1.873.833	-366.027	1.458	20	11,51
Minimale Stromerzeugung	0	0	0	0	-
Maximale Stromerzeugung	-2.167.959	-634.015	2.542	29	-2,31
Maximale Flexibilität	-1.193.550	-346.348	2.542	29	-2,52
Minimale CO ₂ -Emissionen	-2.137.202	-604.425	1.458	28	-0,41

Es fällt auf, dass die abgerufenen Flexibilitäten deutlich geringer sind als die jeweiligen Flexibilitätspotenziale. Das liegt daran, dass ein Flexibilitätspotenzial in den Anlagen vorhanden ist, aber zu einem bestimmten Zeitpunkt nicht benötigt wird und daher auch nicht abgerufen wird. Die Einsatzstrategie der maximalen Flexibilitätsbereithaltung kann zu jedem Zeitpunkt die gewünschte Flexibilitätsform zur Verfügung stellen. Ausgehend von verschiedenen Einsatzstrategien kann ein flexibler Betrieb zusätzliche Erlöse generieren (negative Kosten für Flexibilität) oder zu zusätzlichen Kosten führen. Die relativen Kennzahlen eines vollflexiblen Betriebs sind in Abbildung 11.9 dargestellt. Um eine einfachere Einordnung vorzunehmen sind die Netto-Kennzahlen in Abbildung 11.10 dargestellt.

Aus Abbildung 11.10 gehen die Wechselwirkungen und „trade-offs“ in den verschiedenen Dimensionen hervor. Eine vollflexible Betriebsweise führt zu einem geringeren Erdgaseinsatz und zu einer geringeren Netto-Stromerzeugung als alle Fahrweisen außer der maximalen Flexibilitätsbereitstellung und der minimalen Stromerzeugung. Gleichzeitig führt die vollflexible Betriebsweise zu einem Anstieg der CO₂-Emissionen relativ zu allen Einsatzstrategien außer der minimalen Stromerzeugung, was auf höhere externe Emissionen (Strom zum Betreiben der Elektrodenkessel) und

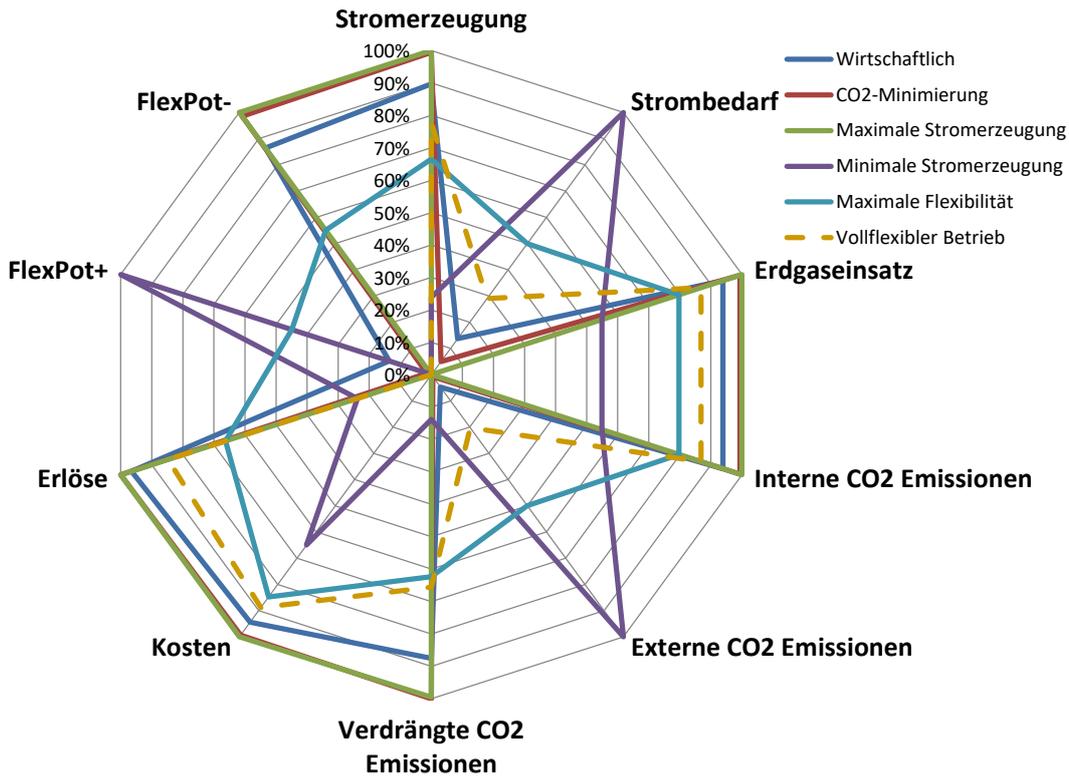


Abb. 11.9: Verschiedene Einsatzstrategien relativ zu einem vollflexiblen Betrieb.

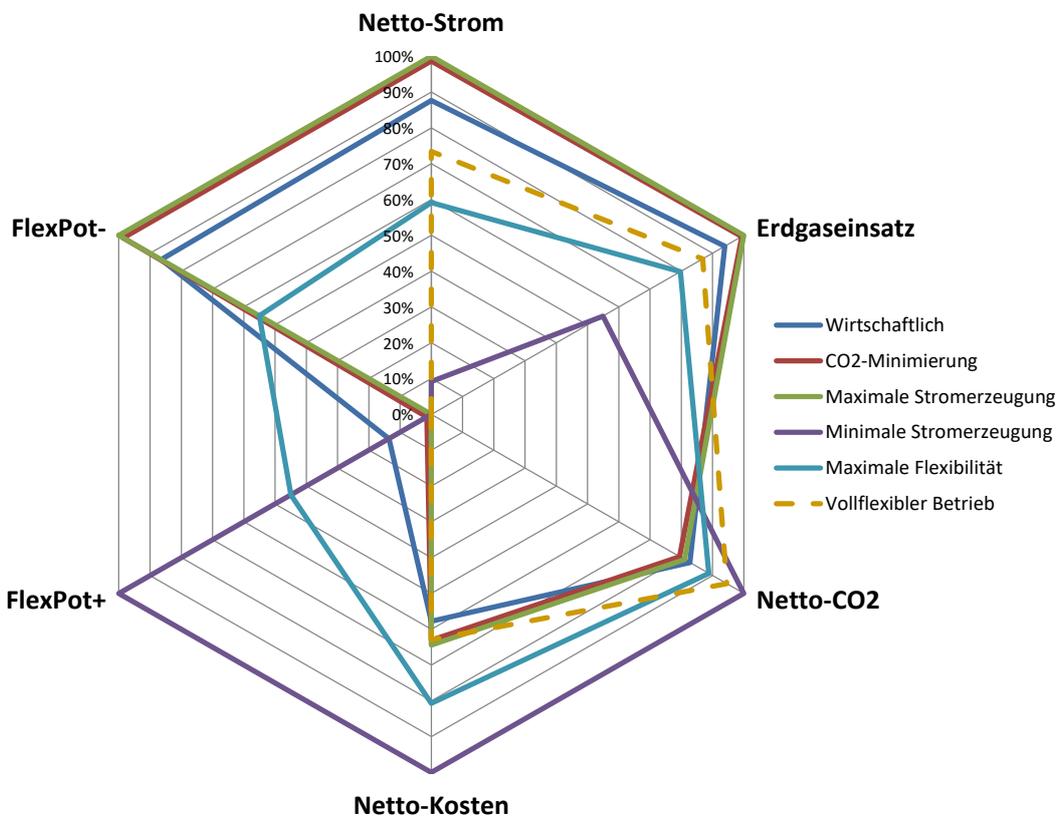


Abb. 11.10: Netto-Kennzahlen für die verschiedenen Einsatzstrategien und den vollflexiblen Betrieb.

geringere verdrängte Emissionen (emissionsintensive Grenzkraftwerke werden weniger verdrängt) zurückzuführen ist.

Bisher sind die Analysen jeweils von dem Strombörsenpreis, definiert durch die Grenzkosten des Grenzkraftwerks in der Merit-Order, als einziger Strompreisbestandteil ausgegangen. Der Bezug von extern erzeugtem Strom, z.B. um die Elektrodenkessel zur Dampfbereitstellung zu nutzen, ist

jedoch mit zusätzlichen Preisbestandteilen in Form von Steuern, Abgaben, Umlagen und anderen Vertragsbestandteilen verbunden, so dass in der Regel ein deutlicher Aufschlag auf den Börsenstrompreis anfällt. Diese zusätzlichen Strompreisbestandteile verteuern die Dampfbereitstellung mit Elektrodenkessel und dementsprechend der relativen Einordnung der Kosten der Dampferzeugungstechnologien (GuD-Kraftwerke, Gaskessel, Elektrodenkessel). Die Effekte sind für die betriebswirtschaftlich optimale Einsatzstrategie in Abbildung 11.11 dargestellt.

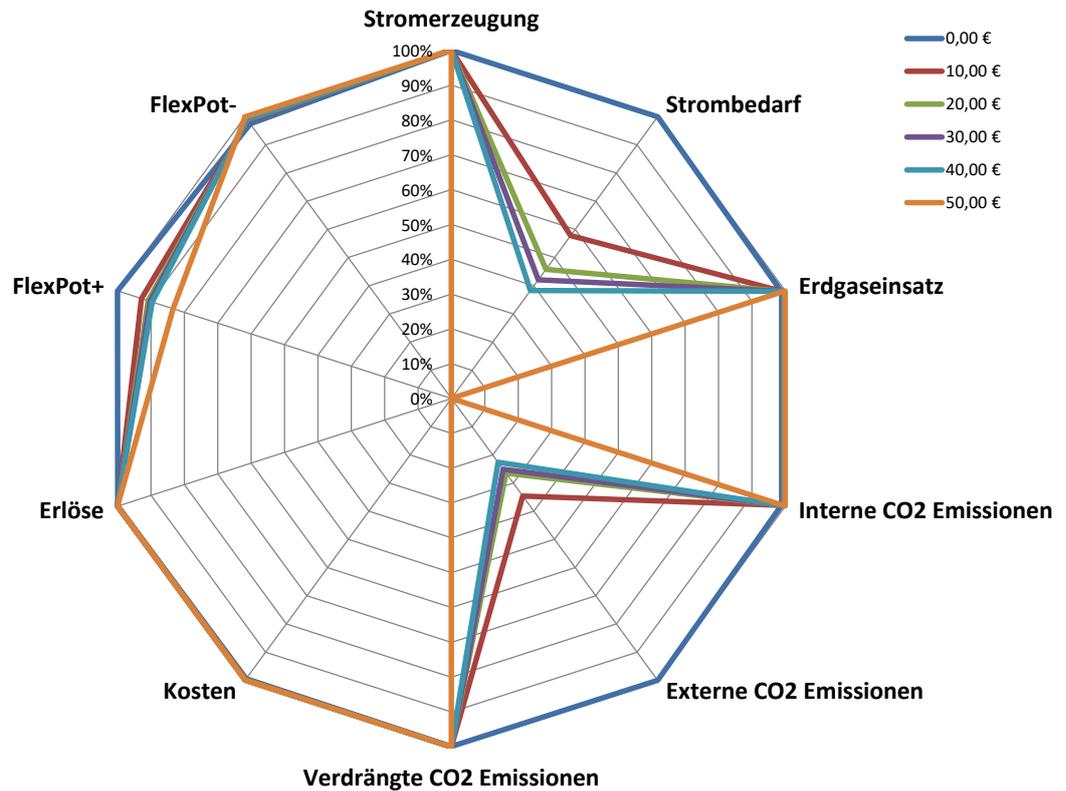


Abb. 11.11: Effekt der Berücksichtigung von weiteren Strompreisbestandteilen in der betriebswirtschaftlich-optimalen Einsatzstrategie (Wirtschaftlich).

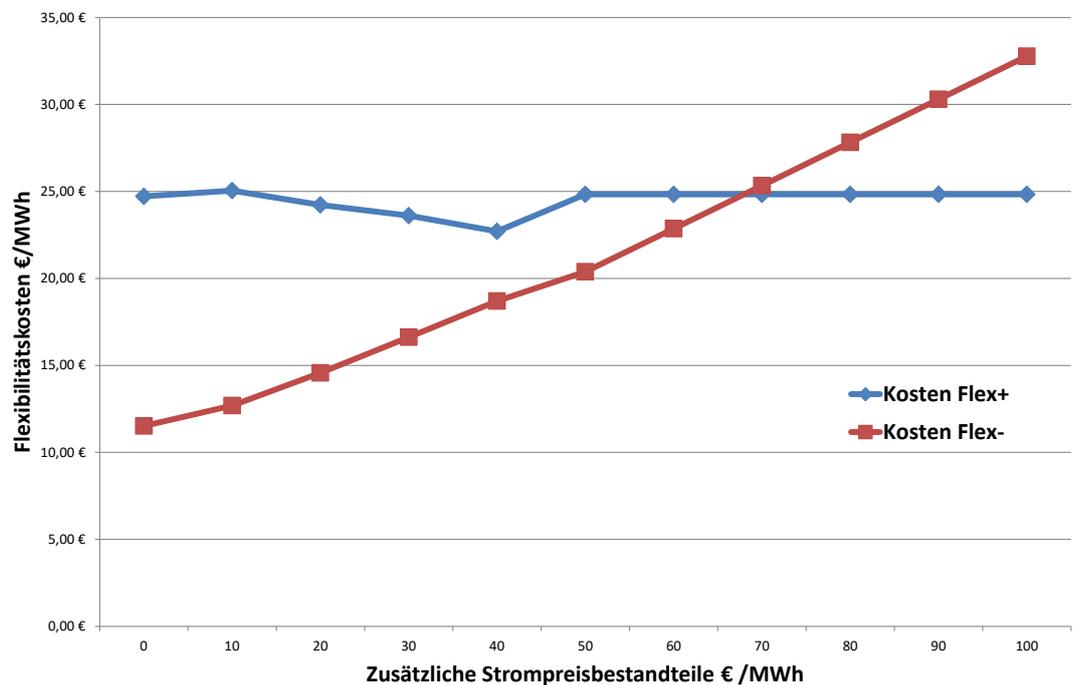


Abb. 11.12: Verlauf der durchschnittlichen Flexibilitätskosten als Funktion eines zusätzlichen Strompreisbestandteils in der betriebswirtschaftlich-optimalen Einsatzstrategie (Wirtschaftlich).

Die Dampferzeugung aus Elektrodenkesseln nimmt mit steigenden weiteren Preisbestandteilen sukzessive ab und damit auch das mögliche positive Flexibilitätspotenzial, was sich sonst durch deren Abschaltung gegenüber dem Referenzbetrieb ergeben würde. Damit einhergehend nehmen auch der Strombedarf, der durch externen Bezug gedeckt werden würde und die externen CO₂-Emissionen ab. In diesem Kontext reduzieren zusätzlich Preiskomponenten im Strompreis das mögliche positive Flexibilitätspotenzial. Dies gilt ausschließlich für die betriebswirtschaftlich optimale Einsatzstrategie, da sie als einzige Strategie die Kostenoptimierung verfolgt. Der Verlauf der Flexibilitätskosten ist in Abbildung 11.12 dargestellt. Die Kosten für die Bereitstellung von negativer Flexibilität steigen fast linear mit dem zusätzlichen Preisbestandteil an, während die Kosten zur Bereitstellung positiver Flexibilität ein Minimum am Grenzwert für die Kostenparität von der Dampfbereitstellung von Gaskesseln zu Elektrodenkesseln durchlaufen und anschließend konstant bleiben.

11.6.2 Einsatz eines thermischen Speichers

Der Wärmebedarf des Industrieparks hat eine saisonale Komponente. Im Winterhalbjahr ist er höher als im Sommerhalbjahr und liegt teilweise unter der Kapazität der Dampferzeugung der GuD-Kraftwerke. Die GuD-Kraftwerke können zu diesen Zeiten nicht unter Volllast betrieben werden, da für die erzeugten Dampfmengen kein Abnehmer vorhanden ist. Daher steht zu diesen Zeiten nicht das vollständige positive Flexibilitätspotenzial zur Verfügung. Durch die Verwendung eines thermischen Speichers im Abgasstrang der Gasturbine kann ein Teil dieses zusätzlichen positiven Flexibilitätspotenzials erschlossen werden.

Wenn ein positiver Flexibilitätsbedarf besteht, werden die GuD-Kraftwerke in Volllast betrieben. Die Dampfmenge, die zu diesem Zeitpunkt keinen Abnehmer im Industriepark findet, wird zum Beladen des thermischen Speichers eingesetzt. Der Speicher wird entladen, sobald ein negatives Flexibilitätspotenzial benötigt wird. Dann werden die GuD-Kraftwerke in minimaler Teillast betrieben und die Elektrodenkessel übernehmen einen Teil der Dampferzeugung. Statt den dann noch ausstehenden Dampfbedarf ausschließlich durch Gaskessel sicherzustellen, wird zuerst der thermische Speicher entladen und damit in der entsprechenden Größenordnung der Einsatz von Erdgas vermieden.

Für die hier zugrundeliegenden Berechnungen wird von einem idealen Speicher ohne Verluste ausgegangen. Die Speicherkapazität ist vorerst nicht limitiert. Die Beladeleistung (MW_{th}) orientiert sich an der Differenz zwischen maximaler Dampferzeugung der GuD-Anlagen und minimalem Dampfbedarf im Sommerhalbjahr. Die Entladeleistung wiederum ist durch die Differenz der Dampferzeugung in minimaler Teillast und der Dampferzeugung unter Volllast gegeben, so dass die GuD-Kraftwerke in minimaler Teillast im Prinzip mit dem Speicher die gleiche Dampferzeugung wie unter Volllast

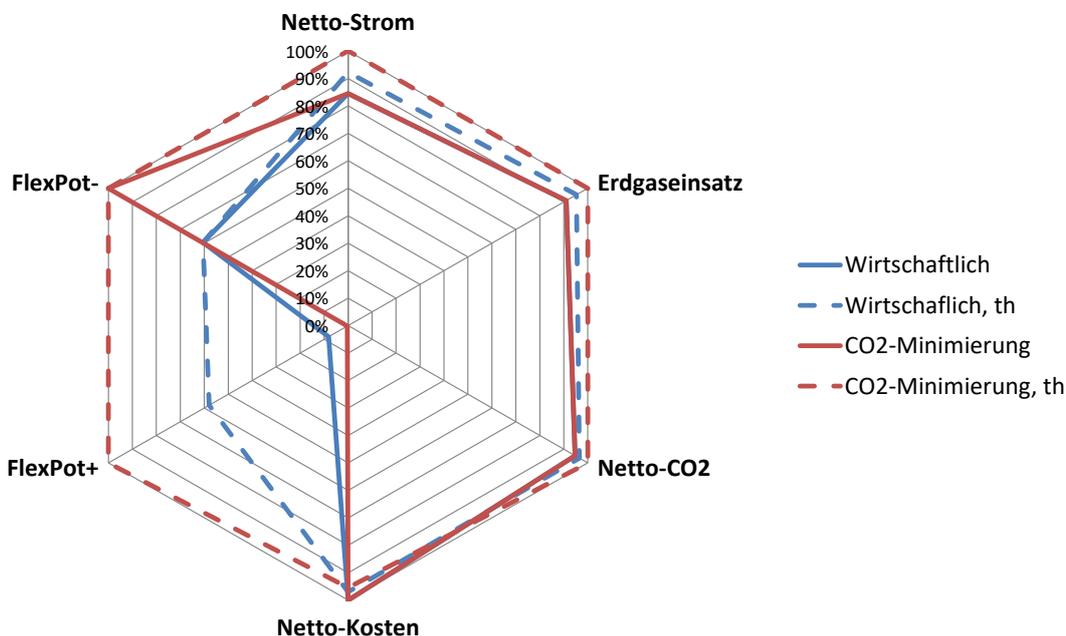


Abb. 11.13: Effekt des Einsatzes eines thermischen Speichers auf die Nettokennzahlen in den Einsatzstrategien Wirtschaftlich und CO₂-Minimierung.

bereitstellen können. Damit wird die Dampf- und Stromerzeugung der GuD-Anlagen weitgehend entkoppelt.

Der Effekt des Einsatzes eines (nicht-begrenzten) thermischen Speichers in den Einsatzstrategien des betriebswirtschaftlich-optimalen Betriebs und der CO₂-Minimierung sind in Abbildung 11.13 dargestellt.

Für Speichertechnologien allgemein wird eine möglichst hohe Anzahl von Vollastzyklen angestrebt. Die hohe Auslastung reduziert die spezifischen Kosten pro umgesetzte Energieeinheit, da die entsprechenden Investitionskosten auf eine höhere Anzahl an Zyklen umgelegt werden können. Je größer ein Speicher ausgelegt wird, desto weniger Vollastzyklen werden über das Jahr erreicht. Eine zu kleine Auslegung wiederum führt zwar zu hohen Vollastzyklen aber nur geringen Energiemengen und zu einer Reduzierung des zusätzlichen positiven Flexibilitätspotenzials.

Entscheidend ist letztlich die gewünschte Funktion des Speichers. Wenn primär die täglichen Schwankungen kompensiert werden sollen, so müsste die Speicherkapazität wenige Stunden der Dampfversorgung umfassen. Wird eine vollständige Ausschöpfung des saisonalen Potenzials gewünscht, so nimmt die Speichergröße, je nach Einsatzstrategie, bis hin auf rund 300 h Dampfversorgung zu. Die Kosten für eine positive Flexibilitätsbereitstellung sind ebenfalls abhängig von der Größe des Speichers. Dies ist in Abbildung 11.14 dargestellt.

Die Kosten der Bereitstellung von positiver Flexibilität sinken relativ schnell bevor sie mit stark zunehmender Speichergröße nur noch geringe Veränderungen erfahren. Die Veränderungen in den differenziellen Kosten, d. h. welche Kostenreduktion führt die Erhöhung pro Einheit Speichergröße herbei nimmt analog ab.

Die Kostenreduktion der negativen Flexibilitätsbereitstellung ist weit weniger stark ausgeprägt. Durch den Speicher werden in Zeiten positiver Flexibilitätsbereitstellung Dampfmen gen erzeugt, die in Zeiten negativen Flexibilitätsbedarfs sonst notwendige Erdgas-basierte Dampferzeugung ersetzen.

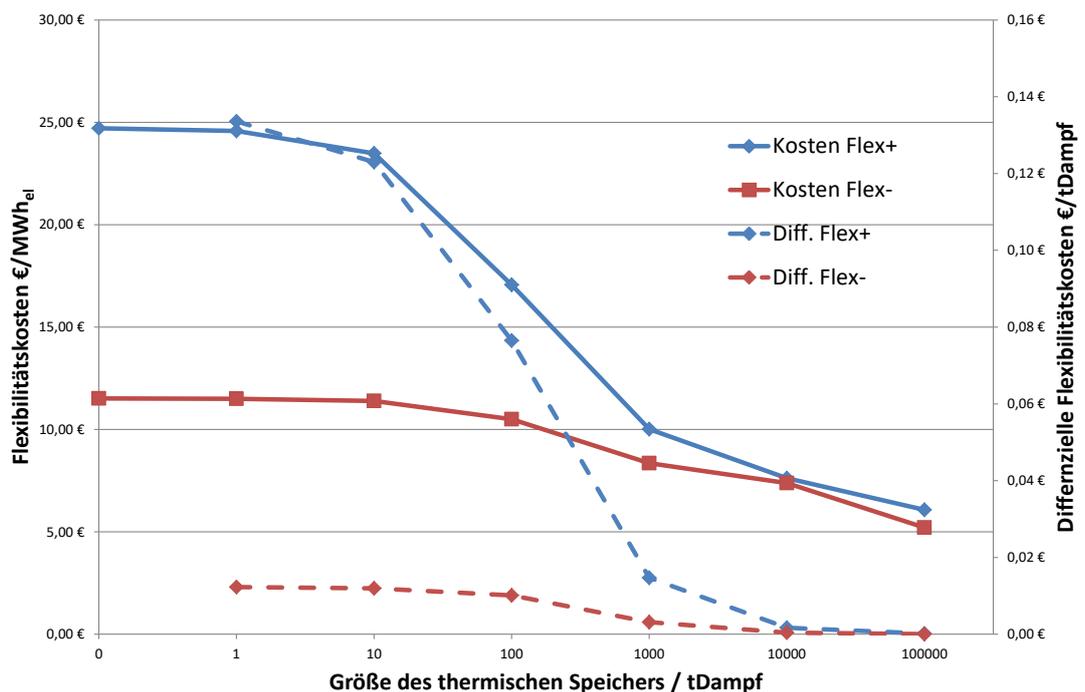


Abb. 11.14: Kosten der Flexibilitätsbereitstellung (durchgezogene Linien, linke Achse) als Funktion der Größe des thermischen Speichers in der betriebswirtschaftlich optimalen Einsatzstrategie. Zusätzlich sind die differenziellen Kosten (gestrichelte Linien, rechte Achse) für die Flexibilitätsbereitstellung als Funktion der Speichergröße dargestellt. Die Abszisse ist logarithmisch skaliert.

11.6.3 Sektorkopplung durch elektrolytische Wasserstoffbereitstellung

Im Gegensatz zum thermischen Speicher im vorhergehenden Abschnitt, der die Möglichkeit eines zusätzlichen positiven Flexibilitätspotenzials in der Konfiguration des Industrieparks erschließen kann, kann die vorhandene Wasserelektrolyse, die als reine Notfalloption gedacht ist, ein zusätzliches negatives Flexibilitätspotenzial erschließen. Es wird dabei angenommen, dass die Abnahme des entstehenden Wasserstoffs gesichert ist.

Der zusätzliche Betrieb der Elektrolyse unterliegt den entsprechenden Randbedingungen der jeweiligen Einsatzstrategie, d.h. insbesondere in der betriebswirtschaftlich-optimierten Strategie muss die Wasserstoffherzeugung durch die Elektrolyse im Sinne der Grenzkosten günstiger sein als die konventionelle Alternative, die Erdgasdampfreformierung. Analog muss für die CO₂-Minimierungsstrategie die Randbedingung erfüllt sein, dass durch die elektrolytische Wasserbereitstellung weniger CO₂ entsteht als im Falle der Erdgasreformierung.

Die Elektrolyse wird als PEM Elektrolyse mit einer elektrischen Leistung von 14 MW angenommen. Sie kann in einer Stunde ca. 0,28 t Wasserstoff produzieren und damit einen täglichen Bedarf von bis zu 6,5 t Wasserstoff unter Volllast bereitstellen.

Der Effekt des Einsatzes der Wasserelektrolyse zur zusätzlichen Bereitstellung von negativer Flexibilität ist in Abbildung 11.15 für die Einsatzstrategien Wirtschaftlich und CO₂-Minimierung zusammengefasst.

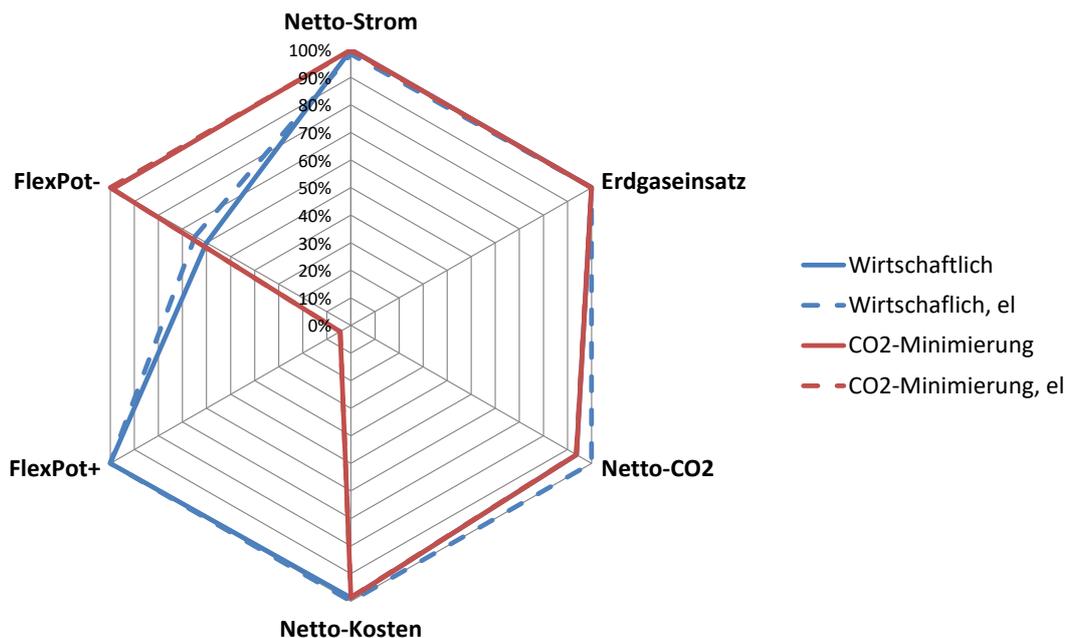


Abb. 11.15: Effekt des Einsatzes der Wasserelektrolyse zur negativen Flexibilitätsbereitstellung in den Nettokennzahlen für die Einsatzstrategien Wirtschaftlich und CO₂-Minimierung.

11.7 Fazit und Ausblick

Die Flexibilitätspotenziale eines Industrieparks mit einem Erzeugungspark zur Dampf- und Stromerzeugung ergeben sich durch mögliche Konfigurationen der verschiedenen Dampf- und Stromerzeugungsaggregate. Die Randbedingung einer gesicherten Dampfversorgung kann durch gasbefeuerte Heizkessel sichergestellt werden, sodass die wärmegeführten GuD-KWK-Anlagen des Industrieparks Freiheitsgrade in der Stromerzeugung erhalten und damit positive und negative Flexibilität bereitstellen können. Eine fiktive zukünftige Anlagenkonfiguration für den Industriepark Höchst wurde mit der Grenzkraftwerk Betrachtung für das Jahr 2030 mit einer stundenscharfen Zeitreihe des MONA Standard-Szenarios [3] untersucht. Für verschiedene Einsatzstrategien wurden die Wechselwirkungen zwischen CO₂-Emissionen, Betriebskosten und Flexibilität untersucht. Die verfügbaren Flexibilitätspotenziale und abgerufenen Flexibilitäten wurden abgeschätzt und auf Basis der Grenzkostenbetrachtung bewertet.

Der Unterschied zu bisherigen Arbeiten liegt in der Definition von Flexibilitätsbedarf, der nicht mehr auf Basis des Grenzkraftwerks, wie in [4], sondern von dem Einsatz von Speichertechnologien aus dem Modell abgeleitet wird.

Hierdurch ergibt sich ein deutlich komplexerer Hintergrund, gegenüber dem die Flexibilitätspotenziale der von fünf verschiedenen Einsatzstrategien bewertet wurden.

Weitergehend wurde die betrachtete Konfiguration um die Einsatzmöglichkeit eines idealen thermischen Speichers erweitert, der ein zusätzliches positives Flexibilitätspotenzial in den Sommermonaten erzeugt sowie um die Einsatzmöglichkeit einer Wasserelektrolyse, die ein zusätzliches negatives Flexibilitätspotenzial bereitstellen kann.

Insgesamt bleibt festzuhalten, dass eine betriebswirtschaftlich-optimale Einsatzstrategie (Wirtschaftlich) in Bezug auf Kosten einer vollflexiblen Fahrweise immer überlegen ist und dies zu positiven Kosten zur Flexibilitätsbereitstellung führt.

In Bezug auf CO₂-Emissionen führt der vollflexible Betrieb gegenüber allen Einsatzstrategien mit Ausnahme der Einsatzstrategie einer minimalen Stromerzeugung im Jahresdurchschnitt zu mehr Emissionen. Flexibilitätsabrufe führen daher in Summe über das Jahr zu mehr Emissionen als die jeweilige nicht-flexible Einsatzstrategie.

Der Einfluss weiterer Strompreisbestandteile (z.B. Netzentgelte, EEG-Umlage, etc.) lässt die Kosten für die Bereitstellung negativer Flexibilität stark ansteigen und wirkt somit hinderlich für eine Implementierung eines Angebots von negativer Flexibilität.

Der Einsatz von thermischen Speichern stellt einen Weg zur Erschließung eines zusätzlichen positiven Flexibilitätspotenzials in dieser Konfiguration dar. Die Auslegung des Speichers ist von der gewünschten Funktion abhängig. Eine Auslegung auf eine maximale Flexibilitätsbereitstellung wird schwierig werden. Bereits eine Auslegung, die das Abpuffern von Hoch- und Niedrigzeiten (Stundenspeicher) ermöglicht, kann die Flexibilitätsbereitstellungskosten deutlich senken.

Eine zusätzliche negative Flexibilitätsoption wird durch eine Wasserelektrolyse in der Konfiguration ermöglicht. Sie setzt aber die Abnahme des produzierten Wasserstoffs vor Ort voraus. In der gewählten Größe (14 MW, PEM) handelt es sich zwar um eine große Elektrolyseeinheit, ihre Leistung ist jedoch überschaubar in Bezug auf das Leistungsspektrum der GuD-Anlagen und der Elektrokessel.

11.8 Literatur

- [1] destatis 2018, Pressemitteilung Nr. 426 des Statistischen Bundesamtes vom 2. November 2018
https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2018/11/PD18_426_435.html
- [2] VCI-Roadmap 2019, Die Zukunft der chemischen Industrie, Frankfurt am Main, 2019
- [3] Samweber et al. 2017, Projekt Merit Order Netz-Ausbau 2030 (MONA 2030). Teilbericht Maßnahmenklassifizierung : Endbericht, November 2016. Stand: November 2016. München: FfE Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V. ISBN 978-3-941802-35-3 [Zugriff am: 3. April 2019].
Verfügbar unter: https://www.ffe.de/images/stories/publikationen/718_MONA_Massnahmenbericht/20170403_MONA_Teilbericht_Ma%C3%9Fnahmenklassifizierung.pdf
- [4] Energieflexibilität der deutschen Industrie, Hrsg.: A. Sauer, E. Abele, H. U. Buhl, Fraunhofer Verlag, 2019

12 FLEXIBILISIERUNG GASBEFEUERTER SINTER- UND BRENNÖFEN

Verantwortliche Autoren

Christian Dannert dannert@fg-feuerfest.de
 Forschungsgemeinschaft Feuerfest e. V. (FGF), Rheinstraße 58, 56203 Höhr-Grenzhausen

Jonas Fischer fischer@fg-feuerfest.de
 Forschungsgemeinschaft Feuerfest e. V. (FGF), Rheinstraße 58, 56203 Höhr-Grenzhausen

Olaf Krause krause@fg-feuerfest.de
 Forschungsgemeinschaft Feuerfest e. V. (FGF), Rheinstraße 58, 56203 Höhr-Grenzhausen

Hartmut Wuthnow wuthnow@fg-feuerfest.de
 Forschungsgemeinschaft Feuerfest e. V. (FGF), Rheinstraße 58, 56203 Höhr-Grenzhausen

12.1 Einleitung

In der keramischen und der Feuerfestindustrie sind weltweit gasbefeuerte Sinter- und Brennöfen im Einsatz. Darin erfolgt die Produktion keramischer Rohstoffe wie Schamotte, Sintertonerde, Sintermagnesia und Sintermullit. Auch die aus diesen Rohstoffen hergestellten keramischen Produkte wie Ziegel, Sanitärkeramik, Porzellan, technische Keramik und Feuerfestprodukte werden vorwiegend in Sinter- und Brennöfen unter Verwendung von Gas als Energieträger gebrannt.

Etwa 80 % der in der Feuerfestindustrie für die Produktion genutzten Energie wird durch Gas bereitgestellt. Feuerfestprodukte werden zum großen Teil in gasbefeuerten Öfen in Form von Durchschuböfen gebrannt, die Sintertemperaturen von bis zu 1800°C und Lebensdauern von 30 bis 50 Jahren erreichen. In diesen Prozessen ist das Brenngas nicht nur Lieferant thermischer Energie, sondern es stellt auch einen chemischen Reaktionspartner dar, mit dem die Ofenatmosphäre oxidierend, neutral oder reduzierend eingestellt werden kann.



Abb. 12.1: Tunnelofen zum Brand von Sanitärkeramik (links, Quelle: Eisenmann) und Herdwagenofen mit seitlicher Gasbefuerung (rechts, Quelle: Rath).



Die gebrannten Feuerfestprodukte kommen dann in Industriebereichen wie der Eisen- und Stahlindustrie, der Glas-, Zement-, Keramik- und der chemischen Industrie und im Energiesektor zum Einsatz.

Unter der Leitung der Forschungsgemeinschaft Feuerfest e. V. (FGF) wurden die Flexibilisierungspotenziale untersucht, die kontinuierlich gasbefeuerte Durchschuböfen zur Herstellung von Feuerfestprodukten aufweisen. Die Arbeiten hatten das Ziel, die zunächst nicht an bestimmte Energieträger gebundenen Potenziale zur energetischen Flexibilisierung von Sinter- und Brennöfen zu identifizieren.

Dabei wurde unterschieden, ob der heute flexibilisierbare Energieverbrauch durch Gas oder durch elektrische Energie abgedeckt wird. Nimmt man eine zumindest teilweise Hybridisierung der Aggregate durch den Einsatz elektrischer Energie anstatt Gas in der Zukunft an, so können auf Basis der Untersuchungen der Flexibilisierungspotenziale des Energieträgers Gas sofort Flexibilisierungspotenziale benannt werden, die bei der Hybridisierung von gasbefeuerten Sinter- und Brennöfen hin zu teilelektrischem Betrieb als elektrische Flexibilität zusätzlich zur Verfügung gestellt werden können.

Die Arbeiten der FGF wurden von den assoziierten Partnern

- Fa. KTS Kärlicher Ton- und Schamottewerke Mannheim & Co. KG / Mülheim-Kärlich (Produzent von Tonrohstoffen und gebrannter Schamottequalitäten) und
- Fa. Steuler Refractory Linings GmbH / Höhr-Grenzhausen (Hersteller feuerfester Werkstoffe und säurebeständiger Keramik)

unterstützt.

Die beteiligten Projektpartner aus dem SynErgie-Cluster V.6 [1] für die methodischen Arbeiten waren

- Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Stuttgart,
- Technische Universität München, Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik (TUM), München und
- Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH (WI), Wuppertal.

Auf Ebene der Industrieverbände waren der

- Verband der Deutschen Feuerfest-Industrie e. V., Höhr-Grenzhausen,
- Fachverband Biogas e. V., Düsseldorf und
- Bundesverband Keramische Industrie e. V., Selb

beteiligt.

12.2 Gas als Energieträger

Der Energieträger Gas steht in Deutschland momentan überwiegend als Erdgas L oder H zur Verfügung, in deutlich geringeren Mengen als Biomethan und Wasserstoff (H₂). Diese Gasmischungen, deren Qualität die Energieversorger entsprechend der DVGW-Arbeitsblätter G 260 „Anforderungen an die Beschaffenheit von Brenngasen der öffentlichen Gasversorgung“ und G 262 „Nutzung von Gasen aus regenerativen Quellen in der öffentlichen Gasversorgung“ überwachen [2], [3], werden in den industriellen Thermoprozessanlagen zum Sintern- und Brennen der keramischen Produkte unverändert verwendet.

Bei der Produktion keramischer und feuerfester Produkte können Möglichkeiten, die die **stoffliche** (siehe auch Kap. 12.4.1) und die **energetische** Flexibilisierung (siehe Kap. 12.4.2) bieten, genutzt werden.

Die **stoffliche** Flexibilisierung charakterisiert die Qualität des Brenngases, das neben dem Hauptbestandteil Methan aus dem fossilen Erdgas auch synthetische Gase und Gase aus regenerativen Quellen wie Wasserstoff und Biomethan enthalten darf.

Die verstärkte Zumischung von Gasen aus regenerativen Quellen wird das energetische Flexibilisierungspotenzial weiter erhöhen.

Insbesondere in Bezug auf Beimischungen von Wasserstoff zum Brenngas in größeren Anteilen muss in gasbefeuerten Sinter- und Brennöfen mit merklichen Veränderungen beim Brennwert, der Flammtemperatur und der Flammenlänge gerechnet werden. Zu den möglichen Auswirkungen auf die feuerfeste Zustellung von Brennöfen und die zu sinternden Produkte liegen bereits Forschungsergebnisse vor [4], [5].

Untersuchungen zur Verfügbarkeit von Brenngas (Kapitel 5) legten nahe, dass Brenngas auch in der Zukunft für industrielle Anwendungen als größtenteils verfügbar angesehen wird. Die **energetische** Flexibilisierung, also das Potenzial gasbefuerter Sinter- und Brennöfen, um schwankende Gasverfügbarkeit auszugleichen, wurde dennoch sorgfältig untersucht. Nimmt man eine zumindest teilweise Hybridisierung der Aggregate durch den Einsatz elektrischer Energie anstatt Brenngas in der Zukunft an, so können auf Basis der Untersuchungen der energetischen Flexibilisierungspotenziale des Energieträgers Gas sofort Flexibilisierungspotenziale benannt werden, die bei der Hybridisierung von gasbefeuerten Sinter- und Brennöfen hin zu teilelektrischem Betrieb als elektrische Flexibilität zusätzlich zur Verfügung gestellt werden können.

Ein Steckbrief zum Thema „Gas“ wurde von der Forschungsstelle für Energiewirtschaft (FFE) erstellt (Kapitel 4). Darin wird in 3 Anforderungsprofilen auf die unterschiedliche Qualität der Brenngase und ihre Verfügbarkeit sowie ihren Einfluss auf das Hybridisierungspotenzial eingegangen.

12.3 Produktion keramischer Rohstoffe und Feuerfestprodukte

12.3.1 Herstellung von Schamotterrohstoffen für die Feuerfestindustrie in einem gasbefeuerten Durchschubofen und ihre Flexibilitätspotenziale

Zur Herstellung keramischer Produkte und feuerfester Erzeugnisse für hohe Anforderungen (hohe Betriebstemperaturen, lange Lebensdauern) sind neben natürlichen Rohstoffen synthetische Rohstoffe mit genau reproduzierbaren Eigenschaften erforderlich. Solche synthetischen Rohstoffe durchlaufen bei ihrer Herstellung einen Sinterprozess, der zumeist in oxidierender Ofenatmosphäre erfolgt. Schamotte ist ein solcher synthetischer calcinierter Rohstoff, der aus natürlich vorkommenden Tonen bei Sinteremperaturen von 850 – 1.250 °C hergestellt wird. Dieser Schlüsselproduktionsprozess wird von der Fa. KTS Kärlicher Ton- und Schamottewerke Mannheim & Co. KG / Mülheim-Kärlich (KTS) betrieben [6]. Die Sinterprozesse zur Herstellung von Schamottequalitäten erfolgen in gasbefeuerten Durchschuböfen in oxidierender Atmosphäre.

Die Rohstoffe zur Herstellung von Schamotte werden in Tongruben gewonnen und bei KTS in einem Tonlager mit etwa 400 t Fassungsvermögen entsprechend der herzustellenden Qualität aufbereitet und 3 Tage zum Mauken belassen. Aus dieser grubenfeuchten Masse werden Batzen von etwa 10 kg Gewicht mit einer Strangpresse gepresst und auf Ofenwagen gesetzt. Es können 20 Tunnelofenwagen vor dem nachfolgenden Trockner mit Batzen als Pufferspeicher bestückt werden.

Das Trocknen geschieht im Durchlauftrockner im Abgasstrom des Durchschubofens bei maximal etwa 200 °C. Danach erfolgt der Sinterbrand zur Schamotte in einem gasbefeuerten Durchschub-



Abb. 12.2: Gepresste Batzen zum Schamottebrand (Quelle: KTS).

öfen (Tunnelöfen) mit 80 % Auslastung in oxidierender Atmosphäre. In der Brennzone wird eine Reihe von Brennern mit Brenngas aus dem Gasnetz betrieben. Das Produkt wird auf den Ofenwagen durch den Brennöfen geschoben.



Die gebrannte Schamotte wird mittels Brechern und Mahlaggregaten zerkleinert und kann ohne Qualitätsverlust gelagert werden. Die Lagerkapazität für die gebrannten Schamottequalitäten bei KTS beträgt 4.000 t.

Abb. 12.3: Schematische Darstellung des Durchschubofens zum Brennen von Schamotterohstoffen (Massenstrom bezogen auf 100 t Edukt).

Typischerweise werden etwa 50 t gebrannte Schamotte/Tag als Produkt hergestellt, was einer Jahresmenge von etwa 20.000 t entspricht. Der Gasverbrauch beläuft sich dabei auf 200 kWh Gas/t Produkt. Dieser Betrieb entspricht einer typischen Auslastung von 80 %.

Elektrische Energie wird im Werk zur Prozesssteuerung, zum Betrieb der Strangpresse, für die Ventilatoren zur Strömungsführung im Durchschubofen und zum Betrieb der Brecher und Mahlaggregate benötigt.

Bei dem Durchschubofen zur Schamotteproduktion ist eine Reihe von energetischen Flexibilitätspotenzialen (bei der Nutzung des Energieträgers Gas, in Zukunft damit übertragbar auf den Energieträger Strom bei teilweiser Hybridisierung, siehe oben) identifiziert worden.

Tabelle 12.1: Flexibilitätspotenziale des Durchschubofens zur Herstellung von Schamotterohstoffen

	Komplettabschaltung	Absenkung der Ofentemperatur	Maximalproduktion	Minimalproduktion
Lastverzicht / Lasterhöhung	-0,97 MW (bei Vollaustattung)	-0,8 MW (bei Vollaustattung)	+0,2 MW (bei 80 % Auslastung)	-0,7 MW (bei 80 % Auslastung)
Aktivierungsdauer	keine	keine	keine	keine
Maximale Abrufdauer	>> 5 Tage	> 5 Tage	>> 5 Tage	>> 5 Tage
Nachholzeit	5 Tage anfahren plus 4x Abrufdauer bei 80 % Auslastung	0,5 Tage Ofen hochfahren plus 4x Abrufdauer bei 80 % Auslastung	Keine	2,5x Abrufdauer bei 80 % Auslastung
Abrufhäufigkeit	6x/Jahr (nicht bei 100 % Auslastung)	Beliebig oft (nicht bei 100 % Auslastung)	Beliebig oft (nicht bei 100 % Auslastung)	Beliebig oft

Eine Lastverringerng durch **Komplettabschaltung** (entsprechend einem energetischen Flexibilisierungspotenzial von ca. 970 kW) des Durchschubofens ist über einen Zeitraum von einer bis zu maximal 8 Wochen möglich. Aus technischer Sicht (ohne Berücksichtigung von Lieferverpflichtungen) kann dies mit einer Vorankündigungszeit von weniger als einer Stunde geschehen. Der Ofen benötigt nach einer Vollabschaltung etwa 5 Tage Anfahrzeit mit zusätzlichem Personalaufwand, bis er wieder betriebsbereit ist. Die Komplettanschlaltung kann also grundsätzlich sowohl mit kurzen als auch mit längeren Vorankündigungszeiten erfolgen (Anforderungsprofile 1, 2 und 3 [1]), allerdings nur wenn die Produktlager so ausreichend gefüllt sind so dass alle Lieferverpflichtungen eingehalten werden können. Die Nachholzeit setzt sich zusammen aus 5 Tagen Anfahrzeit zum Erreichen der Sintertemperatur von 1250 °C und der nachfolgenden Nach-Produktion bei einer Auslastung von dann 100 %. Entsprechend ist die Lastverringerng durch Komplettabschaltung bei hoher Kundennachfrage und Betrieb des Durchschubofens bei 100 % Auslastung nicht möglich, da die ausgefallene Produktion nicht nachgeholt werden kann. Die Komplettabschaltung kann aus technischen Gründen nur 6x im Jahr erfolgen und wird vermieden, da die feuerfeste Zustellung bei jeder Vollabschaltung geschädigt wird (also möglichst Anforderungsprofile 1 und 2 nicht bedienen).

Die Lastverringerng mit **Absenkung der Ofentemperatur** von ca. 1.250 °C auf 800 bis 900 °C über mehrere Stunden bis Tage ist beliebig oft möglich. Hierbei wird ein Flexibilisierungspotenzial von 800 kW bereitgestellt, bei kurzen Vorankündigungszeiten (Anforderungsprofile 1, 2 und 3). Bei abgesenkter Ofentemperatur wird die Produktion eingestellt, da keine Tunnelofenwagen mehr durch das Brennaggregat geschoben werden. Im abgesenkten Betrieb muss die Ofentemperatur von Hand geregelt werden. Für die Nachholzeit und die Einschränkungen gelten die Beschreibung der Komplettabschaltung. Die wesentlichen Vorteile gegenüber der Komplettabschaltung ist, dass die Nachholzeit geringer ist (0,5 Tage anstatt 5 Tage plus Nach-Produktion) und die Abrufhäufigkeit viel größer ist, da die feuerfeste Zustellung bei einer Absenkung der Ofentemperatur nicht beschädigt wird.

Bei einer normalen Auslastung der Produktion von 80 % ist es ohne Vorlaufzeit möglich, eine Lasterhöhung von 200 kW durch Wechsel auf **Maximalproduktion** bereitzustellen. Eine solche Lasterhöhung bei bereits 100 % Auslastung folglich ist nicht möglich. Die Lasterhöhung wird erreicht, indem mehr Ofenwagen pro Tag durch den Durchschubofen gefahren werden. Das Temperaturprofil im Durchschubofen muss dafür nicht angepasst werden. Die Erhöhung kann ohne Vorankündigungszeit beliebig oft über einen kurzen oder auch längeren Zeitraum erfolgen und ist zum Auffüllen des Lagers oder für eine Überproduktion von Schamotteprodukten geeignet. Die feuerfeste Auskleidung wird durch die Lasterhöhung nicht geschädigt. Die Maximalproduktion erfüllt somit die Anforderungen der Profile 1, 2 und 3.

Bei einer normalen Auslastung der Produktion von 80 % ist es ohne Vorlaufzeit möglich, eine Lastverringerng von 700 kW durch Wechsel auf **Minimalproduktion** bereitzustellen. Die Höhe der Lastverringerng ist durch die vorherige Auslastung und den Energiebedarf bei der Minimalproduktion definiert. Der Lastverzicht kann ohne Aktivierungsdauer beliebig oft und über einen kürzeren oder auch längeren Zeitraum erfolgen (Anforderungsprofile 1, 2 und 3). Jedoch setzt er voraus, dass die Produktlager ausreichend gefüllt sind, um Lieferverpflichtungen erfüllen zu können.

12.3.2 Herstellung von Feuerfestprodukten (Bauxitsteine) in einem gasbefeuerten Durchschubofen und ihre Flexibilitätspotenziale

Die Fa. Steuler Refractory Linings [7] ist Produzent feuerfester Werkstoffe und säurebeständiger Keramik. In ihren Werken werden die Produkte in gasbefeuerten Tunnelöfen (Durchschuböfen) bei Sinteremperaturen zwischen 1.300 und 1.800 °C gebrannt. Die Sinteremperatur ist abhängig von der Art und Qualität des Feuerfestproduktes.

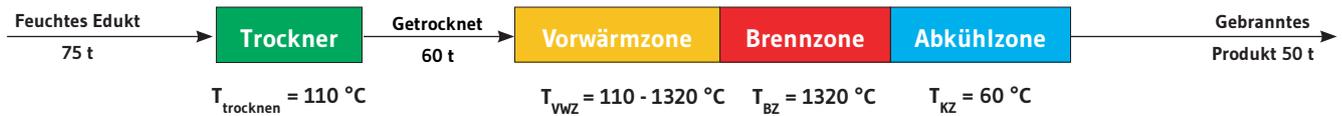


Abb. 12.4: Hochwertige Feuerfestprodukte für die Unterguss-Gespannzustellung (Quelle: Steuler Refractory Linings).

Das bei Fa. Steuler Refractory Linings hergestellte Feuerfestprodukt Bauxitstein wird in unterschiedlichen Formaten in Durchschuböfen bei 1.450 °C unter Verwendung von Gas als Energieträger gebrannt.

Der Herstellungsprozess von Bauxitsteinen ähnelt dem von Schamotte im Prinzip. Dabei werden die Rohstoffe gemischt und in Hydraulikpressen zu „grünen“ (d. h. ungebrannten) Steinen in unterschiedlichen Formaten gepresst. Danach werden die grünen Steine auf Tunnelofenwagen gesetzt und mit Abluft aus dem Brennprozess bei etwa 110 °C in einem kontinuierlichen Prozess in Durchlauf-trockenkammern getrocknet.

Der Sinterbrand dieser Steine mit mullitisierter Matrix erfolgt mit etwa 2 t Besatz pro Tunnelofenwagen im kontinuierlichen Prozess bei 1320 °C. Die Jahreskapazität beträgt etwa 10.000 t bei 80 % Auslastung. Der Energiebedarf beträgt dabei etwa 750 kWh / t Produkt in Form von Gas.



Die Produktionsstätte verfügt über Speicher bzw. Lagermöglichkeiten für mehr als 3.000 t Rohstoffe, 200 t Vorprodukte unterschiedlicher Formate und etwa 3.000 t Fertigprodukte.

Im Werk werden Förderfahrzeuge, Mischer, Pressen, Ventilatoren und die Regeltechnik mit elektrischer Energie betrieben.

Bei der Herstellung von Bauxitprodukten im Durchschubofen sind energetische Flexibilitätspotenziale (bei der Nutzung des Energieträgers Gas, in Zukunft damit übertragbar auf den Energieträger Strom bei teilweiser Hybridisierung, siehe oben) identifiziert worden.

Abb. 12.5: Schematische Darstellung des Durchschubofens zum Brennen von Bauxitsteinen (Massenstrom bezogen auf 75 t Edukt)

Tabelle 12.2: Flexibilitätspotenziale des Durchschubofens zur Herstellung von Bauxitprodukten

	Komplettabschaltung	Lastverzicht	Lasterhöhung
Lastverzicht/Lasterhöhung	-1,56 MW	-0,78 MW	+0,39 MW
Aktivierungsdauer	15 Minuten	keine	15 Minuten
Maximale Abrufdauer	6 Stunden	mehrere Tage	3-4 Tage
Nachholzeit	30 Stunden bei 80 % Auslastung	>> 5 Tage durch Nach-Produktion (bei 80 % Auslastung)	keine
Abrufhäufigkeit	Beliebig oft (nicht bei 100 % Auslastung)	Beliebig oft (nicht bei 100 % Auslastung)	Beliebig oft (nicht bei 100 % Auslastung)

Eine **Komplettabschaltung** mit vollständigem Lastverzicht (Fall 1) mit einem energetischen Flexibilitätspotenzial von 1,56 MW ist für die Dauer von 6 Stunden beliebig oft möglich, wenn die Produktionsauslastung nicht 100 % beträgt und die Ofentemperatur dabei nicht unter 1320 C fällt. Die Vorlaufzeit beträgt 15 Minuten. Um die Produktion danach wieder zu beginnen, muss die Sinter-temperatur wieder erreicht werden. Die Nachholzeit dafür beträgt etwa 30 Stunden. Jede so starke Lastverringerng verursacht Schäden an der feuerfesten Zustellung des Durchschubofens.

Ein **Lastverzicht** um bis zu 50 % durch Verringerung der Menge des gebrannten Produkts ist ohne Qualitätseinbußen des Produkts möglich, wenn im Anschluss an die Lastverminderung der entstandene Produktionsausfall durch eine Phase der Lasterhöhung nachgeholt werden kann. Eine Lastverminderung ist folglich nicht möglich, wenn die Auslastung des Durchschubofens vor der Phase der Lastverminderung bereits bei 100 % lag. Das energetische Flexibilitätspotenzial beträgt bis zu 780 kW. Diese Maßnahme kann ohne Aktivierungsdauer beliebig oft erfolgen. Die Dauer der Hochfahrzeit ohne Produktion und mit entsprechend hohem Verbrauch an Energie beträgt mehrere Tage. Jede so starke Lastverringerng mit anschließender Lasterhöhung führt zu Schäden an der feuerfesten Zustellung des Durchschubofens.

Eine **Lasterhöhung** (Fall 3) kann sofort vorgenommen werden, wenn die Produktion nicht bereits zu 100 % ausgelastet ist. Bei 80 % normaler Auslastung können nach kurzer Aktivierungsdauer 390 kW zusätzlich abgenommen werden und dieser Zustand 3-4 Tage lang erhalten werden. Dafür muss ausreichend freie Lagerkapazität für die Bauxitprodukte im Werk vorhanden sein.

12.3.3 Erfassung jahreszeitlicher Einflüsse auf die Flexibilitätspotenziale der Durchschuböfen

Zur Produktion der gebrannten **Schamotte** werden Tone benötigt, die in natürlichen Tonlagerstätten gewonnen werden. Sie können nicht vor besonderen jahreszeitlichen Einflüssen geschützt werden, zu denen vor allem extreme Temperatur- und Feuchteunterschiede zählen. Diese wirken sich, soweit sie nicht behoben werden können, letztendlich auf die Produktion der Schamottesorten in Durchschuböfen aus. Während einer längeren Frostperiode, wie sie in den vergangenen etwa 6 Jahren einmal vorgekommen ist, kristallisiert die Feuchte im Ton zu Eis. Da die Rohstoffe dann nicht mehr verarbeitet werden können, wird die Produktion im Durchschubofen zum Erliegen kommen, sobald die Vorräte an verarbeitbarem Ton aufgebraucht sind. In diesem Fall kann auch keine Flexibilität mehr angeboten werden. Der Einsatz von elektrischen Heizungen oder Wärmestrahlern zum Auftauen der gefrorenen Tonbrocken oder die Beheizung der Aufbereitungsaggregate erscheint aus heutiger Sicht als wirtschaftlich nicht lohnend.

Zur Produktion von **Bauxitsteinen** werden Rohstoffe eingesetzt, die in größeren Chargen ins Werk geliefert und dort gelagert und aufbereitet werden. Da sie vor jahreszeitlich bedingten Einflüssen wie extremer Feuchte, Hitze oder Kälte geschützt sind und die Produktion kontinuierlich läuft, haben die Jahreszeiten keine Einflüsse auf die Produktion von Bauxitsteinen und damit auf die Flexibilitätspotenziale.

Im Falle der Produktion von **Ziegelerzeugnissen** (Kapitel 12.5), zu der natürliche Rohstoffe aus einer geologischen Lagerstätte verwendet werden, gelten ähnliche Abhängigkeiten wie bei der Schamotteteherstellung. Die diesbezüglich erkannten jahreszeitlichen Einflüsse auf die Rohstoffe wirken sich direkt auf das Flexibilitätspotenzial der Durchschuböfen aus.

12.4 Hybridisierungspotenzial und Elektrifizierung

12.4.1 Stoffliche Hybridisierung

Neben Biogas aus regenerativen Quellen werden Wasserstoff und synthetisch hergestelltes Methan dem Gasnetz zugemischt (Kapitel 5) und von den industriellen Verbrauchern zur Befuerung von Durchlauföfen und weiteren Brennaggregaten ohne weitere Aufbereitung verwendet. Eine stoffliche Hybridisierung findet automatisch in dem Umfang statt, in dem regenerativ erzeugte Gase ins Gasnetz eingespeist und zur Befuerung von Durchlauföfen aus dem Gasnetz entnommen werden.

Solange die Gasqualität den Anforderungen der DVGW-Arbeitsblätter entspricht, wird davon ausgegangen, dass weder die Prozessführung noch die Qualität der Sinter- bzw. Brennprodukte beeinträchtigt werden.

Mit Blick auf das künftige stoffliche Hybridisierungspotenzial lassen sich 3 stoffliche Anforderungsprofile erstellen.

1. Anforderungsprofil 1: Im Gasgemisch ist ein konstanter Volumenanteil von erneuerbaren Gasen enthalten.
2. Anforderungsprofil 2: Im Gasgemisch ist ein schwankender Volumenanteil von erneuerbaren Gasen enthalten. Der führt zu planbaren Schwankungen in der Gasbeschaffenheit und wird den Verbrauchern mit 1 Stunde Vorankündigungszeit mitgeteilt.
3. Anforderungsprofil 3: Im Gasgemisch ist ein schwankender Volumenanteil von erneuerbaren Gasen enthalten. Der führt zu nicht planbaren Schwankungen in der Gasbeschaffenheit und wird den Verbrauchern kurzfristig mitgeteilt.

Im Fall des **Anforderungsprofils 1** erwarten die Betreiber eines Durchlaufofens keine Probleme. Der Brennprozess des Ofens und die Brennerregelung werden einmalig bei Inbetriebnahme oder im

Rahmen von regelmäßigen Kontrollen auf die übliche bewährte Gaszusammensetzung eingestellt, so dass die Produktion gesichert ablaufen kann. Hier besteht kein Bedarf an einer Gasanalytik und einer Regeltechnik für die Brenner.

Sollte der Anteil von erneuerbaren Gasen im Gasgemisch (**Anforderungsprofil 2**) schwanken, aber den Betreibern eines Durchlaufofens mit einer Stunde Vorlaufzeit mitgeteilt werden, so können sie manuell in die Regeltechnik eingreifen und die Brenner auf die geänderte Gaszusammensetzung einstellen, so dass die Produktion gesichert ist und weder Ofen noch Brenner Schaden nehmen. Der Ofen muss aber mindestens mit einer Regeltechnik für die Brenner ausgestattet sein. Es muss entsprechend geschultes Personal vor Ort sein.

Wenn jedoch größere Mengen an Wasserstoff „en bloc“ durch das Gasnetz strömen und nur unzureichend mit dem Erdgas vermischt werden (**Anforderungsprofil 3**), verändern sich die Brenneigenschaften und damit die thermischen Einflüsse auf das Brenngut. Aus wissenschaftlichen Untersuchungen ist bekannt [5], dass höhere Anteile an H_2 zu einer Überfeuerung silikatischer Produkte wie beispielsweise Baukeramik oder Brennhilfsmittel führen könnten. In diesem Fall benötigen die Betreiber eines Durchlaufofens zur Sicherstellung des erforderlichen Brennregimes eine geeignete Messtechnik, um die Qualität des Brenngases zu analysieren, und eine nachgeschaltete Regeltechnik, die die Brennerregelung anzupassen.

Wenn alle gasbefeuerten Sinter- und Brennöfen mit entsprechender Mess- und Regeltechnik ausgestattet wären, könnte das Hybridisierungspotenzial voll ausgeschöpft und Gase aus erneuerbaren Quellen den Anteil des fossilen Erdgases reduzieren. Die Kosten dafür betragen ab ca. 10.000 Euro pro Messstelle.

12.4.2 Energetische Hybridisierung

Unter energetischer Hybridisierung wird die (zumindest teilweise) Nutzung von elektrischer Energie in bislang ausschließlich mit dem Energieträger Gas beheizten Durchlauföfen verstanden.

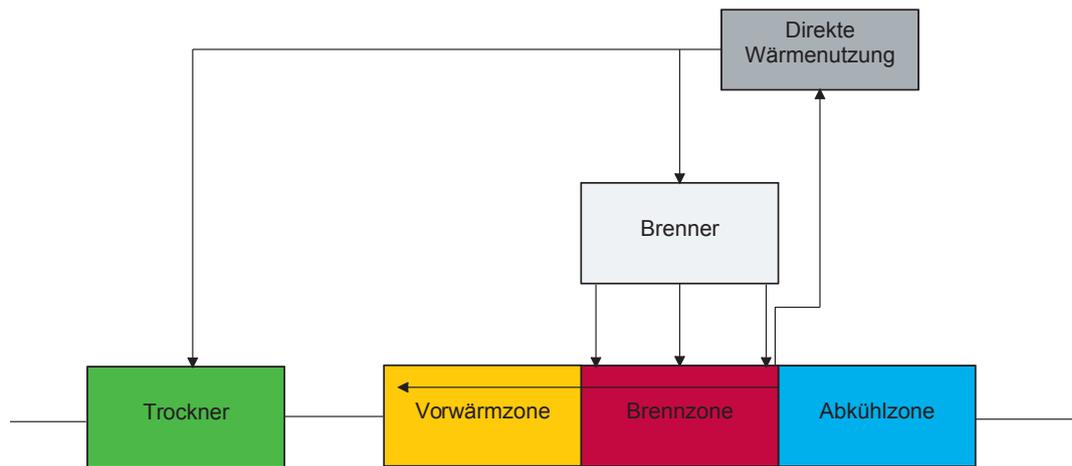
Dabei soll ein Hybridisierungspotenzial oder Hybridisierungsgrad (in Prozent) angeben, welchen Anteil der Energieeintrag in die Sinter- und Brennprozesse in Durchlauföfen mittels elektrischer Energie annehmen kann. Da die Gesamt-Energieverbräuche (Energieträger Gas) in kJ/kg gesintertem bzw. gebranntem Produkt und die Energieverbräuche (Energieträger Gas) in der Feuerfestindustrie grundsätzlich bekannt sind, kann so der mittels Hybridisierung erreichbare Energieverbrauch des Energieträgers Strom berechnet werden.

Auf Basis der in den vorhergehenden Kapiteln untersuchten Potenziale zur Flexibilisierung des Energieverbrauchs von Durchlauföfen - betrachtet für den Energieträger Gas, doch auf Basis der in diesem Kapitel berichteten Untersuchungen grundsätzlich (zumindest teilweise) hybridisierbar - können so positive und negative Flexibilitätspotenziale für den Energieträger Strom beim Betrieb von hybridisierten Durchlauföfen abgeschätzt werden (Kapitel 7).

Die im Folgenden betrachteten Hybridisierungsoptionen, die auch einen Wechsel des Energieträgers einbeziehen, dürfen den Industrieprozess jedoch nicht beeinträchtigen.

In den betrachteten Sinter- und Brennprozessen ist eine direkte Wärmenutzung der Abwärme aus dem Herstellungsprozess von Schamotterrohstoffen und von Bauxitprodukten am Ende der Brennzone bereits üblich. Zur Abkühlung der gebrannten Produkte wird im Gegenstrom zum Produkt kalte Luft am Ende der Abkühlzone in den Ofen eingeblasen, die über die Produkte strömt. Der so aufgeheizte Luftstrom wird am Übergang zwischen Brennzone und Abkühlzone abgezogen und dient zum Trocknen des feuchten Brennguts im Trockner und zur Erwärmung der Verbrennungsluft der Brenner. Im Ofen selbst dient die Warmluft zum Erwärmen der Brennprodukte in der Vorwärmzone im Gegenstrom. Durch diese Art der Energienutzung kann auf externe Lufterwärmung verzichtet werden.

Abb. 12.6: Energieströme bei direkter Wärmenutzung für Trockner und Verbrennungsluft.



Zur weiteren Hybridisierung von Durchlauföfen ist eine Reihe von Möglichkeiten identifiziert worden, die zu einer verstärkten Nutzung von elektrischer Energie zur Erzeugung und Bereitstellung von Prozesswärme führen.

Hybridisierung der bisher direkten Wärmenutzung

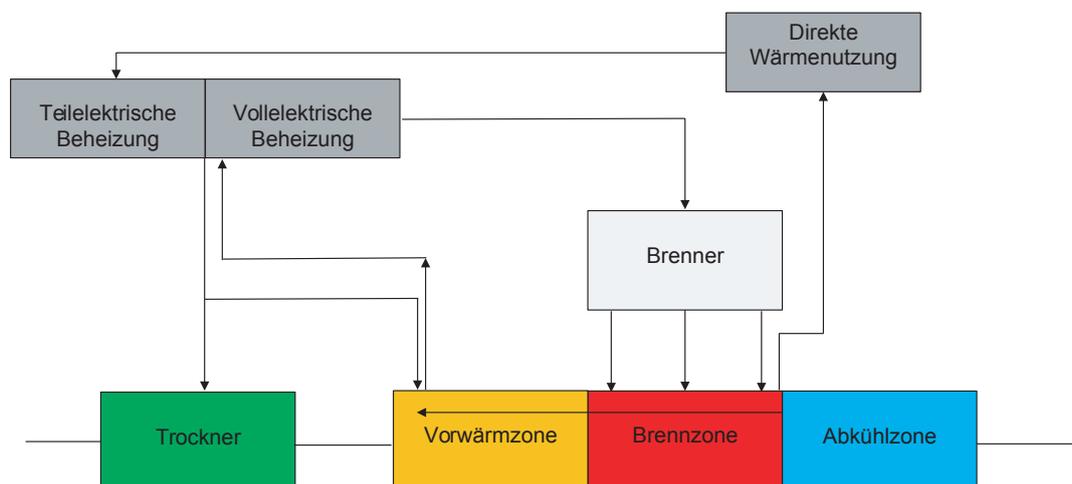
Bei größerem Bedarf an vorgeheizter Verbrennungsluft erscheint es besonders effektiv, mit Hilfe von elektrischer Energie den Bedarf an vorgewärmter Brennluft abzudecken. Diese Luft kann mit geeigneten Brennertypen direkt zur Befuerung verwendet werden. Auch ein größerer Bedarf an Wärme für den Trockner kann durch elektrische Zusatzheizung gedeckt werden.

Zur Schaffung zusätzlicher Flexibilität könnte auch im Trockner elektrisch zugeheizt bzw. der Trockner gänzlich auf elektrischen Betrieb eingestellt werden. Durch diese teil- bzw. vollelektrische Beheizung kann der Trockner vom Ofen abgekoppelt und als unabhängiges Aggregat im Brennprozess betrieben werden. Dies ist insbesondere bei Brennprozessen mit niedrigen Temperaturen (z.B. Ziegelerzeugnisse) attraktiv, da dort generell nur geringe Mengen an Wärme aus dem Prozess für die Trocknung zur Verfügung stehen.

Auf die gleiche Art und Weise könnte auch der niedrige Temperaturbereich in der Vorwärmzone des Sinterofens mit thermischer Energie versorgt werden. Eine Zu- bzw. Vollbeheizung erscheint hier möglich.

Größere Mengen an Warmluft, die den Ofen aus der Vorwärmzone verlassen, lassen sich elektrisch aufheizen und dem Trockner bzw. dem Brenner zuleiten.

Abb. 12.7: Teil- und vollelektrische Beheizung von Trockner, Vorwärmzone und der Verbrennungsluft.



Thermische Speicher

Wenn aus dem Brennprozess ein Überschuss an Wärme ansteht und nicht gleich als beispielsweise Verbrennungsluft abgerufen wird, besteht die Möglichkeit, sie in einem Wärmespeicher zu lagern und bei Bedarf abzurufen. Ein thermischer Speicher bietet sich auch an, um in Zeiten günstiger elektrischer Energie den Speicher zu laden und zu gegebener Zeit die Wärme abzurufen. Hiermit würde die Wärmebereitstellung im Produktionsprozess flexibilisiert (Kapitel 3).

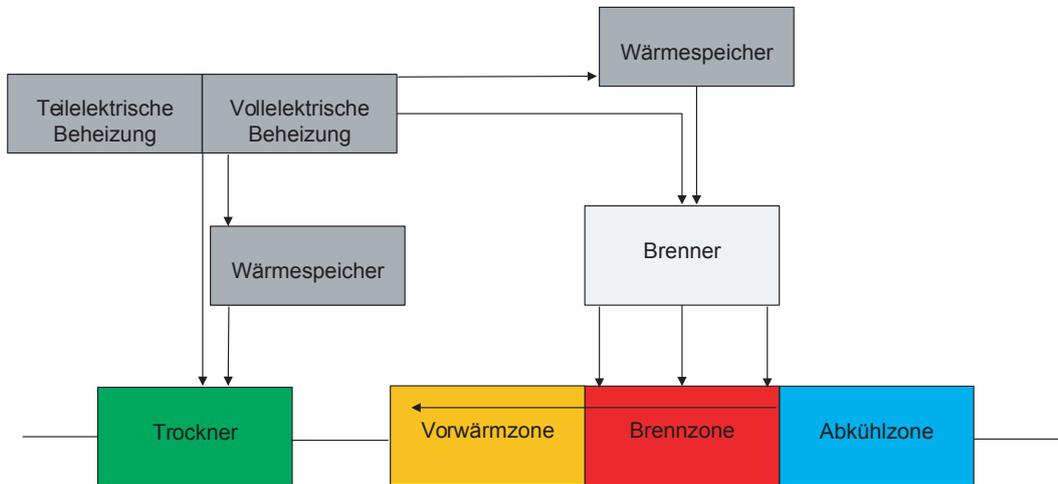


Abb. 12.8: Hybridisierung durch thermischen Speicher.

Regenerator

Ein sehr großer Überschuss an Wärme könnte, vor allem an älteren Sinter- und Brennöfen, in einem Regenerator wie an einer Glasschmelzanlage zwischen gespeichert und zur Vorwärmung der Verbrennungsluft verwendet werden.

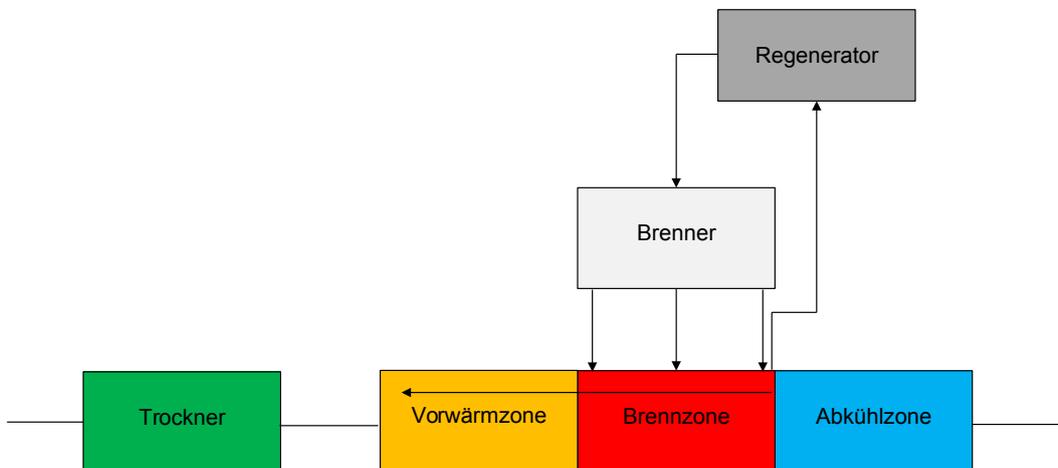


Abb. 12.9: Integration eines Regenerators in den Energiefluss.

Solch ein Zusatzaggregat würde in deutlich geringerer Dimensionierung und nur dann installiert werden, wenn die Energie- und Wärmeflüsse ein entsprechend hohes Potenzial zur Verfügung stellen und sich eine Investition rechnet.

Vollelektrische Erwärmung und Beheizung

Die Lebensdauer der untersuchten Thermoprozessanlagen beträgt 30-50 Jahre. Nach den bisherigen Untersuchungen können Fortschritte bei der Energieflexibilisierung erreicht und bestehende Anlagen durch Nachrüstung dazu ertüchtigt werden. Eine vollelektrische Beheizung von neu gebauten Durchlauföfen scheint im Trockner, in der Vorwärmzone, zur Vorwärmung der Verbrennungsluft und zum Speisen thermischer Speicher möglich zu sein.

12.5 Übertragbarkeit der Flexibilitätsoptionen auf andere Brennaggregate in der keramischen Industrie (Ziegelindustrie)

Die Ergebnisse der Untersuchung der Flexibilitätsoptionen und die Identifikation von Flexibilitäts-potenzialen gasbefeuerter Öfen in der Feuerfestindustrie sind in der gesamten Branche der keramischen Industrie (z.B. Ziegel, Fliesen, Sanitärkeramik, Porzellan, technische Keramik) von hohem Nutzen, da hier gasbefeuerte Sinter- und Brennöfen in unterschiedlichen Größen eingesetzt werden.



Abb. 12.10: Getrocknete (links) und gebrannte Ziegel (rechts) am Ofenausgang (Quelle: Ziegelwerk Ott).

Zur Verifizierung der Übertragbarkeit der erarbeiteten Methoden zur Ermittlung des Flexibilisierungspotenzials auf vergleichbare Aggregate zur Herstellung weiterer keramischer Produkte ist eine vergleichbare Thermoprozessanlage aus der Ziegelindustrie [8] analysiert worden. Zur Herstellung von Ziegeln im Ziegelwerk Ott/Überlingen-Deisendorf werden aus einer Mischung aus Tonen und Zuschlagstoffen Ziegelprodukte abgeformt.

Sie werden auf Tunnelofenwagen gesetzt und in Kammer-trocknern mit der Abwärme aus dem Ziegelbrand bei Temperaturen von etwa 110 bis 120 °C getrocknet. Aufgrund ausreichendem Platzangebot im Werk können 30 Wagen aufVorratgesetzt werden. Im Durchschubofen erfolgt nach der Vorwärmzone bei 130-180 °C die Sinterung der Ziegelprodukte bei Temperaturen von etwa 800-960 °C. Nach dem Abkühlen verlassen die Produkte den Ofen mit etwa 60 °C.



Abb. 12.11: Schematische Darstellung des Durchschubofens zum Brennen von Ziegeln (Massenstrom bezogen auf 215 t Edukt).

Die Abluft aus der Brennzone gelangt über die Nachverbrennung in den Trockner. Sie wird zum Trocknen der Grünlinge und zum Vorwärmen der Verbrennungsluft verwendet. In der kalten Jahreszeit werden auch Rohstoffe vorgewärmt.

Die Gasversorgung wird als gesichert angesehen. Über Veränderungen in der Gaszusammensetzung durch Zumischung von Gasen aus regenerativen Quellen und synthetischen Gasen ist man informiert, hat aber selbst noch keine Auswirkungen auf die Produkte erkannt. Eine Mess- und Regeltechnik ist z. Z. nicht am Ofen installiert.

Die im Falle der Schamotteherstellung und der Bauxitproduktion identifizierten Flexibilitätsoptionen sowie die Aspekte der Hybridisierung wie der teilelektrischen bzw. vollelektrischen Zusatzheizung der Trockner- sowie der Verbrennungsluft der Brenner, der Warmluft für die Vorwärmzone und der Beheizung eines thermischen Speichers wurden bezüglich der Übertragung auf Durchlauföfen für die Ziegelproduktion analysiert und wurden als vollständig übertragbar identifiziert.

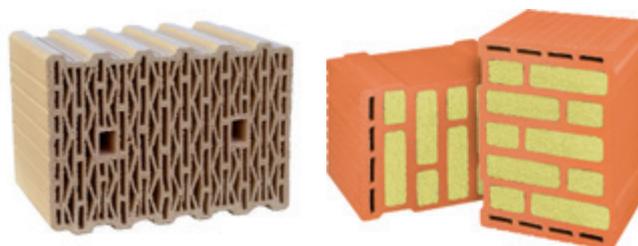


Abb. 12.12: Ziegelprodukte Klimatherm PL 9 (links) und ThermoPlan MZ80-G (Quelle: Ziegelwerk Ott).

12.6 Fazit und Ausblick

Die Untersuchungen zur Flexibilisierung gasbefuerter Sinter- und Brennöfen lassen Potenzial zur Verwendung von elektrischer Energie

- als Zusatzheizung im Trockner,
- in der Vorwärmzone,
- zum Erwärmen der Verbrennungsluft für die Brenner und
- zum Heizen eines thermischen Speichers

erkennen.

Bei den langen Lebensdauern der untersuchten Thermoprozessanlagen von etwa 30-50 Jahren können technische Neuerungen zur Hybridisierung gasbefuerter Sinter- und Brennöfen im Rahmen von Nachrüstungen vorgenommen werden.

Der teilweise Umstieg von fossilen Brennstoffen hin zur Nutzung von Gasen aus regenerativen Quellen und von synthetischen Gasen ist bereits im Gange.

Szenarien zum schrittweisen Umstieg auf Hybridlösungen oder der teilelektrische bzw. der voll-elektrische Betrieb wurden untersucht und stehen den Anlagenbauern prinzipiell zur Evaluierung zur Verfügung. Sie müssen noch mit betriebswirtschaftlichen Anforderungen abgeglichen werden.

12.7 Danksagung

Die Autoren danken den Industrieunternehmen Fa. KTS, Fa. Steuler Refractory Linings und Fa. GKT für die Auskünfte und Informationen sowie die Begehungen vor Ort.

Dem GWI e. V., der Fa. Ziegelwerk Ott, dem VDFFI e. V., dem BVKI e. V. und dem FV Biogas e. V. danken die Autoren für die Informationen, Auskünfte und Diskussionen.

12.8 Literatur

- [1] Ausfelder, F., Seitz, A, von Roon, S. (Hrsg.), Februar 2018. Flexibilitätsoptionen in der Grundstoffindustrie. Methodik, Potenziale, Hemmnisse: Bericht des AP V.6 „Flexibilitäts-optionen und Perspektiven in der Grundstoffindustrie“ im Kopernikus-Projekt „SynErgie - synchronisierte und energieadaptive Produktionstechnik zur flexiblen Ausrichtung von Industrieprozessen auf eine fluktuierende Energieversorgung“. Frankfurt am Main 2018. Verfügbar unter: [https://www.ffegmbh.de/attachments/article/645/Flexibilitaetsoptionen in der Grundstoffindustrie.pdf](https://www.ffegmbh.de/attachments/article/645/Flexibilitaetsoptionen%20in%20der%20Grundstoffindustrie.pdf)
- [2] Technische Regel - Arbeitsblatt DVGW G260 (A): Anforderungen an die Beschaffenheit von Brenngasen der öffentlichen Gasversorgung, Bonn 2013.
- [3] Technische Regel - Arbeitsblatt DVGW G262: Nutzung von Gasen aus regenerativen Quellen in der öffentlichen Gasversorgung, Bonn 2011.
- [4] Wuthnow, H., Dannert, C.: Refractory Materials in Glass Melting Furnaces Fired With Biogas, 56th Intern. Colloquium on Refractories, Aachen, 2013.
- [5] Fiehl, M.; Wuthnow, H.: Auswirkungen der Zumischung erneuerbarer Energien im Erdgasnetz auf thermoprozesstechnische Anlagen in der keramischen Industrie. Abschlussbericht IGF-Vorhaben 18684 N, Essen 2017.
- [6] Website der Fa. KTS: www.kts-kg.de
- [7] Website der Fa. Steuler Refractory Linings: www.steuler-kch.de
- [8] Website der Fa. Ziegelwerk Ott: www.ziegelwerk-ott.de
- [9] Website der Fa. GKT: www.kiln-tech.com

13 FAZIT UND AUSBLICK

Der Energieverbrauch in der Grundstoffindustrie wird neben Strom von fossilen Energieträgern und Wärme dominiert. Im ersten Teil der Untersuchung, deren Ergebnisse in „Flexibilitätsoptionen in der Grundstoffindustrie“ zusammengefasst sind, wurden vorrangig Methoden zur Ermittlung der Potenziale für die Flexibilisierung des Stromverbrauchs entwickelt und diese an konkreten Beispielen der untersuchten Branchen Stahl, Chemie, Zement, Glas und Feuerfest angewendet. Der zweite Teil der Untersuchung widmet sich bei der methodischen Weiterentwicklung vorrangig der Flexibilisierungspotenziale, die sich in Zusammenspiel mit Wärme und Brennstoffen ergeben. Die Methodenerweiterung fokussiert sich auf Hybridisierung, thermische Speicher und grüne Gase. Die Methoden wurden eingesetzt, um Potenziale und Hemmnisse bei der potenziellen Umsetzung aufzuzeigen.

Eine allgemeingültige Methode zur Identifikation geeigneter elektrischer Heizverfahren zur Hybridisierung von Prozessen der Grundstoffindustrie wurde entwickelt und auf Schlüsselproduktionsprozesse angewandt. Die Methode erwies sich als zielführend. Die Potenziale in den untersuchten Branchen unterscheiden sich erheblich. Während die technologischen Hemmnisse für einen Einsatz dieser Technologien in der Glas- und Zementindustrie groß sind, könnte eine hybride Beheizung in der Papierindustrie umgesetzt werden. Neben einer Hybridisierung der branchenspezifischen Prozesse könnten industrielle Wärmenetze hybridisiert werden. Es konnte gezeigt werden, dass hierdurch bei einem Einsatz von Wärmepumpen eine voll flexible Stromlast in die Energiewirtschaft integriert werden könnte, die etwa 10 % der mittleren deutschen Stromnachfrage entspricht.

Ein weiterer Ansatz über den Wärmebedarf der Industrie Flexibilität in das Energiesystem der Zukunft zu bekommen ist der Einsatz von elektrisch beheizten Speichern. Hierdurch kann eine zeitliche Entkopplung der Wärmeerzeugung und Nutzung erreicht werden. Für die Grundstoffindustrien sind prinzipiell verschiedene Anwendungen denkbar. Die größten Potenziale bestehen in der Prozessdampfbereitstellung in der chemischen Industrie und in der Prozesswärmebereitstellung in den Aggregaten der Feuerfestindustrie.

Eine ganz andere Art von Flexibilitätsanforderung kann auf die Grundstoffindustrie durch den Einsatz von synthetischen Gasen zukommen. Zu den betrachteten Gasen zählen elektrolytisch erzeugter Wasserstoff, synthetisches Methan und Biomethan. Letztere sind mit der bestehenden Infrastruktur kompatibel. Wenn jedoch Wasserstoff in das bestehende Erdgasnetz eingespeist wird, käme es zu Änderungen der Gaszusammensetzung. Eine Veränderung des Gasgemischs wird für industrielle Gasnutzer als gut beherrschbar eingeschätzt, wenn sie zeitlich konstant ist, technisch beherrschbar, wenn sie zeitlich planbar variieren und als sehr schwer technisch beherrschbar, wenn die Änderungen der Gaszusammensetzung zeitlich nicht planbar variieren.

Die Untersuchung zeigt somit, dass der Einsatz von hybrider Wärmebereitstellung, thermischen Speichern und synthetischen Brenngasen weitere Flexibilitätspotenziale in den Thermoprozess-basierten Grundstoffindustrien eröffnet, die den eigentlichen Thermoprozess wenig beeinflussen. Aber

auch hier bestehen technische, organisatorische und ökonomischer Hemmnisse, die einer Einführung dieser Technologieoptionen zunächst entgegenstehen. An konkreten Beispielen aus den untersuchten Branchen konnte mittels Simulationen gezeigt werden, dass es Bereiche gibt, bei denen das Anbieten von Flexibilität betriebswirtschaftlich sinnvoll ist. Allerdings kann dies bereits bei leichten Änderungen von Strompreisbestandteilen und Investitionskosten nicht mehr gelten.

Die Untersuchungen von konkreten Prozessen in den Branchen Stahl, Chemie, Zement, Glas und Feuerfest brachten neue Erkenntnisse zu Hemmnissen, technischen Lösungen und Rückwirkungen mit dem Energiesystem. Hybridisierungen, Einsatz von thermischen Speichern und Wasserstoff sind in ausgewählten Bereichen technisch machbar und könnten somit die Prozesse der Grundstoffindustrie zum Partner bei der Integration von erneuerbaren Energien in das Energiesystem machen. Die Untersuchung zeigt aber auch, dass es noch weiterer Forschung & Entwicklung und in der Umsetzung ökonomischer Anreize bedarf.

IMPRESSUM

HERAUSGEBER:

Dr. Florian Ausfelder

Dr. Serafin von Roon

Dr. Antje Seitz

VERANTWORTLICH IM SINNE DES PRESSERECHTS:

DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik e.V.

Dr. Florian Ausfelder

Theodor-Heuss-Allee 25

60486 Frankfurt am Main

GESTALTUNG/SATZ

PM-GrafikDesign

Peter Mück, Wächtersbach

GEFÖRDERT VOM

Bundesministerium für Bildung und Forschung

BETREUT VOM

Projektträger Jülich

BILDNACHWEIS TITEL:

Hintergrund: @pixelkorn- tock.adobe.com;

v.o.: © Natalie Schorr-stock.adobe.com; © noprati somchit-stock.adobe.com;

© VDZ gGmbH; © Andrey-stock.adobe.com; © 2000 InfraserV GmbH & Co. Höchst KG

1. Auflage

ISBN: 978-3-89746-219-9

Erschienen im August 2019 in Frankfurt am Main

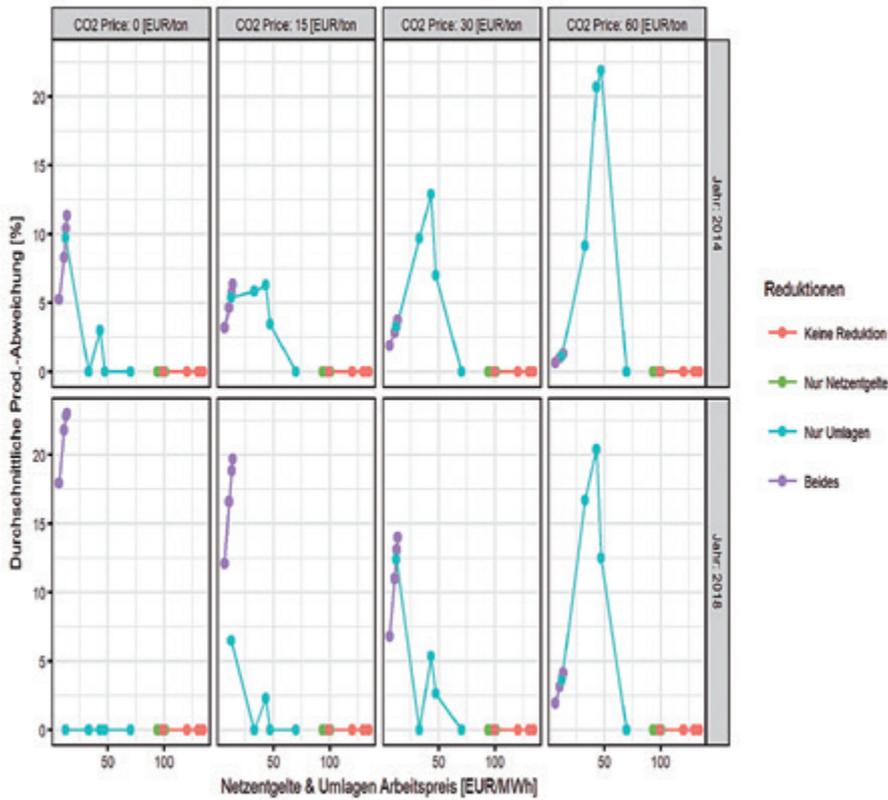


Abbildung 7.4: Flexibilitätsbereitstellung: Durchschnittliche Abweichung vom Jahresmittel des Stromverbrauchs

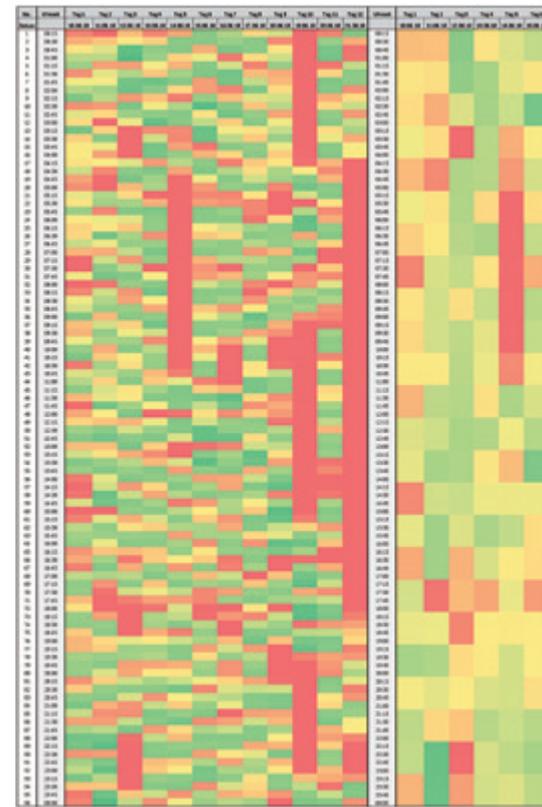


Abbildung 8.2: Elektrische Leistung (in MVA) eines bogenofens an 12 Betriebstagen. Links: 15 min-Werte, rot=0%, grün=100%.

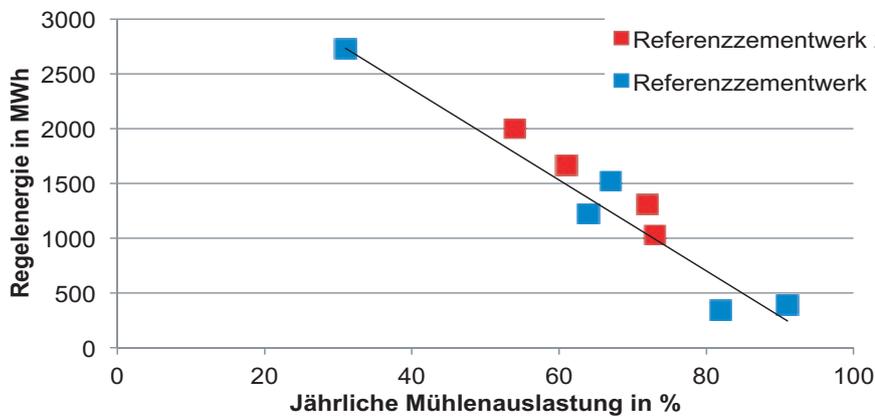


Abbildung 10.2: Korrelation zwischen Mühlenauslastung und verfügbarer Regelenergie bei einer normierten Mühlenantriebsleistung für zwei unterschiedliche Referenzwerke und Referenzjahre nach Anforderungsprofil 2.

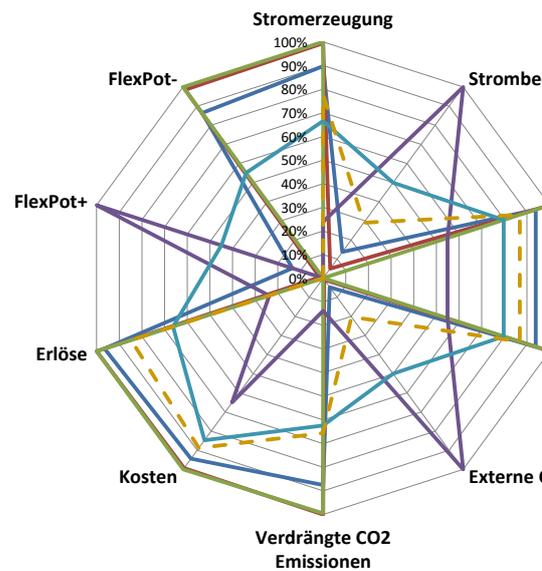
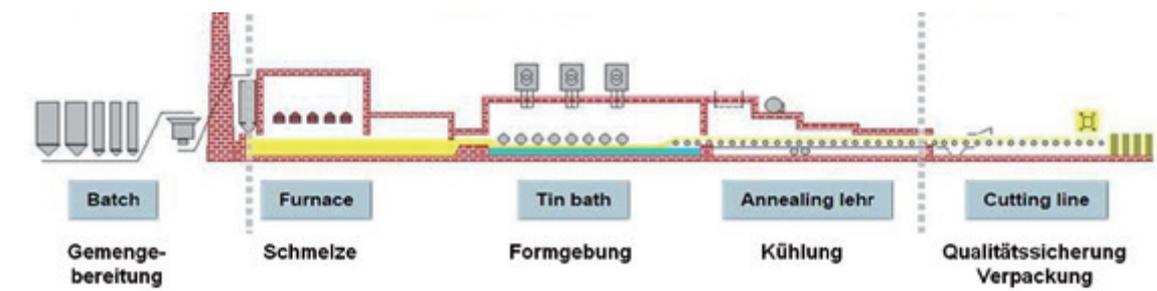
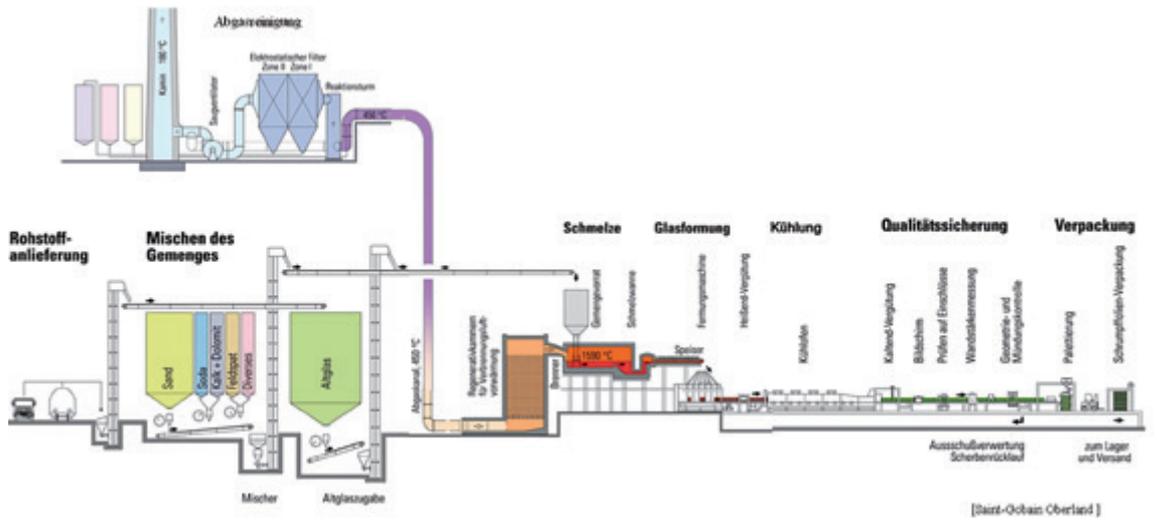


Abbildung 11.9: Verschiedene Einsatzstrategien für vollflexiblen Betrieb.

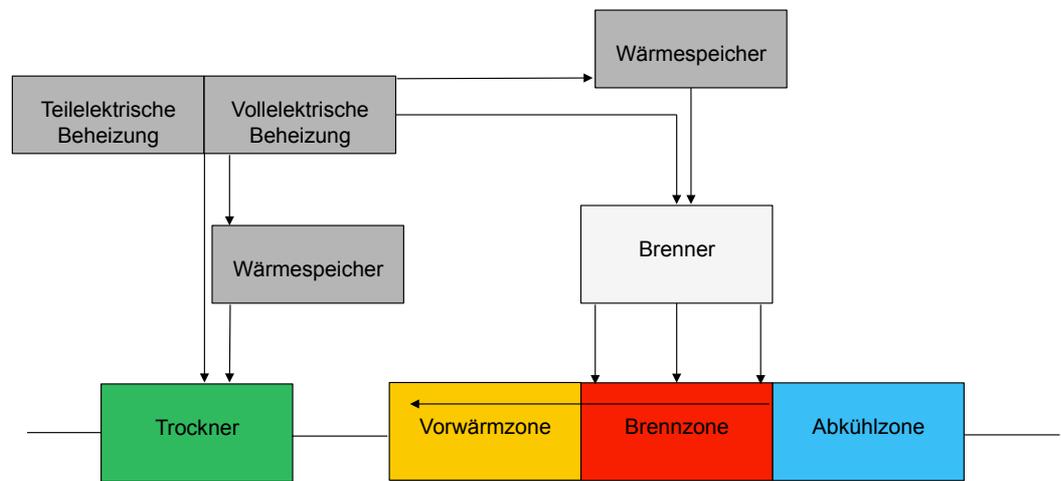


s Elektrolight-
erte, Rechts: 1

Abbildung 9.1: Produktionskette der Behälterglasherstellung mit ihren wesentlichen Prozessschritten und der angeschlossenen Abgasreinigungsanlage.

Abbildung 9.2: Produktionskette der Floatglasherstellung mit ihren wesentlichen Prozessschritten.

- Wirtschaftlich
 - CO2-Minimierung
 - Maximale Stromerzeugung
 - Minimale Stromerzeugung
 - Maximale Flexibilität
 - Vollflexibler Betrieb
- Erdgaseinsatz**
- Interne CO2 Emissionen**
- CO2 Emissionen**



relativ zu einem

Abbildung 12.8: Hybridisierung durch thermischen Speicher.

Kapitel 8: Eisen- und Stahlindustrie

Der durchschnittliche Lastabruf durch die Elektrostahlerzeugung ist stark von dem betrachteten Zeitintervall abhängig. Dies hat Auswirkungen auf das Flexibilitätspotential von Elektrostahlwerken. Die Demonstration der Flexibilität einer Sauerstofferzeugungsanlagen (PVSA) scheitert an technischen Hindernissen. Pfannenöfen haben aufgrund der logistischen Anforderungen kein Flexibilitätspotenzial. Die Hybridisierung von Warmwalzwerken ist vielversprechend im Sinne der Flexibilität. Die Nutzung synthetischer Gase, insbesondere Wasserstoff als Reduktionsmittel ist Gegenstand aktueller Forschung.

Kapitel 9: Glasindustrie

In der Glasindustrie ist die gesamte Prozesskette aufeinander abgestimmt und eine Flexibilisierung schwierig. Glaswannen können prinzipiell auch vollelektrisch betrieben werden. Der Einsatz von hybriden Beheizungssystemen ist denkbar, ebenso wie thermische Speicher.

Kapitel 10: Zementindustrie

In der Zementindustrie sind die Mühlen die größten Stromverbraucher. Das verfügbare Flexibilitätspotenzial hängt von der Mühlenauslastung ab. Für größere Flexibilisierungszeiträume können auch Silokapazitäten erhöht werden. Die Trennung der energieintensiven Feinstmahlung verringert das Flexibilisierungspotenzial.

Kapitel 11: Chemische Industrie

Flexibilität kann nicht nur in einzelnen Prozessen sondern auch durch geschickte Konfiguration einzelner Dampf- und Stromerzeugungseinheiten in einem Verbund angeboten werden. Je nach Betriebsstrategie stehen unterschiedliche Flexibilitätspotenziale zur Verfügung und Grenzkosten für das Anbieten von positiver und negativer Flexibilität können abgeleitet werden. Die Abhängigkeit von CO₂-Emissionen bei Flexibilitätsbereitstellung ergibt sich aus der Merit-Order Logik. Ein thermischer Speicher, bzw. eine Wasserelektrolyse können zusätzlich positive bzw. negative Flexibilität anbieten.

Kapitel 12: Feuerfest-Industrie

Mit technischen Nachrüstungen können die gasbefeuerten Sinter- und Brennöfen der Feuerfestindustrie auf stoffliche Flexibilisierung der Brenngase reagieren. Die Potenziale für eine energetische Flexibilisierung wurden bei Durchlauföfen für die Produktion von Schamotte, Bauxitprodukten und von Ziegeln untersucht. Die Anforderungen für einen Betrieb mit einer Variation der Gaszusammensetzung wurden gemäß den Anforderungsprofilen untersucht. Gasbefeuerte Sinter- und Brennöfen können zumindest teilweise hybridisiert werden und damit ein Teil der erforderlichen Energie durch elektrische Energie eingebracht werden. So lassen sich der Trockner, die Vorwärmzone, die Brennluftvorwärmung, Regeneratoren und thermische Speicher elektrifizieren. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen lassen sich auch auf andere gasbefeuerte Öfen in der Feuerfest- und Keramikindustrie übertragen.

ÜBER DIESES BUCH

Die energieintensiven Prozesse der Grundstoffindustrie sind Verantwortlich für einen Großteil des industriellen Strombedarfs in Deutschland. Der zunehmende Beitrag fluktuierender erneuerbarer Stromerzeugung im Stromsystem führt absehbar zu einem erhöhten Bedarf an flexibler Leistung. Dies erfordert ein fundamentales Umdenken in der Art und Weise, wie Strom in den Prozessen der energieintensiven Grundstoffindustrie genutzt wird. Die sich ergebenden Möglichkeiten zur Flexibilitätsbereitstellung durch Hybridisierung in der Wärmeerzeugung, dem Einsatz von thermischen Speichern sowie der Nutzung synthetischer Brenngase werden in ihren technischen Konsequenzen in den verschiedenen Branchen der Grundstoffindustrie, Eisen- und Stahl-, Glas-, Zement-, Chemie- und Feuerfestindustrie untersucht. Die bereits entwickelte Methodik wird um diese Aspekte erweitert und vertieft. Anhand von Beispielen aus den Industrien werden Hemmnisse diskutiert und ökonomischen Aspekte aufgearbeitet.



DR. FLORIAN AUSFELDER

ist seit 2017 Teamleiter und Themensprecher für den Bereich „Energie und Klima“ in der DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V. Er hat Chemie in Karlsruhe studiert und in Edinburgh in Physikalischer Chemie promoviert. Nach Post-Doc Aufenthalten in den USA und Spanien trat Dr. Ausfelder 2007 als wissenschaftlicher Mitarbeiter in die DECHEMA ein, wo er verschiedene Gremien und Forschungsprojekte im Energiebereich betreut.



DR. ANTJE SEITZ

leitete als promovierte Verfahrensingenieurin bis Herbst 2018 die Abteilung Thermische Prozesstechnik am Institut für Technische Thermodynamik des DLR. In der Helmholtz Gemeinschaft verantwortete sie die Entwicklung thermischer Energiespeicher und deren Integration in industrielle und Kraftwerksprozesse. Besonders wichtig ist ihr der Austausch zwischen Industrie und Forschung, um innovative Speicherlösungen für das Energiesystem der Zukunft nutzbar zu machen.



DR. SERAFIN VON ROON

ist seit 2011 Geschäftsführer der Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft. Er hat Wirtschaftsingenieurwesen an der TU Berlin studiert und an der TU München promoviert. Von 2003 bis 2011 verantwortete er an der FfE e.V. die Themen System- und Marktanalysen. Seine Forschungsschwerpunkte sind industrielle Energiewirtschaft sowie Systemintegration von erneuerbaren Energien. Seit 2016 hat er einen Lehrauftrag an der TU München.



GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

BETREUT VOM

