



## SynErgie

*Synchronisierte und energieadaptive  
Produktionstechnik zur flexiblen Ausrichtung  
von Industrieprozessen auf eine fluktuierende  
Energieversorgung*

Schlussbericht Teilvorhaben:

Lastflexibilisierung in der Zementindustrie (03SFK3K0)

01.09.2016 – 31.10.2019

- Öffentlicher Teil -

Datum: 16.01.2020



GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung



<b>Teil I: Kurze Darstellung</b> .....	1
1 Aufgabenstellung .....	1
2 Voraussetzungen .....	1
3 Planung und Ablauf des Vorhabens.....	2
4 Wissenschaftlicher und technischer Stand.....	4
4.1 Bedeutung der Roh- und Zementmahlung.....	4
4.2 Erfahrungen aus einem Betriebsversuch im Zementwerk.....	6
5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen .....	6
<b>Teil II: Eingehende Darstellung</b> .....	8
1 Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse.....	8
1.1 Technische Beschreibung der ausgewählten Prozesse.....	8
1.1.1 Rohmahlung.....	8
1.1.2 Zementmahlung .....	9
1.2 Flexibilitätsperspektiven des Klinker-Brennprozesses .....	11
1.3 VDZ-Modell zur Einschätzung der technischen Flexibilitätspotentiale .....	11
1.3.1 Flexibilitätspotential für kurz-, mittel- und langfristige Anforderungen .....	11
1.3.2 Modellstruktur .....	13
1.3.3 Beschreibung der Modellparameter .....	14
1.3.4 Saisonale Nutzung der Produktionskapazität .....	15
1.3.5 Produktspeicherkapazität in Silos.....	17
1.3.6 Technisches Flexibilitätspotential der Roh- und Zementmahlung.....	17
1.3.7 Hemmnisse und Einschränkungen des technischen Potentials.....	27
1.4 Bestimmung des Flexibilitätspotentials bei flexibler Betriebsweise der Zementmühlen in zwei Referenzwerken.....	33
1.4.1 Erhebung und Aufbereitung der Modelleingangsdaten.....	33
1.4.2 Beschreibung der Referenzwerke .....	35
1.4.3 Modellrandbedingungen.....	36
1.4.4 Kostenindex-Kriterium für den flexiblen Mühlenbetrieb.....	36
1.4.5 Parametervariation.....	37
1.4.6 Ergebnisse Anforderungsprofil 1 .....	37
1.4.7 Ergebnisse Anforderungsprofil 2 .....	40
1.4.8 Ergebnisse Anforderungsprofil 3 .....	42
1.4.9 Rahmenbedingungen des flexiblen Mühlenbetriebs und Kostenindizes .....	45



1.4.10	Standortabhängige Hemmnisse .....	47
1.4.11	Flexibilisierungspotentiale der separaten Feinstmahlung bei der Zementmahlung .....	49
1.4.12	Wechselwirkungen zwischen Effizienz und Flexibilität.....	59
1.4.13	Fazit / Zusammenfassung .....	61
2	Zahlenmäßiger Nachweis: wichtigste Positionen .....	63
3	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit .....	63
4	Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere Verwertbarkeit des Ergebnisses.....	63
5	Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens.....	64
6	Erfolgte oder geplante Veröffentlichung des Ergebnisses.....	65
7	Literatur.....	66
8	Glossar.....	69
A	Anhang.....	70
A	Tabellen .....	70
B	Bilder.....	72
C	Abbildungen .....	75



Am Projekt beteiligte Wissenschaftler: Dr. Johannes Ruppert, Dr. Stefan Seemann,  
 Sebastian Rösch, Kevin Treiber  
 Institution: VDZ gGmbH, Forschungsinstitut der  
 Zementindustrie  
 Abteilung: Umwelt und Betriebstechnik  
 Titel: Abschlussbericht für das BMBF-  
 Forschungsvorhaben SynErgie  
 Synchronisierte und energieadaptive  
 Produktionstechnik zur flexiblen Ausrichtung  
 von Industrieprozessen auf eine fluktuierende  
 Energieversorgung  
 Lastflexibilisierung in der Zementindustrie

Ausgestellt am: Januar 2020  
 Berichtsumfang: 82 Seiten  
 Laufzeit des Vorhabens: 01.09.2016 – 31.10.2019  
 Förderkennzeichen des BMBF: 03SFK3K0  
 VDZ-Website zum Projekt: [https://www.vdz-  
 online.de/forschung/abgeschlossene-  
 projekte/synergie/](https://www.vdz-online.de/forschung/abgeschlossene-projekte/synergie/)

**Bitte zitieren als:**

Ruppert, J., Rösch, S., Seemann, S., Treiber, K., Hrsg. Abschlussbericht für das BMBF-  
 Forschungsvorhaben Synchronisierte und energieadaptive Produktionstechnik zur flexiblen  
 Ausrichtung von Industrieprozessen auf eine fluktuierende Energieversorgung (SynErgie) –  
 Lastflexibilisierung in der Zementindustrie. Düsseldorf: VDZ, 2019

Verfügbar unter: <https://www.vdz-online.de/forschung/abgeschlossene-projekte/synergie/>



## **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. KG, Frankfurt am Main (ISH)

Rohrdorfer Gruppe, Rohrdorf (RG)

Technische Universität München, Lehrstuhl für Energiewirtschaft und  
Anwendungstechnik (TUM)

VDEh-Betriebsforschungsinstitut GmbH, Düsseldorf (BFI)

Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH, Wuppertal (WI)

## Zusammenfassung

Die Zementindustrie zählt zu den energieintensiven Industriebranchen der Grundstoffindustrie. Im Rahmen des Projekts wurden charakteristische Schlüsselproduktionsprozesse identifiziert, welche sich für eine Flexibilisierung des elektrischen Energieeinsatzes eignen. Die Prozesse der Roh- und Zementmahlung kommen aufgrund vorhandener Silokapazitäten in Frage. Es wurden technische und ökonomische Voraussetzungen untersucht, welche für die Flexibilisierung dieser energieintensiven Produktionsabschnitte von Bedeutung sind. Die Ergebnisse umfassen abschätzbare Potentiale zur Flexibilisierung der Roh- und Zementmahlung unter Nutzung von statistischen Anlagen- und Produktionskapazitäten für die gesamte deutsche Zementindustrie.

Das Lastflexibilisierungspotential des Referenzprozesses Zementmahlung wurde anschließend spezifisch 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 Ergebnisse bestätigen hierbei die hauptsächliche Abhängigkeit des Lastflexibilisierungspotentials von der installierten Mühlenantriebsleistung und der jährlichen Mühlenauslastung.

Der ermittelte Regelenergieanteil (flexibler elektrischer Energieeinsatz 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. 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 (Börsenstrompreise) kaum wirtschaftliche Potentiale für den flexiblen Stromeinsatz in der Zementmahlung entstehen. Die Kostenersparnis selbst kann in der Regel keine neuen Investitionen zur Erhöhung der Flexibilität begründen.

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 erstens die geringen Produktionsleistungen der einzelnen Rührwerkskugelmühlen und zweitens der geringere spezifische Energiebedarf dieser Mahlanlagen in Kombination mit Gutbett-Walzenmühlen gegenüber Kugelmühlen.

## Abstract

The cement industry is one of the energy-intensive industrial sectors of the primary industries. Within the scope of the project characteristic key production processes were identified, that are suitable for flexible electrical load shifting. The processes of raw material and cement grinding are considered due to available silo capacities. Technical and economical requirements, which are relevant for the demand-side response of these energy-intensive production processes, were examined.

The results comprise assessable potentials for flexible load management of raw material and cement grinding for the whole German cement industry using statistical machine and production capacities.

The practical potential for flexible load management in cement grinding as a reference process is assessed based on production data of two different cement plants. The developed model compares a flexible grinding mode with reference grinding modes 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 its utilization rate. They are similar to results of the first cement plant and show a comparable scale.

The calculated amount of balance energy (flexible electrical energy in relation to the yearly energy demand) according to demand profile 2 varies between 22% and 5% in case of an increased utilization rate in the second reference year. In the second reference cement plant the amount of balance energy varies between 16% and 31% in dependence of the reference year. Altogether the second reference cement plant shows a comparable magnitude with regard to the load shifting potential despite of a different plant structure.

The economic conditions and obstacles during flexible operation of cement mills were assessed based on cost-indexes for two different historical reference years and electricity price 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. 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 pre-grinding 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 lower specific energy demand of these grinding mills in combination with high-pressure grinding rolls compared to ball mills.

## Teil I: Kurze Darstellung

### 1 Aufgabenstellung

In den ersten drei Projektjahren des SynErgie Projekts werden unter anderem die Flexibilitätspotentiale der Grundstoffindustrien erhoben. Zunächst müssen hierzu die branchenspezifischen Schlüsselproduktionsprozesse in der Zementindustrie identifiziert werden. Anschließend wird das technische Flexibilisierungspotential anhand von mittleren Daten, beispielhaft für die gesamte deutsche Zementindustrie, erhoben. Neben der Datenerhebung werden Experteninterviews geführt, um weiche Kriterien (z.B. Personalplanung, empirische Daten) sowie Hemmnisse darstellen zu können. Anhand definierter Modellszenarien soll anschließend das Lastflexibilisierungspotential der Schlüsselproduktionsprozesse ermittelt werden.

Die erarbeiteten Methoden und Modellergebnisse der technischen Potentialanalyse werden anhand von Betriebsdaten aus zwei Zementwerken validiert und weiter konkretisiert. Insbesondere das Anlagenkonzept der separaten Feinstmahlung weist Potentiale für die flexiblere Produktion und das Management des Energieeinsatzes in der Zementindustrie auf. Die Umsetzung dieses Konzepts in Zementwerken kann einen Beitrag zur Gestaltung der Energiewende leisten. In einer Machbarkeitsstudie wird das Konzept der separaten Feinstmahlung hinsichtlich des technisch und ökonomisch umsetzbaren Flexibilisierungspotentials untersucht. Dazu wird die separate Feinstmahlung in einem weiteren Schritt in die vorhandene Modellstruktur implementiert.

Die Bewertung der potentiellen Lastflexibilisierungspotentiale einzelner Produktionsprozesse soll anhand der für alle Grundstoffindustrien branchenübergreifend definierten Anforderungsprofile erfolgen, um eine konsistente vergleichbare Einschätzung der Ergebnisse sicherzustellen.

### 2 Voraussetzungen

Das Forschungsvorhaben steht im Bezug zum sechsten Energieforschungsprogramm der Bundesregierung „Forschung für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung“ und soll einen Beitrag zur Erreichung der darin definierten politischen Ziele leisten.

In Zukunft steigt der Anteil fluktuierend einspeisender Stromerzeuger in das Stromsystem. Aus diesem Grund wird ein effizienter Ausgleich zwischen Energieangebot und –bedarf zunehmend wichtiger. Insbesondere die Zielsetzung der Bundesregierung bis zum Jahr 2050 den Anteil an erneuerbaren Energien auf mehr als 80 % am Bruttostromverbrauch zu steigern, erfordert Anpassungen von Seiten des Energiesystems, welche unter anderem durch die Synchronisation von Stromerzeugung und –nachfrage von energieintensiven Produktionsprozessen erreicht werden können. Zur Deckung des steigenden Reserveleistungsbedarfs ist daher ein ausgewogener Technologiemix unter Berücksichtigung von erneuerbaren Energien, flexiblen konventionellen Kraftwerken, Speichern, dem Netzausbau sowie von flexiblen Nutzern von Nöten. Dieser Technologiemix soll die zukünftige Versorgungssicherheit garantieren. Viele dieser Lösungsbausteine sind jedoch mit potentiell

hohen Kosten verbunden, die auf den Nutzer umgelegt werden und ziehen gesellschaftliche Akzeptanzprobleme nach sich.

Mit insgesamt 44 % des Nettostrombedarfs und 25 % des Wärmebedarfs in Deutschland weisen Industrieprozesse und insbesondere große Einzelanlagen in energieintensiven Industriebranchen beträchtliche Flexibilisierungshebel auf. Die kurz- und mittelfristige Flexibilisierung der Stromnachfrage, das sogenannte Demand-Side-Management (DSM), bietet eine Chance den Umbau des Energiesystems kosteneffizient und gesellschaftlich akzeptiert zu ermöglichen.

SynErgie unterstützt die kosteneffiziente Realisierung der Energiewende auf Basis erneuerbarer Energien und befähigt damit Deutschland sich zum internationalen Leitanbieter für flexible Industrieprozesse zu entwickeln. Die Forschungsarbeiten starten zunächst mit sieben energieintensiven Branchen: Stahl- und Aluminium-Herstellung, chemische Industrie, Maschinen- und Anlagenbau, Papier-, Lebensmittel-, Zement- und Automobilindustrie. Diese vereinigen rund 90 Prozent des industriellen Nettostrombedarfs. Das Projekt SynErgie betrachtet die energieintensiven Schlüsselproduktionsprozesse dieser Branchen, um deren Energiebedarf mit dem schwankenden Angebot erneuerbarer Energie zu synchronisieren.

### 3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Im Wesentlichen können die durchgeführten Projektarbeiten den nachfolgend dargestellten Arbeitspaketen in unterschiedlichen Clustern des SynErgie Forschungsprojekts zugeordnet werden.

In der ersten Projektphase wurden im Rahmen des SynErgie-Clusters V statistische Daten der Roh- und Zementmahlung in einem Modell erfasst und ausgewertet. Dabei wurden zwei Modellszenarien differenziert:

- Modellszenario 1 betrachtet ein Zementmahlwerk ohne Klinkerproduktion.
- Modellszenario 2 betrachtet ein integriertes Zementwerk mit Klinkerproduktion (Roh- und Zementmühlen)

#### **SynErgie-Cluster V (Potentialanalyse und systemische Betrachtung):**

- **Arbeitspaket V.1:** Abgestimmte Methodenbeschreibung zur Erfassung und Bewertung von Flexibilitätsperspektiven der Grundstoffindustrie

Im Arbeitspaket V.1 wird ein für alle Grundstoffindustrien gültiger methodischer Ansatz entwickelt. Hierzu werden einheitliche Begrifflichkeiten festgelegt. Darüber hinaus werden für die ausgewählten Prozesse der Roh- und Zementmahlung die wesentlichen technischen und ökonomischen Parameter für eine Lastflexibilisierung ermittelt.

- **Arbeitspaket V.6:** Flexibilitätsperspektiven der Grundstoffindustrie

Um eine ganzheitliche Bewertung der **Flexibilisierungsperspektiven der Zementmahlung** durchzuführen, ist zunächst die Bestimmung der technischen Flexibilitätspotentiale in der Zementindustrie nötig. Hierzu werden relevante Teilbereiche (z.B. Mahlprozesse) betrachtet und anhand eines mittleren Zementwerkes bewertet. Wesentliche Daten zur Beschreibung des mittleren Zementwerkes werden hierzu erhoben. Anhand von Experteninterviews werden die Randbedingungen zur flexiblen Betriebsweise

der Teilprozesse bestimmt und in einem einfachen Batteriemodell angewandt. Zur Bewertung der Ergebnisse werden die Hemmnisse und Einschränkungen bezogen auf die technischen Flexibilisierungspotentiale ermittelt. Hierzu zählen sowohl die technischen Gegebenheiten, als auch ökonomische Hemmnisse.

Nach der erfolgreichen Projektverlängerung über den 30.11.2017 hinaus bis zum 31.10.2019 wurden die in Cluster I angesiedelten Arbeitspakete ergänzend bearbeitet und dementsprechend die Betrachtung der Flexibilisierung der Zementindustrie hier angesiedelt. Im Rahmen der weiterführenden Arbeiten wurden in Zusammenarbeit mit einem Unternehmen der Zementindustrie die Flexibilitätspotentiale unter Berücksichtigung standortspezifischer Rahmenbedingungen weiter konkretisiert.

### **SynErgie-Cluster I (Schlüsselproduktionsprozesse):**

**Arbeitspaket I.17:** Zement-Industrie – Validierung anhand von unternehmensspezifischen Daten und Analyse der separaten Feinstmahlung

- **Arbeitspaket I.17.A:** Implementierung des Zementwerkes eines Projektpartners in das Modell

Auf Basis der Ergebnisse der technischen Beschreibung der Flexibilitätspotentiale werden die Produktionsprozesse in zwei Referenzwerken des Projektpartners (Rohrdorfer-Gruppe) detaillierter nachgebildet. Für den Modellansatz werden entsprechend der definierten Anforderungen Randbedingungen gesetzt und historische Vergleichsdaten aus den Referenzwerken erhoben. Besonders die Ergebnisse der Experteninterviews sind hier von großer Relevanz.

- **Arbeitspaket I.17.B:** Erweiterte Beurteilung des Potentials zur Erfüllung des Anforderungsprofils 3 mit langer Abrufdauer (1-5 d) durch Anpassung der Silokapazitäten, um längere Stromknappheitsperioden („Dunkelflauten“) auszugleichen.

In diesem Arbeitspaket wird das Potential zur Bereitstellung von Lastflexibilität in der Zementindustrie bei einer langfristigen Lastverschiebung nach Anforderungsprofil 3 beurteilt. Diesem Anforderungsprofil kommt insbesondere mit dem Ausbau der regenerativen Energieerzeugung zukünftig eine steigende Bedeutung für das Energiesystem zu.

- **Arbeitspaket I.17.C:** Erfassung des aktuellen Flexibilitätspotentials und Hemmnisanalyse anhand von Daten über den Jahresverlauf in den Schlüsselproduktionsprozessen der Zementindustrie

In diesem Arbeitspaket werden standortabhängige technische und ökonomische Hemmnisse in Bezug auf eine Lastflexibilisierung des Zementmühlenbetriebs evaluiert.

- **Arbeitspaket I.17.D:** Machbarkeitsstudie für eine Pilotanlage zur flexiblen Feinstmahlung in einem Zementwerk

In der Machbarkeitsstudie wird das mehrstufige Mahlsystem der flexiblen Feinstmahlung zur Senkung des spezifischen Energiebedarfs bei der Zementmahlung untersucht.

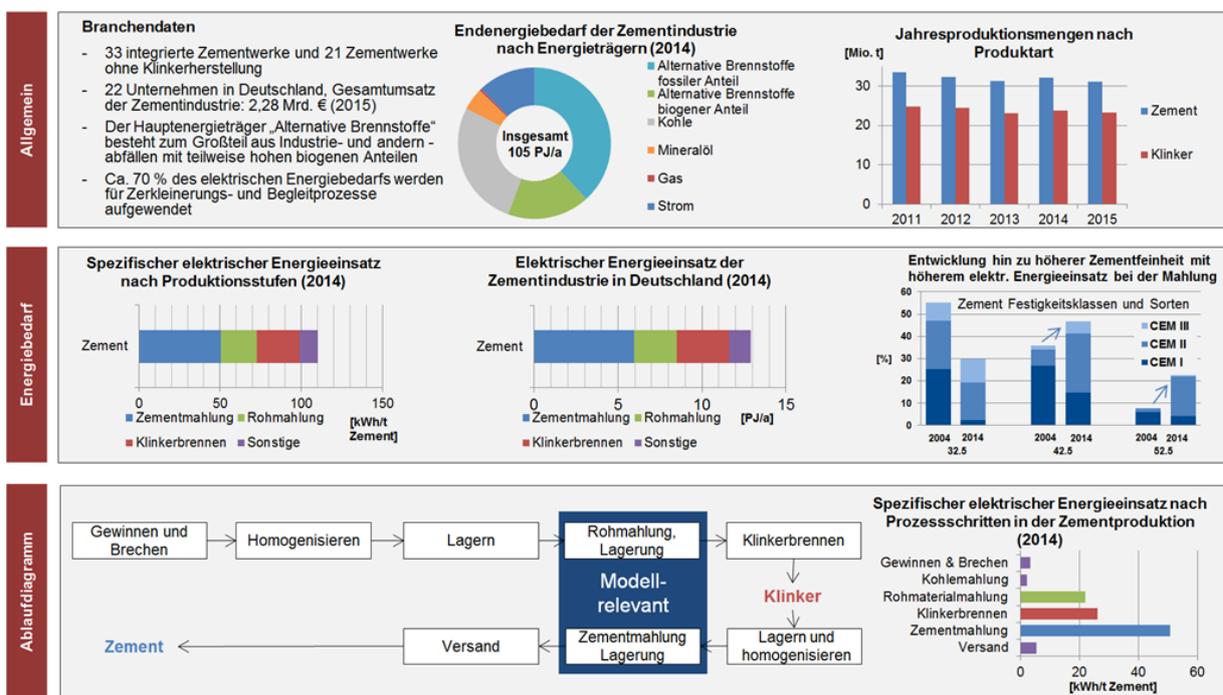
## 4 Wissenschaftlicher und technischer Stand

### 4.1 Bedeutung der Roh- und Zementmahlung

Die Produktionsprozesse in Zementwerken können im Wesentlichen in Rohmahlung, Klinkerbrennprozess und Zementmahlung untergliedert werden. Der Klinkerbrennprozess in der Zementproduktion weist einen sehr hohen thermischen Energiebedarf auf. Die bei einer Flexibilisierung des Klinkerbrennprozesses entstehenden Verluste und der Anlagenverschleiß im Heißbereich sind weder ökonomisch noch energetisch vertretbar. Deshalb besteht aktuell nicht die Möglichkeit oder Perspektive, den Klinkerbrennprozess in eine Flexibilisierung mit einzubeziehen (siehe auch **Kapitel 1.2**).

Der spezifische elektrische Energiebedarf in der deutschen Zementindustrie im Jahr 2018 betrug etwa 111 kWh/t<sub>Zement</sub>. Etwa 70 % des elektrischen Energiebedarfs bei der Zementherstellung entfallen auf Zerkleinerungsprozesse [Eu15]. 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 1-1**).

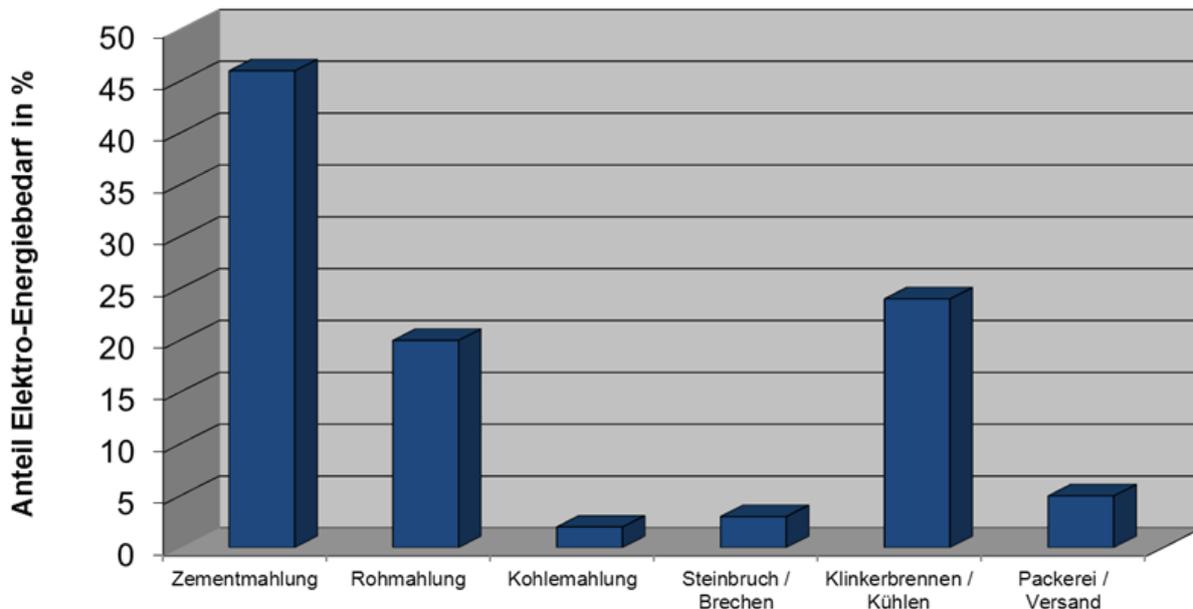
### Branchensteckbrief – Zementindustrie



**Abbildung 1-1** VDZ Branchensteckbrief zur Zementindustrie

Die Mahlprozesse in der Zementherstellung können in zwei Prozesse unterteilt werden, die Roh- und die Zementmahlung. Etwa 45 % des elektrischen Energiebedarfs entfallen auf die Zementmahlung und etwa 20 % auf die Rohmahlung (**Abbildung 1-2**). 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 **[Ver14a]** der Hauptanteil an elektrischer Energie eingesetzt. Der Klinkerbrennprozess hat ebenfalls einen großen Anteil am elektrischen Energiebedarf von etwa 23 %. Die Kosten für die elektrische Energie bezogen auf den gesamten Herstellungsprozess liegen bei etwa 15 bis 20 % **[Ver17a]**.

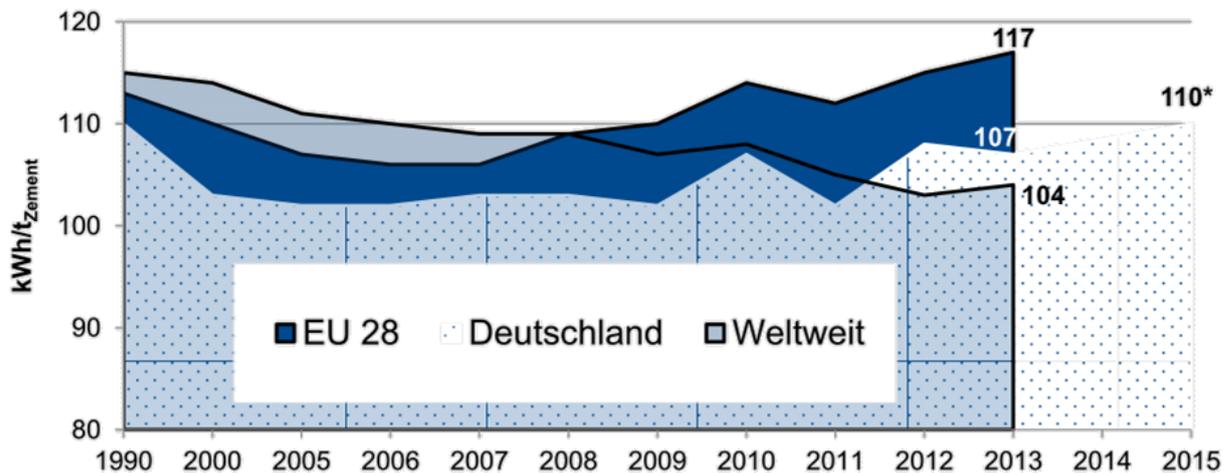


**Abbildung 1-2** Spezifischer elektrischer Energiebedarf (Deutschland, 2018):  
 $111 \text{ kWh/t}_{\text{Zement}}$  **[Ver14a]**

Die trockene Zerkleinerung der Rohmaterialien erfolgt in Vertikal-Wälzmühlen oder Kugelmühlen. Diese bereiten das Rohmaterial für den Klinkerbrennprozess vor. Zur Mahltrocknung werden Ofenabgase 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 **[Ver14b]**. Vertikal-Wälzmühlen 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 **[Ver14b]**.

In den vergangenen Jahren wurde eine deutliche Veränderung des Produktes Zement wahrgenommen. Es besteht ein Trend zu Zementen höherer Festigkeitsklassen und daher auch zu höheren Produktfeinheiten. Diese zunehmende Herstellung leistungsstärkerer Zemente führt gleichzeitig zu einer Erhöhung des spezifischen Energiebedarfs der Zementmahlung **[FST15]** (**Abbildung 1-1** und **Abbildung 1-3**).

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 1-3** Entwicklung des spezifischen Energiebedarfs der Zementherstellung [Ver14a, WB17]

## 4.2 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 [Ver17a]. Es handelt sich um ein integriertes Zementwerk mit hoher Kapazität von Rohmühle und Silos. Überwiegend liegt am Standort ein trockenes Rohmaterial mit einer Feuchte von etwa 5 % 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 einem 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.

## 5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Zur Umsetzung der vorgegebenen Aufgabenstellungen war die Zusammenarbeit mit anderen Forschungseinrichtungen notwendig. Die Aufgabenstellungen wurden hierbei im Wesentlichen in Zusammenarbeit mit der Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft (FfE) mbH, dem

Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH sowie dem Deutschen Institut für Wirtschaftsforschung (DIW) bearbeitet.

Hierbei wurden insbesondere durch die Forschungsstelle für Energiewirtschaft wesentliche Vorarbeiten geleistet bzw. relevante Modelleingangsdaten für die nachfolgende branchenspezifische Modellierung zur Verfügung gestellt. Die Forschungsgesellschaft hat hierbei Vorarbeiten bezüglich der Definition branchenübergreifender Anforderungsprofile, welche für die einheitliche Klassifizierung von Flexibilitätsanforderungen der Grundstoffindustrien genutzt wurden, geleistet. Darüber hinaus wurden von Seiten der Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft Börsenstrompreiszeitreihen und CO<sub>2</sub> –Emissionszeitreihen für das Szenarionjahr 2030 basierend auf vergangenen Projektergebnissen [**SKe17**] als Eingangsdaten in SynErgie zur Verfügung gestellt.

In Bezug auf ökonomische Hemmnisse gemäß Arbeitspaket I.17.C wurde die Bereitstellung einer Zeitreihe diskutiert, welche als sogenannte Einsatzplanung im Modell für die Anforderung nach Flexibilität Eingang erhalten soll.

Im Cluster AP V.6 wurden in Zusammenarbeit mit dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt sowie Wuppertal Institut für Klima, Umwelt und Energie Fragen zur thermischen Flexibilität und Hochtemperaturspeicherkonzepten (Meilensteine MS V.6.D bis MS V.6.K) im Prozess der Zementklinkerherstellung formuliert. Zur Beantwortung hat der VDZ eine umfangreiche Literaturlauswertung durchgeführt und diese den Projektpartnern bereitgestellt.

## Teil II: Eingehende Darstellung

### 1 Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse

#### 1.1 Technische Beschreibung der ausgewählten Prozesse

##### 1.1.1 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 jedem Fall gewährleisten zu können und Produktionsdefizite (z.B. durch Ausfälle und Wartungsarbeiten an der Mühle) nachholen zu können. Der Betrieb der Rohmühle erfolgt aus Emissions- und Effizienzgründen i.d.R. zu über 80 % im sogenannten Verbundbetrieb **[Ver14a]** mit der Klinkerproduktion. Die technische Flexibilisierbarkeit der Rohmehlproduktion ist daher zugunsten der effizienten Nutzung thermischer Energie und einer effizienten Abgasreinigung eingeschränkt und stark mit den standortabhängigen Gegebenheiten im Werk verknüpft (**Kapitel 1.4**). Es sind Zementwerke bekannt, in denen es dennoch möglicherweise praxisrelevante Potentiale für eine Flexibilisierung der Rohmahlung gibt **[Ho13, LL13]**. Zusammenfassend ist festzuhalten, dass die Flexibilisierbarkeit der Rohmahlung an viele Faktoren gekoppelt ist und nur in Einzelfällen praktisch möglich und sinnvoll wird:

- 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

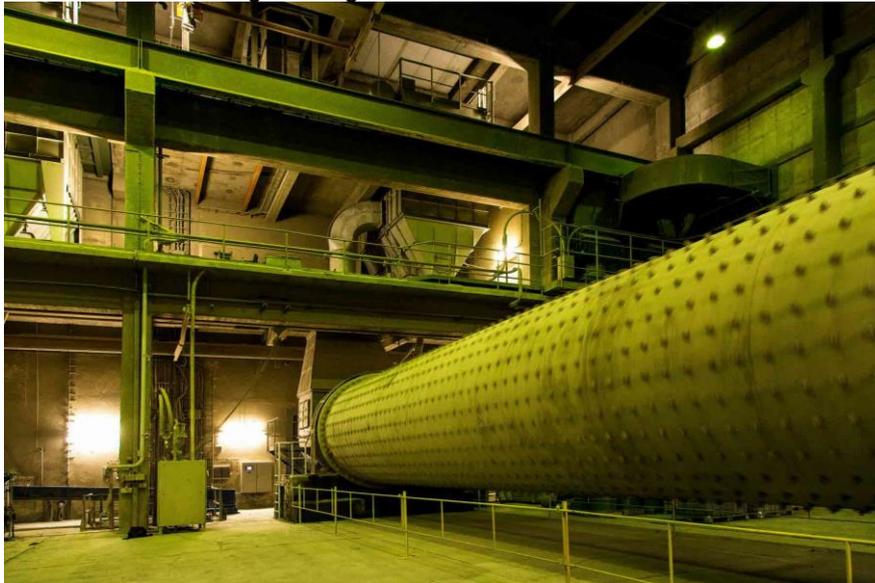
Die installierte Leistung von Rohmühlen liegt bei durchschnittlich etwa 3000 kW und die Kapazität bei 166 t/h **[WB17]**. Hiernach kann sich eine Tagesproduktion von bis zu 4000 t Rohmehl ergeben. Direktbetriebszeiten ohne Betrieb der Rohmühle werden für Wartungs- und Instandhaltungsarbeiten der Rohmühle genutzt. Aus Emissions- und Effizienzgründen versuchen einige Werke die Direktbetriebszeiten weiter zu reduzieren. Zur Darstellung im VDZ-Modell läuft die Rohmühle mit einer durchschnittlichen Betriebszeit von 7000 h/a. Das entspricht bei 320 Tagen mit Klinkerproduktion pro Jahr einem Anteil von 87 %.

Der Rohmühle vorgeschaltet ist das Rohsteinlager, welches 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.



### 1.1.2 Zementmahlung

Zur Zementmahlung werden in Deutschland heute hauptsächlich Kugelmühlen (**Abbildung 1-1**) oder Kombinationen der Kugelmühle mit vorgeschalteten Gutbett-Walzenmühlen eingesetzt. Zur Steigerung der Effizienz und zur Erhöhung der Produktfeinheit werden diese Anlagen im geschlossenen Kreislauf mit einem Sichter betrieben.



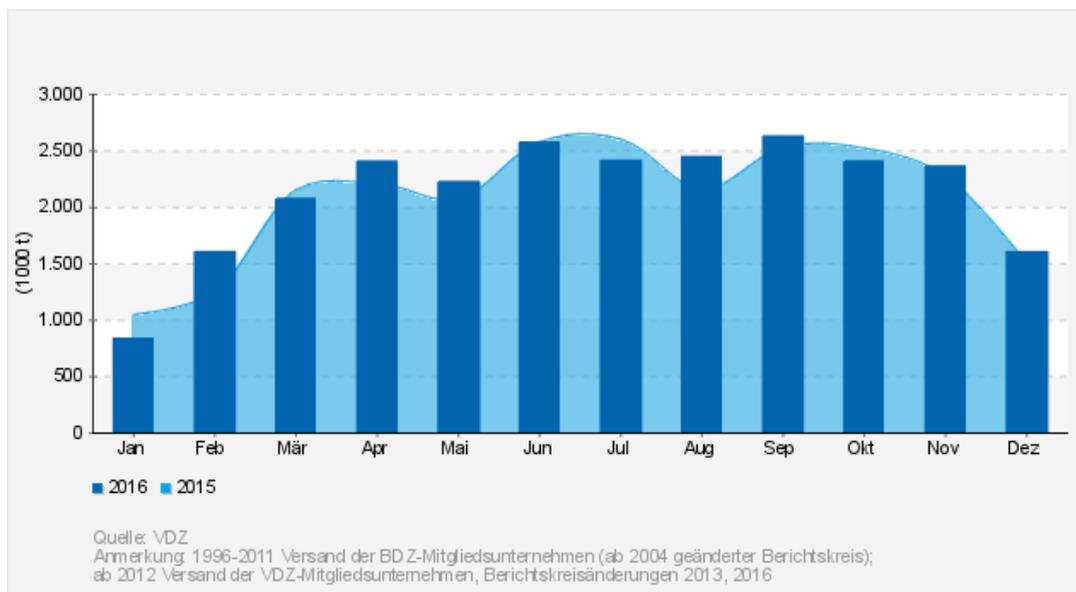
**Abbildung 1-1** Kugelmühle aus der Zementmahlung

Diese Mahlsysteme zeichnen sich durch eine 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 **[MFT17]**. Bei Vertikal-Wälzmühlen 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 bedingt durch die Nachentwässerung des Sulfatträgers zur Vorhydratisierung des Zements im Silo kommen **[Bo13, S. 121ff.]**. 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 jedoch 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 1000 bis 7000 Stunden pro Jahr üblich. Neben integrierten Zementwerken wird Zement auch in Mahlwerken ohne eigene Klinkerproduktion hergestellt. Die Anzahl der Mühlen und ihre Betriebsstunden sind im Durchschnitt etwas geringer als in integrierten Zementwerken. Standort-, markt- und saisonbedingt kann der tatsächliche Mühlenbetrieb allerdings stark variieren. Die Zementnachfrage bestimmt im Wesentlichen die Auslastung der Mühlen (**Abbildung 1-2**).



**Abbildung 1-2** Zementversand Inland (Monatsdaten) [Ver18]

Die installierte Leistung des Hauptantriebs von Zementmühlen liegt bei durchschnittlich 2250 kW [MFT17]. Tatsächlich abgerufen werden durchschnittlich etwa 2050 kW [Ver14b] inklusive Nebenantrieben. Abhängig von der Mühlengröße und -konfiguration sind hierin etwa 17 % Antriebsleistung von Nebenaggregaten [Du77, S. 130] enthalten. Ein Teillastbetrieb ist in den meisten Fällen nicht möglich. Die Kapazität einer durchschnittlichen Anlage liegt bei 40 t/h [Ver18]. Oft werden mehrere 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 in der Regel 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 **[Ver18]** eingeschätzt, wobei besonders bei Neuinstallationen wesentlich höhere Lagerkapazitäten bekannt sind. Mahlwerke verfügen tendenziell über kleinere Silokapazitäten von im Mittel etwa 22.000 t **[Ver18]** Kapazität. Gerade bei Silokapazitäten sind allgemein gültige Zusammenhänge schwer herzustellen und standortabhängige Gegebenheiten und Faktoren für die Anlagengestaltung spielen eine große Rolle.

## 1.2 Flexibilitätsperspektiven des Klinker-Brennprozesses

Der Brennprozess bei der Klinkerherstellung weist einen hohen thermischen Energiebedarf auf. Die deutsche Zementindustrie benötigte im Jahr 2018 96 PJ an thermischer Energie **[Ver19]**, wobei der wesentlich Anteil auf den Klinkerbrennprozess entfällt. Hierfür werden im Wesentlichen Kohle, Petcoke und Gas verwendet, aber auch alternative Brennstoffe, wie Gewerbe- und Hausabfälle werden zunehmend eingesetzt. Besonders in Deutschland werden vergleichsweise hohe Substitutionsraten erreicht.

Bei der Klinkerherstellung entstehen signifikante CO<sub>2</sub>-Emissionen, welche zum Großteil rohstoffbedingt sind und durch die Calzinierung des Rohmaterials freigesetzt werden. Der Klinkerbrennprozess ist wesentlich für die Qualität des Produktes Zement. Hierfür sind Prozesse wie Materialtrocknung, Calzinierung und Sinterung des Rohmehls notwendig. Besonders für die Calzinierung und das Sintern muss das Material auf sehr hohe Temperaturen von bis zu 1450 °C erhitzt werden. Die Zementwerke nehmen ihre Öfen nach der Winterreparatur in Betrieb und betreiben diese möglichst das ganze Jahr ohne Unterbrechungen. Dies entspricht im Mittel einer jährlichen Betriebsdauer von 7000 h. Unplanmäßige und kurzfristige Abschaltungen führen zu Problemen mit dem Feuerfestmaterial in den Öfen und zu einem stark erhöhten Reparaturaufwand. In anderen Industrien (z.B. Stahl, Glas) ist die Elektrifizierung der thermischen Prozesse Stand der Technik. In der Zementindustrie wurde dies aufgrund vorhandener Limitierungen wie beispielsweise dem extrem hohen Strombedarf jedoch nie praktisch untersucht.

Aufgrund fehlender Praxiserfahrungen in der Zementherstellung mit der Verstromung des Brennprozesses und dem kontinuierlichen Betrieb der Öfen wurde der Fokus in den hier dargestellten Untersuchungen auf die Zerkleinerungsprozesse gelegt. Nach aktuellem Stand der Technik kann der Brennprozess bei der Klinkerherstellung nicht flexibilisiert werden.

## 1.3 VDZ-Modell zur Einschätzung der technischen Flexibilitätspotentiale

### 1.3.1 Flexibilitätspotential für kurz-, mittel- und langfristige Anforderungen

Die Zementindustrie weist im Bereich der Materialzerkleinerung zunächst theoretisch ein hohes Potential zur flexiblen Lastabnahme und -bereitstellung durch zeitliche Verschiebung der Produktion auf. Dabei kann die eingesetzte Energie sozusagen in Form der feingemahltenen

Produkte gespeichert werden. Besonders die Zementmühlen eignen sich hierfür. Ein Teillastbetrieb der Mahlanlagen ist allerdings aufgrund technischer Gegebenheiten des Zerkleinerungsprozesses meist nicht möglich.

Zur einheitlichen Beschreibung der Flexibilisierungspotentiale wurden die für die Zusammenarbeit im SynErgie-Projekt notwendigen Informationen in Anforderungsprofilen projektweit beschrieben:

- **Anforderungsprofil 1 (AP1):** Kurzfristige Flexibilität mit Änderung der Leistungsaufnahme während ca. 1 Stunde (siehe **Anhang B Bild B-1**)
- **Anforderungsprofil 2 (AP2):** Mittelfristige Flexibilität mit Änderung der Leistungsaufnahme während ca. 3 bis 12 Stunden (siehe **Anhang B Bild B-2**)
- **Anforderungsprofil 3 (AP3):** Langfristige Flexibilität mit Änderung der Leistungsaufnahme während ca. 1 bis 5 Tagen (siehe **Anhang B Bild B-3**)

Die technischen Potentiale und Kapazitäten zur Lastverschiebung wurden im Rahmen des Projektes durch den VDZ in einem ersten Modell basierend auf statistischen Daten abgebildet **[Ver17b]**. 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 Stillstandszeiten, 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 sowie einem tendenziell zunehmendem Produktionsausschuss (**Kapitel 1.4.12**).

Die Bereitstellung von Kapazitäten zur Lastflexibilisierung mit mittlerer Abrufdauer (4-12 Std.) entsprechend dem **Anforderungsprofil 2** scheint technisch durch Lastverschiebung mit einer Garantie zum Nachholen ausgefallener Produktionszeiten möglich. Hierbei bleiben insgesamt ausreichend lange zusammenhängende Produktionszeiträume von i.d.R. mehr als 4 Stunden kontinuierlichem Betrieb erforderlich, um negative Auswirkungen auf die Produktqualität zu vermeiden. Eine besondere Herausforderung stellen hierbei die Personalplanung, die zusätzliche Bereitschaft von Personal und daraus entstehende erhöhte Personalkosten dar (**Kapitel 1.3.7.5**).

Der langfristigen Lastverschiebung für längere Stromknappheitsperioden wie in **Anforderungsprofil 3** beschrieben (bis zu 5 Tage), kann in den meisten Fällen nur mit Anpassung der Silokapazitäten entsprochen werden (**Kapitel 1.4.8.1**). 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 (**Kapitel 1.4**).

### 1.3.2 Modellstruktur

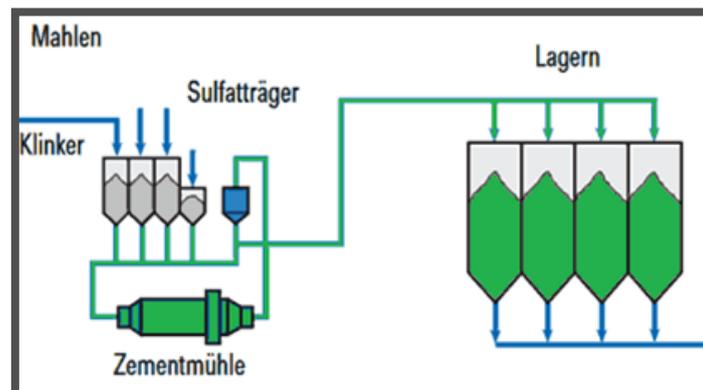
Zur übergreifenden Beschreibung des technischen Flexibilitätspotentials der Mahlanlagen in Zementwerken in Deutschland wurden zunächst zwei Modellansätze entwickelt. Hierbei wurden für alle 34 Zementwerke mit eigener Klinkererzeugung ein Betrieb der beiden ausgewählten Prozesse, das heißt Rohmahlung und Zementmahlung, angenommen.

**Werke mit Klinkerproduktion (Modell 2)** werden in dieser Studie als integrierte Zementwerke bezeichnet. Bei den 21 Zementwerken ohne eigene Klinkererzeugung handelt es sich um Mahlwerke. Diese erhalten die Mahlgüter meist aus anderen Werken und von externen Zulieferern. In der Regel wird Klinker zusammen 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 (Modell 1)** nur der Prozess Zementmahlung angenommen. Hierbei wird im Vergleich mit den integrierten Werken im Mittel von einer etwas niedrigeren Zementproduktion und geringeren Anzahl an Zementmühlen ausgegangen.

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 [VJ16], in dem die Silokapazität und ihre Füllung mit Produkt als Speicher genutzt wird. Für drei unterschiedliche Betriebssituationen (Hauptsaison, Nebensaison, Revisionszeit) ergeben sich so unterschiedliche technische Potentiale zum flexiblen Energieeinsatz. Insgesamt können die modellierten mittleren Werte nicht die standort-spezifischen Gegebenheiten und Betriebsweisen der einzelnen Werke wiedergeben. Aus diesem Grund wurde in der zweiten Projektphase das Lastflexibilisierungspotential von zwei Referenzwerken unter Berücksichtigung dieser Gegebenheiten näher untersucht (**Kapitel 1.4**). 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 [Ver17a]. Soweit möglich sind Voraussetzungen und Hemmnisse, die das eingeschätzte technische Flexibilitätspotential praktisch und ökonomisch weiter einschränken, in den **Kapiteln 1.3.6** und **1.3.7** 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 1.3.6.4**) durch erforderliche werksspezifische Voraussetzungen sowie praktische und ökonomische Hemmnisse weiter eingeschränkt werden.

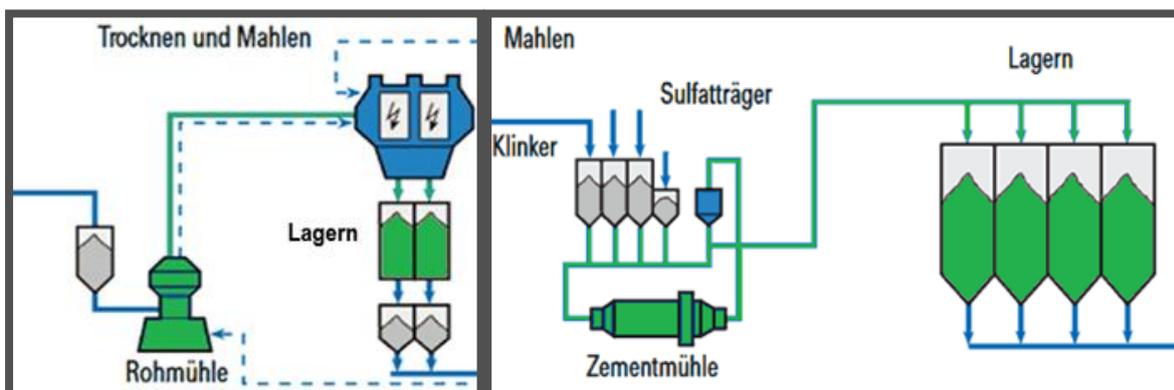
### 1.3.3 Beschreibung der Modellparameter

In **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 1-3**). Die Produktionskapazität wurde mit 97 t/h Zement abgeschätzt.



**Abbildung 1-3** 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 1-4**).

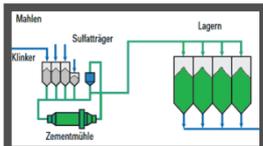
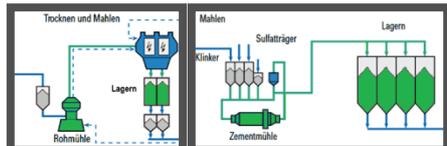


**Abbildung 1-4** Schematische Darstellung Modell 2: Integriertes Zementwerk mit Rohmahlprozess und Zementmahlprozess

In Modell 1 und 2 werden die Speicherkapazitäten der Ausgangsstoffe im Klinkerlager bzw. Rohsteinlager als nicht limitierend angenommen. Die wesentlichen Modellparameter der ausgewählten Prozesse für den flexiblen elektrischen Energieeinsatz wurden anhand der im

VDZ verfügbaren statistischen und technischen Daten als Mittelwerte abgeschätzt und sind in **Tabelle 1-1** zusammengefasst.

**Tabelle 1-1** Beschreibung der Mühlen in den VDZ-Modellen 1 und 2

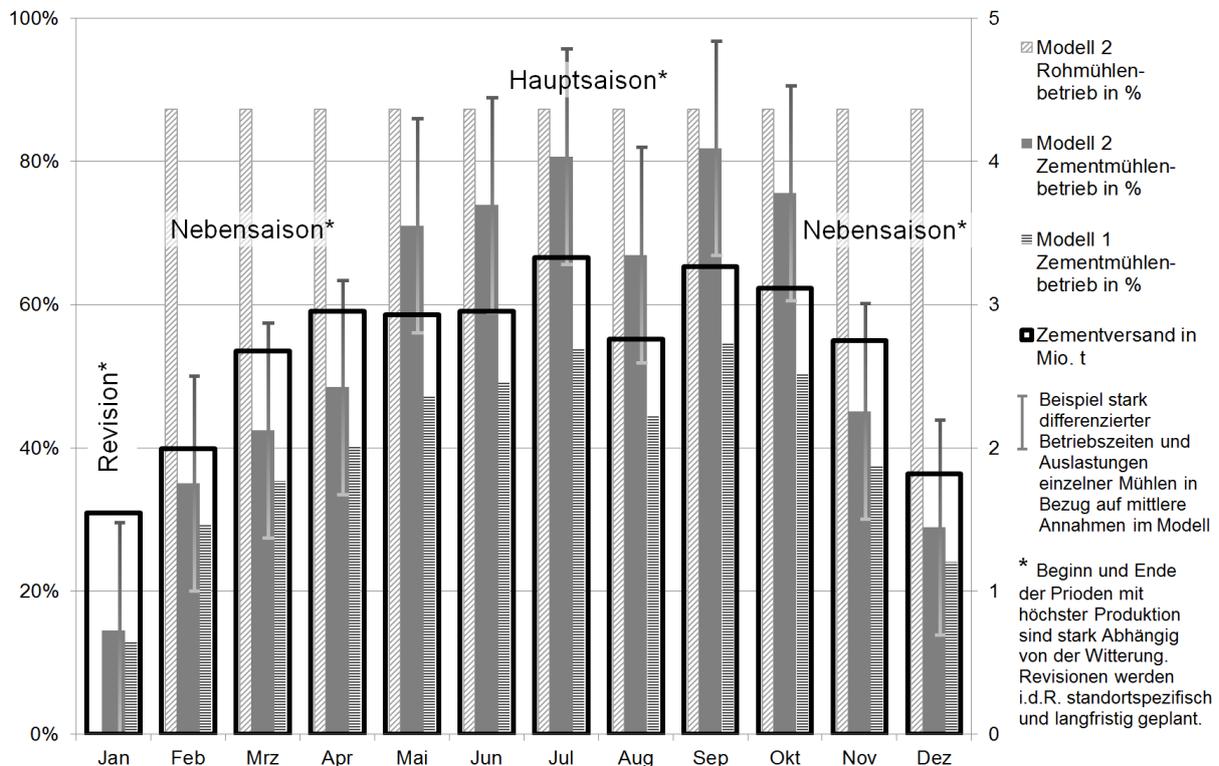
	Einheit	Modell 1: Mahlwerk	Modell 2: Integriertes Zementwerk mit Klinkerproduktion
Ausgewählte Prozesse für flexiblen elektrischen Energieeinsatz		 Zementmahlung	 Rohmahlung, Zementmahlung
Zementmühlen	Anzahl	2,4	3,8
Rohmühlen	Anzahl	-	1
Spez. Energiebedarf Zementmahlung	kWh/t Zement	51	51
Spez. Energiebedarf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

### 1.3.4 Saisonale Nutzung der Produktionskapazität

Die Zementproduktion zeigt eine deutliche Abhängigkeit von der Saisonalität der Baubranche (**Abbildung 1-5**). 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. In der Regel wird ein circa einmonatiger Stillstand der Klinkerproduktion für eine Revision innerhalb der Saison mit schwacher Nachfrage im Winter eingeplant. Vereinzelt wurde die Verschiebung der Winterreparatur diskutiert, allerdings ist die Terminfindung nicht flexibel, da sie unter anderem 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 1-5** Geschätzter Verlauf des Mühlenbetriebs für Modell 1 und 2 und des Zementversands von Zementwerken in Deutschland

Es zeigt sich eine deutliche Abhängigkeit zur Versorgungssicherheit für den Absatz des Produktes Zement in den nachfragestärksten Jahreszeiten und hinsichtlich möglicher kurzfristiger Produktnachfragen (**Abbildung 1-5**). 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 Lastverschiebungen für längere Zeiträume möglich. Standortspezifisch kann ggf. durch organisatorische Maßnahmen die Koordination der Mühlenlaufzeiten derartige Anforderungen erfüllen.

Die in **Abbildung 1-5** dargestellten anteiligen Betriebszeiten sind als mittlere Modellannahmen zu verstehen. Standort- und marktbedingt können sich deutliche Abweichungen ergeben. Auch innerhalb eines Werkes kann sich die Auslastung einzelner Mühlen je nach Produktnachfrage stark unterscheiden (vgl. **Abbildung 1-6** und **Abbildung 1-7** für spezifische Referenzwerke). Dementsprechend wurde für die Auswertung der saisonal variierenden Mühlennutzung ein weiter Schwankungsbereich abgeschätzt. Dieser ist exemplarisch für Modell 2 und den Zementmühlenbetrieb in **Abbildung 1-5** dargestellt. Zur weiteren Berücksichtigung der Variation zwischen einzelnen Werken wurden außerdem für Modell 1 und 2 z. T. unterschiedliche Annahmen getroffen (**Tabelle 1-3**), ohne dass diese eindeutig einem unterschiedlichen Betrieb von Mahlwerken und integrierten Zementwerken zuzuordnen sind.

**Tabelle 1-2** Geschätzte Mühlennutzung in Deutschland, 2014

	<b>Modell 1: Zementmühlen</b>	<b>Modell 2: Zementmühlen</b>	<b>Modell 2: Rohmühle</b>
Hauptsaison	30% bis 70%	50% bis 100%	75% bis 100%
Nebensaison	10% bis 55%	15% bis 65%	65% bis 100%
Revisionszeit	0% bis 35%	0% bis 35%	0%

### 1.3.5 Produktspeicherkapazität in Silos

Die weiteren Voraussetzungen 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 Drehrohrofens zur Klinkerherstellung im Fall eines Ofenstillstands, weil die Rohmehlproduktion hinsichtlich der Rohmaterialtrocknung selbst vom Ofenbetrieb abhängig ist (**Tabelle 1-3**).

**Tabelle 1-3** Geschätzte Silogrößen und –nutzung

	<b>Modell 1: Zementsilos</b>	<b>Modell 2:</b>	
		<b>Zementsilos</b>	<b>Rohmehlsilos</b>
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%

### 1.3.6 Technisches Flexibilitätspotential der Roh- und Zementmahlung

#### 1.3.6.1 Kurzfristige Flexibilität 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). 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 in der Regel zusätzliches Personal in Bereitschaft (**Kapitel 1.3.7.5**). 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 Std. 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 1-4** und **Tabelle 1-5**). Die Produktspeicherkapazität ist ausreichend groß, um kurzfristige Abschaltungen der Mühlen überbrücken zu können, wenn wie im Produktionsbetrieb eines Zementwerks üblich, möglichst volle Silostände angestrebt werden. Die Einschätzung der maximalen Regelenergie ergibt sich aus der maximalen Dauer der kurzfristigen Lastminderung entsprechend der Beschreibung des Anforderungsprofils 1 sowie der maximalen positiven Regelleistung.

**Tabelle 1-4**                      Einschätzung der technischen Potentiale zum flexiblen Energieeinsatz für kurzfristige Lastminderung nach Anforderungsprofil 1

Positive Regelleistung durch kurzfristige Lastminderung	Einheit	Modell 1: Mahlwerk	Modell 2:		
			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	Std.	0,25 bis 2	0,25 bis 2	0,25 bis 2	0,25 bis 2
Einschätzung zum minimalen zeitlichen Abstand zwischen Lastanpassungen	Std.	> 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

**Tabelle 1-5** Einschätzung der technischen Potentiale zum flexiblen Energieeinsatz für kurzfristige Lasterhöhung nach Anforderungsprofil 1

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

### 1.3.6.2 Mittelfristige Flexibilität nach Anforderungsprofil 2

Die Einschätzung der technischen Potentiale zur mittelfristigen Flexibilität nach Anforderungsprofil 2 erfordert 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 maximalem Silofüllstand. Um gleichzeitig positive und negative Regelleistungsanforderungen zu erfüllen, 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 1-6, Tabelle 1-7**). 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 regelmäßig 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 1-6, Tabelle 1-7**). Die Mühlen sind technisch in der Regel auf die Produktion bestimmter Zementsorten ausgelegt und optimiert. Es stehen also für die Produkte einer Mühle im Regelfall nicht alle Silos mit ihrer Speicherkapazität zur Verfügung. Es kann in

erster Näherung davon ausgegangen werden, dass in Bezug auf die Produktionskapazität einer großen Mühle, die für ihre Produkte verfügbare Silokapazität im Verhältnis 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 Lagerbestände 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 Std.) sondern eher anhand der beschränkten Möglichkeit zum Nachholen der Produktion bei hoher Kapazitätsauslastung der Rohmühle eingeschätzt werden (geringes bzw. ggf. fehlendes Potential, 0 Std., **Tabelle 1-6**). Aufgrund dieser Bedingung scheint weiterhin eine Beendigung der Lastverschiebung nach 24 Std. erforderlich. Die oft einmonatige Revision der Ofenanlage bedingt gleichzeitig den geplanten Stillstand der Rohmühle, sodass bei der Rohmahlung während der Revisionszeit kein Flexibilitätpotential verfügbar ist. Entsprechend der möglichst vollständigen Füllung der Rohmehlsilos ist bei der Rohmahlung auch mittelfristig in der Regel keine negative Regelleistung durch Lasterhöhung verfügbar (**Tabelle 1-7**). 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 1-7**).

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 hohe Auslastung der Zementmühlen 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.



**Tabelle 1-6** Einschätzung der technischen Potentiale zum flexiblen Energieeinsatz für mittelfristige Lastminderung nach Anforderungsprofil 2

Positive Regelleistung durch mittelfristige Lastminderung		Modell 1: Mahlwerk	Modell 2:		
			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	Std.	3 bis 12	3 bis 12	0 bis 12	3 bis 12
Einschätzung zur möglichen zeitlichen Lastverschiebung	Std.	ca. 48 bis 72	ca. 48 bis 72	ca. 24	ca. 24 bis 48
Theoretisch maximaler Speicherinhalt (alle Silos)*	MWh	610	950	100	1030
Maximale positive Regelenergie (Volllast)	MWh	15 bis 60	23 bis 93	0 bis 36	32 bis 128
Positive Regelenergie (eine große Mühle je Werk)	MWh	ca. 8 bis 30	ca. 11 bis 42	ca. 0 bis 36	ca. 11 bis 42
<b>Einschätzung der saisonalen Verfügbarkeit</b>					
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

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

**Tabelle 1-7**      Einschätzung der technischen Potentiale zum flexiblen Energieeinsatz für mittelfristige Lasterhöhung nach Anforderungsprofil 2

Negative Regelleistung durch mittelfristige Lasterhöhung	Einheit	Modell 1: Mahlwerk	Modell 2:		
			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 Lasterhöhung entsprechend Anforderungsprofil 2	Std.	4 bis 12	4 bis 12		4 bis 12
Einschätzung zur möglichen zeitlichen Lastverschiebung	Std.	ca. 48 bis 72	ca. 48 bis 72		ca. 48 bis 72
Maximale negativ 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
<b>Einschätzung der saisonalen Verfügbarkeit</b>					
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

### 1.3.6.3 *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 [VJ16]. Die Analyse der Ergebnisse hat 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 Flexibilitätspotentials zur langfristigen Lastanpassung nach Anforderungsprofil 3 sind neben der Regelernergie gemäß des theoretisch maximal möglichen Speicherinhalts aller Silos (**Tabelle 1-6**) 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 in der Regel nicht verfügbar oder stark eingeschränkt. Ähnliche Einschränkungen wurden für den flexiblen Rohmühlenbetrieb und das Nachholen der Produktion bei hoher Kapazitätsauslastung der Rohmühle beschrieben (**Kapitel 1.1.1**).
- 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 Abrufzeiten in der Regel 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 der Beauftragung von externen Dienstleistern lässt in der Regel 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 wird zunächst kein Potential für eine langfristige negative Regelleistung durch andauernde Lasterhöhung in Zementwerken gesehen.

#### 1.3.6.4 *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 ausgewählten Prozesse Rohmahlung und Zementmahlung für die Zementindustrie in Deutschland. Zu betonen bleibt, dass viele standortspezifische Einschränkungen des technischen Potentials für eine genauere Einschätzung notwendig sind.

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 Anforderungen seitens des Energieversorgers zur Lastreduktion 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 unter anderem

- 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 in der Regel 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.

Derartig 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 bezüglich der Regelleistung bei mittelfristigen Lastanpassungen nach Anforderungsprofil 1 und 2 auf das Potential einer großen Mühle pro Werk eingeschränkt (**Abbildung 1-5**). Dadurch wird aus dem Modell ausschließlich die Zementmahlung in Betracht gezogen. In einem Werk mit Klinkerproduktion, in dem sich ein standortspezifisch besseres Flexibilitätspotential für die Rohmahlung ergibt, würde dieses anstelle des Flexibilitätspotentials der Zementmühle genutzt werden.

**Tabelle 1-8** 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.

	Positive Regelleistung durch Lastminderung	Negative Regelleistung durch Lasterhöhung	Zeitraumen der Lastanpassung
Einheit	MW	MW	Std.
Kurzfristige Lastanpassungen nach Anforderungsprofil 1 (eine große Mühle je Werk)	ca. +172	i.d.R. nicht kurzfristig verfügbar	0,25 bis 2 Std., nachfolgend > 4 Std. garantierter Betrieb und Nachholen der Lastminderung
Mittelfristige Lastanpassungen nach Anforderungsprofil 2 (eine große Mühle je Werk)	ca. +172	ca. -172	4 bis 12 Std., Lastverschiebung: ca. 48 Std.
Langfristig Lastanpassungen nach Anforderungsprofil 3	qualitative Bewertung in <b>Kapitel 1.4.8</b>		

Zur weiteren Einschränkung des Flexibilitätspotentials bleiben Hemmnisse und Voraussetzungen zur praktischen Umsetzung und hinsichtlich der ökonomischen Voraussetzungen, das heißt der gegebenenfalls nötigen Investitionen und der Kompensation des zusätzlichen Betriebsaufwands zu berücksichtigen (siehe auch **Kapitel 1.3.7**).

#### 1.3.6.5 Ergebnisübersicht

Tatsächlich in der Betriebspraxis nutzbare und ökonomisch realisierbare Potentiale sind grundsätzlich geringer als die modellierten und technischen Potentiale einzuschätzen (**Kapitel 1.3.2**). Somit müssen die hier dargestellten technischen Potentiale und ihre theoretische Hochrechnung in **Tabelle 1-9** 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 weiter einschränken, in den **Kapiteln 1.3, 1.4 und 1.4.12** beschrieben.



**Tabelle 1-9** Einschätzung technischer Potentiale zum flexiblen Energieeinsatz in der Roh- und Zementmahlung in Deutschland. Hochrechnung als Summe für Zementwerke in Deutschland für Mahlwerke und für integrierte Zementwerke mit Klinkerproduktion.

Ausgewählte Prozesse und Modell	Branche, Werke	Regelleistung	Maximales Technisches Potential (Volllast)	mittlere Auslastung, Betriebsstunden pro Jahr	Technisches Potential (Lastverschiebung für eine große Mühle je Werk bei mittlerer Auslastung)			Eingeschränktes technisches Potential unter Berücksichtigung von 50% Verfügbarkeit <sup>1</sup>	
			MW	%, Std.	MW	MW	MW	MW	MW
					AP 1 <sup>2</sup>	AP 2	AP 3 <sup>3</sup>	AP 1	AP 2
Zementmahlung, Modell 1	Zementmahlwerke	Lasterhöhung(negativ)	-105	40%, 3500 Std.	i.d.R. kein Potential	-52	derzeit i.d.R. kein Potential	i.d.R. kein Potential	i.d.R. kein Potential
		Lastminderung(positiv)	+105	40%, 3500 Std.	+52	+52	eingeschränkt< 52	+26	+26
Zementmahlung, Modell 2	integrierte Zementwerke	Lasterhöhung (negativ)	-263	57%, 5000 Std.	i.d.R. kein Potential	-120	derzeit i.d.R. kein Potential	i.d.R. kein Potential	-60
		Lastminderung (positiv)	+263	57%, 5000 Std.	+120	+120	eingeschränkt< 120	+60	+60
Rohmahlung, Modell 2	integrierte Zementwerke	Lasterhöhung (negativ)	0	80%, 7000 Std.	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
		Lastminderung (positiv)	+100	80%, 7000 Std.	+100	+100	eingeschränkt < 100	+50	+50
Zementmahlung, Modelle 1+2: alle Zementwerke	Zementindustrie	Lasterhöhung (negativ)	-470		i.d.R. kein Potential	-172	derzeit i.d.R. kein Potential	i.d.R. kein Potential	-86
		Lastminderung (positiv)	+470		+172	+172	eingeschränkt< 172	+86	+86

<sup>1</sup> unter der Annahme, dass zum Zeitpunkt der Abfrage die Hälfte der Anlagen für eine Lastanpassung zur Verfügung steht.

<sup>2</sup> in der Regel keine kurzfristige Lasterhöhung möglich, Lastminderung 0,25 bis 2 Std., nachfolgend > 4 Std. garantierter Betrieb und nachholen der Lastminderung

<sup>3</sup> derzeit in der Regel kein langfristige Lasterhöhung möglich, Potential zur Lastminderung ist anlagenspezifisch und nach Lagerbestands-situation eingeschränkt

### 1.3.7 Hemmnisse und Einschränkungen des technischen Potentials

Die im **Kapitel 1.3.6** 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 1.3.6**. Im Folgenden werden auf der Grundlage der Expertengespräche wichtige Hemmnisse und Einschränkungen für die Nutzung der technischen Potentiale bezogen auf technische, organisatorische und ökonomische Aspekte zusammengefasst.

#### 1.3.7.1 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 Drehrohrföfen betrieben werden. Es ergeben sich hohe jährliche Einsatzstunden von oft ca. 7000 h/Jahr und – bezogen auf die Laufzeit des Drehrohrofens – häufig mehr als 90 % Auslastung der Rohmühlen. Da die Rohmühlen demnach in der Regel 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 im Hinblick auf eine optimale Energienutzung im Verbundbetrieb der Rohmahlung mit der Klinkerproduktion und der Absicherung der nachgelagerten Klinkerproduktion (siehe **Kapitel 1.1.1**). Dies gilt insbesondere, wenn die zwischengeschalteten Silos vergleichsweise geringe Kapazitäten oder einen 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 in der Regel nur über geringe Überkapazitäten und sind daher nur in den wenigsten Fällen in der Lage nicht stattgefundene Produktion kurzfristig wieder nachzuholen. Das Potential 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 emissionsschutztechnische Gründe gegen eine häufige Abschaltung der Rohmühle.

### 1.3.7.2 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 unter anderem 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 Abschalt Dauern (1 bis 4 Std.) problematisch werden.

Bei Wiederanfahrvorgängen und Sortenwechseln stellt sich unter Umständen nicht direkt die gewünschte Produktqualität ein. In Übergangsphasen könnten sehr geringe Mengen des beim Anfahren erzeugten, unfertigen Produkts zwischengelagert werden (bspw. in Abmahlsilos). 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 %.

### 1.3.7.3 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 Drehrohrföfen als kritische Größe zu betrachten. Der Füllstand der Silos ist entscheidend für die Betriebssicherheit. 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 1-3**). 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. Die Nachentwässerung ist abhängig vom Entwässerungsgrad des Gipses in der Mühle. 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 nach 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.

#### 1.3.7.4 *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 Stillstandzeiten 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 **[Ver17a]** 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 erzielbaren ökonomischen Anreize 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 ableitbar. Besonders die in Anforderungsprofil 1 aufgezeigte Perspektive kann die Häufigkeit der Ein- und Abschaltvorgänge jedoch stark vergrößern und könnte damit den Verschleiß stark erhöhen.

Entsprechend 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. Hierzu gibt es jedoch noch keine geeigneten Betriebserfahrungen aus einzelnen Zementwerken.

Ein wichtiges ökonomisches Hemmnis stellt die große Ungewissheit in Bezug auf die zukünftige Entwicklung am Strommarkt dar. Um Flexibilität im Stromeinsatz zu ermöglichen, sind in der Regel langfristig zu amortisierende Investitionen seitens des Zementwerksbetreibers nötig. Entsprechend muss eine ausreichende Planungssicherheit bestehen, dass diese Investitionen langfristig ökonomisch tragfähig sind. Dies gilt insbesondere falls Silokapazitäten erweitert werden müssten, was sehr hohe Investitionen erfordern würde. Aus heutiger Sicht sind diese Investitionen nicht wirtschaftlich darstellbar.

Ein weiteres ökonomisches Risiko ergibt sich aus möglichen Lastspitzen, die einen höheren Leistungspreis<sup>4</sup> nach sich ziehen. Wie oben beschrieben werden durch genaue zeitliche Planung und Steuerung der Einsatzzeiten großer Stromverbraucher Lastspitzen nach Möglichkeit vermieden bzw. reduziert. Eine Flexibilisierung erhöht hier den Abstimmungsbedarf zwischen Zementwerksbetrieb und Stromanbieter und damit die Wahrscheinlichkeit von Abstimmungsproblemen, die Möglichkeit für gravierende Fehler **[Br17]** und hierbei entstehende ökonomische Risiken. Um diese Risiken für die Zementwerksbetreiber zu reduzieren, könnten z.B. vertragliche Garantien gegeben oder Ausnahmeregeln 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 in der Regel 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.

<sup>4</sup> 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).

#### 1.3.7.5 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 genutzte Tarifmodell gekoppelt. Ein voll integriertes Werk wird von einer Besetzung von lediglich circa 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 **[Ver17a]** 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 4.2**). 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 kurzfristig geplanten Lastwechseln nach Anforderungsprofil 1 zu entsprechen, wäre eine ausreichende Personaldecke 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 (Personal-)Leerlaufzeiten 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.

#### 1.3.7.6 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 schwierig. 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 in der Regel nur im Ein- oder Zweischichtbetrieb (in der Regel Spät-/Nachtschicht). Ein Potential 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 niedriger 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 von Sonnenenergie 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 unter anderem durch die Terminfindung mit vielen externen Unternehmen langfristig vorgenommen, sodass 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. Bezüglich 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.

## 1.4 Bestimmung des Flexibilitätspotentials bei flexibler Betriebsweise der Zementmühlen in zwei Referenzwerken

Das Lastflexibilisierungspotential hängt von standortspezifischen Faktoren eines Zementwerks ab. Zu diesen Faktoren zählen im Wesentlichen die Anzahl und Kapazität der Zementmühlen, die zeitliche Auslastung der Zementmühlen im Jahresverlauf sowie die gesamte Silokapazität eines Zementwerks. Darüber hinaus spielen Randbedingungen wie der Standort des Zementwerks, die lokale Baukonjunktur bzw. die Versandverpflichtungen aber auch zementwerksinterne Planungszeiträume wie beispielsweise Mühlenrevisionszeiten zur Bewertung des Lastflexibilisierungspotentials eine Rolle.

Um diese Rahmenbedingungen in die Einschätzung von Flexibilitätspotentialen miteinbeziehen zu können, wurde das Potential anhand der Anlagen- und Betriebsdaten aus zwei Referenzwerken weiter konkretisiert. Somit konnten die in der ersten Projektphase erzielten Ergebnisse (**Kapitel 1.6.2**), die auf statistischen Daten der gesamten deutschen Zementindustrie basieren, anhand der Fallbeispiele detaillierter und praxisnäher untersucht werden. Im Gegensatz zu der ersten statistischen Auswertung für ein mittleres Zementwerk, welche sich im Wesentlichen auf das technische Potential einer großen mittleren Mühle beschränkt, werden nun alle Zementmühlen der Referenzwerke in die Bewertung einbezogen. Die Komplexität der Bewertung des Flexibilitätspotentials vor dem Hintergrund saisonaler Produktionsverläufe wurde zuvor dargestellt. Um die dynamischen und stark verketteten Prozesse in sinnvoller Weise abbilden zu können, wurde ein Modell entwickelt, welches die Mühlenfahrweise abbildet.

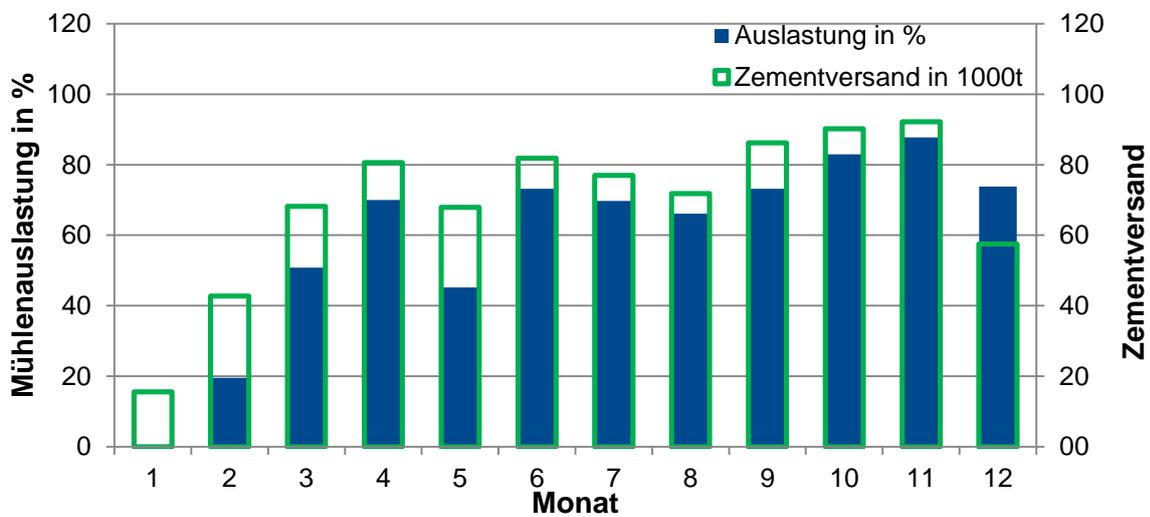
### 1.4.1 Erhebung und Aufbereitung der Modelleingangsdaten

Die weitere Untersuchung der Flexibilitätsoptionen, entsprechend der im Projekt formulierten Anforderungsprofile für den flexiblen Stromeinsatz, erfolgt auf der Basis einer vereinfachten Anlagenstruktur aus Zementmühlen und Produktsilos und anhand von Zeitreihen, die reale Produktionsverläufe in Zementwerken im Jahresverlauf abbilden. Eine Übersicht der genutzten Zeitreihen ist im **Anhang A in Tabelle 6-1** zusammengefasst.

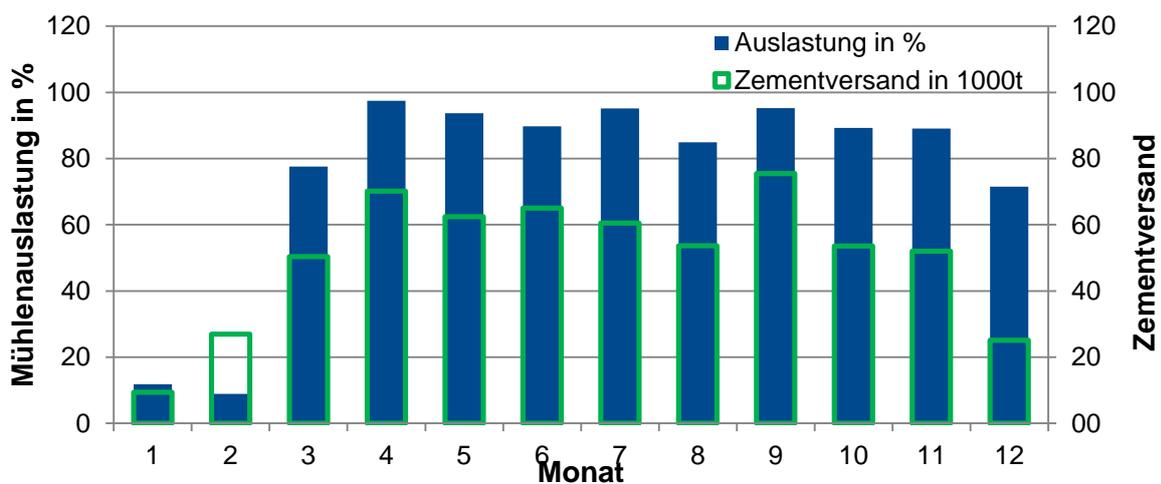
Hierzu wurden Produktionsdaten eines Zementwerks in einem ersten Schritt der Modellierung zu einer konsistenten stündlichen Datenbasis und vollständigen Jahresverläufen als "Referenzbetrieb" aufbereitet. Die unterschiedlichen Daten wurden somit zur Konsolidierung der Massenbilanzen und korrekten Erfassung der stündlichen Mühlenproduktionsdaten benötigt. Im zweiten Schritt wurden technische und planerische Produktionsbedingungen formuliert, die erfüllt sein müssen, um einen flexiblen Betrieb zu ermöglichen. Das Modell wurde dann mit den Anforderungsprofilen für einen flexiblen Stromeinsatz parametrisiert.

Um das Lastflexibilisierungspotential der einzelnen Zementmühlen bewerten zu können, wurden Mühlenbetriebsdaten für zwei Referenzjahre genutzt. Zu den zeitabhängigen Modelleingangsdaten der Referenzwerke gehören der Zementversand und die Produktionsziele. Neben den Zeitreihen der genannten Modelleingangsdaten sind auch die notwendigen Betriebsdaten der Anlagen erhoben worden. Hierzu gehören mittlere sortenspezifische Angaben, wie der Durchsatz der Mahlanlagen deren Energiebedarf und Antriebsleistung (**Kapitel 1.4.2**).

In **Abbildung 1-6** und **Abbildung 1-7** sind die monatlichen Mühlenauslastungen der größten Zementmühle sowie die monatlichen Versandmengen für die untersuchten spezifischen Referenzwerke 1 und 2 jeweils im ersten Referenzjahr dargestellt. Der Zementversand sowie die Mühlenauslastung weichen teilweise stark von den Werten des mittleren Zementwerks ab (siehe auch **Abbildung 1-5**). In den beiden Abbildungen sind direkt die jährlichen Wartungszeiträume in den Monaten Januar und Februar (geringere Mühlenauslastung) zu erkennen. Im Anhang sind zudem in **Abbildung 6-6** und **Abbildung 6-7** für das zweite Referenzjahr für die jeweiligen Referenzwerke die entsprechenden Daten dargestellt.



**Abbildung 1-6** Monatliche Mühlenauslastung und Zementversand für die größte Zementmühle in Referenzwerk 1 und Referenzjahr 1



**Abbildung 1-7** Monatliche Mühlenauslastung und Zementversand für die größte Zementmühle in Referenzwerk 2 und Referenzjahr 1

#### 1.4.2 Beschreibung der Referenzwerke

Das Referenzwerk 1 verfügte im ersten Referenzjahr über drei Zementmühlen. Im zweiten Referenzjahr 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 8 unterschiedliche Zementsorten produziert. Für die Produktlagerung und um eine kontinuierliche Verfügbarkeit der Produkte für die Kunden des Zementwerks sicherzustellen, stehen 13 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.

Im Referenzwerk 2 wurden in den beiden modellierten Jahren 19 verschiedene Zementprodukte auf zwei Kugelmühlen produziert. Die gesamte Silokapazität der 24 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 [RT18a, S. 107]. Die beiden Kugelmühlen verfügen über installierte Antriebsleistungen von jeweils 1,3 MW und 3,6 MW. In **Tabelle 1-10** sind darüber hinaus die Hauptsorten sowie die mittleren Produktionsleistungen der einzelnen Zementmühlen in beiden Referenzwerken dargestellt.

**Tabelle 1-10** Mittlere Produktionsleistungen der Mahlanlagen sowie produzierte Hauptsorten je Mühle in Referenzwerk 1 und 2

	Zementmühle 1	Zementmühle 2	Zementmühle 3
Mittlere Produktionsleistungen für einzelne Zementsorten in t/h (Referenzwerk 1)	19 bis 54	73 bis 142	15
Mittlere Produktionsleistungen für einzelne Zementsorten in t/h (Referenzwerk 2)	12 bis 73	38-129	-
Zementsorten mit hoher Jahresproduktion (Referenzwerk 1)	CEM II/B-S 42,5 N, CEM II/A-S 42,5 R, CEM II/A-M (S-LL) 42,5 N	CEM I 52,5 N CEM II/A-S 42,5 R, CEM II/A-M (S-LL) 42,5 N	CEM II/A-S 42,5 R
Zementsorten mit hoher Jahresproduktion (Referenzwerk 2)	Fluasit (Bindemittel) CEM II/A-M (S-L) 42,5 N CEM I 42,5 R-SR CEM I 52,5 R	CEM II/A-M (S-L) 42,5 N CEM II/A-S 42,5 R CEM I 42,5 R-SR CEM II/B-S 42,5 N (DZ)	-

### 1.4.3 Modellrandbedingungen

Die Anforderungen und Hemmnisse an die Mahltechnik bei zunehmender Flexibilisierung der Anlagen sind bereits in **Kapitel 1.3.7** erläutert worden. Hierzu zählen die minimalen und maximalen Silofüllstände, welche unter anderem die Versandfähigkeit sicherstellen sowie die Mindestbetriebszeit der Zementmühle, die für eine zuverlässige Produktqualität und ausreichende Effizienz bei der Produktion erforderlich sind. An diese Ergebnisse wird hier angeknüpft.

Bei Unterschreitung des minimalen Füllstands (FG Min 1) ist die Produktion ungeachtet sonstiger Randbedingungen auf einer geeigneten Mühle aufzunehmen. Neben den genannten minimalen und maximalen Füllstandsgrenzwerten der Silos wurde ein technisch minimaler Grenzwert definiert. Um die Betriebsfähigkeit der Silos gewährleisten zu können, wurde für das Modell ein minimaler technischer Füllstand von 20 % definiert. Dieser hat eine übergeordnete Priorität gegenüber dem in **Tabelle 1-11** genannten minimalen Füllstand. Grundsätzlich dürfen die technischen Grenzwerte nicht über- bzw. unterschritten werden, da die Silos bei diesen Füllständen nicht in normaler Weise weiterbetrieben werden können [**LL13, S. 38**]. Die Mindestmühlenbetriebszeit ist im Modell wiederum auf 4 Stunden festgelegt (**Kapitel 1.1.2**). Die Jahresversandmengen sind im Referenz- und Modellbetrieb gleichgroß. Der gleichbleibende jährliche Zementversand zwischen Referenz- und Modellmühlenbetrieb stellt eine wichtige Randbedingung in Bezug auf das Erlöspotential durch die Lastflexibilisierung dar, da ansonsten in Zeiten hoher Nachfrage Lieferverpflichtungen nicht eingehalten werden können. Die Abweichungen in Bezug auf die Jahresproduktionsmenge zwischen Modell- und Referenzmühlenbetrieb je Sorte (mit einem Anteil von < 1%) werden in der Kostenkalkulation durch einen Korrekturfaktor kompensiert, sodass ein konsistenter Vergleich der Ergebnisse zwischen Modell- und Referenzbetrieb möglich wird.

**Tabelle 1-11** Modellrandbedingungen

Randbedingung	Formelzeichen	Wert
Maximaler Füllstandsgrenzwert (technisch)	FG Max 1	100 %
Minimaler Füllstandsgrenzwert (Erfüllung der Lieferverpflichtungen)	FG Min 1	30 % bis 50 %*
Mindestmühlenbetriebszeit	MMBZ	4 h

\* kann variieren in Abhängigkeit des Referenzwerks

### 1.4.4 Kostenindex-Kriterium für den flexiblen Mühlenbetrieb

Um einen möglichst kosteneffizienten Produktionsbetrieb zu erreichen, wird die Mühle abgeschaltet, wenn hohe Strompreise auftreten. Da die Strompreise stark saisonabhängig sind, wird das Strompreiskriterium anhand eines gleitenden Mittelwertes in Abhängigkeit des

Anforderungsprofils, gebildet. Im Weiteren wurde das Strompreiskriterium als Limitierung für den Mühlenbetrieb im Modell variiert und entsprechend unabhängig von einzelnen Anforderungsprofilen als gleitender Mittelwert über einen Monatszeitraum gebildet (siehe **Anhang B Abbildung 6-2**). Auf diese Weise wirken sich stündliche Schwankungen des Kostenindex (**Glossar**) weniger stark auf das berechnete Strompreislimit (**Glossar**) aus. Für die Modellrechnungen werden historische Strompreiszeitreihen für die Referenzjahre zugrunde gelegt (siehe **Anhang C Abbildung 6-3**). Bei den verwendeten Strompreisdaten in stündlicher Auflösung handelt es sich um Börsenstrompreise, welche mit der realen Kostenstruktur in Zementwerken nicht vergleichbar sind. Sie können als Kostenindex für den flexiblen Stromeinsatz betrachtet werden. Allerdings können sie nicht direkt die erwarteten Änderungen von Stromkosten wiedergeben. In Abhängigkeit der Mühlenauslastung und des gewählten Referenzwerks wird als maximaler Strompreis ein Perzentil der Strompreise im analysierten Zeitraum (siehe **Anhang C Abbildung 6-2**) genutzt. Auf diese Weise werden ausreichend lange Mühlenproduktionszeiten zur Erfüllung der Produktionsziele entsprechend der zeitlichen Mühlenauslastung sichergestellt.

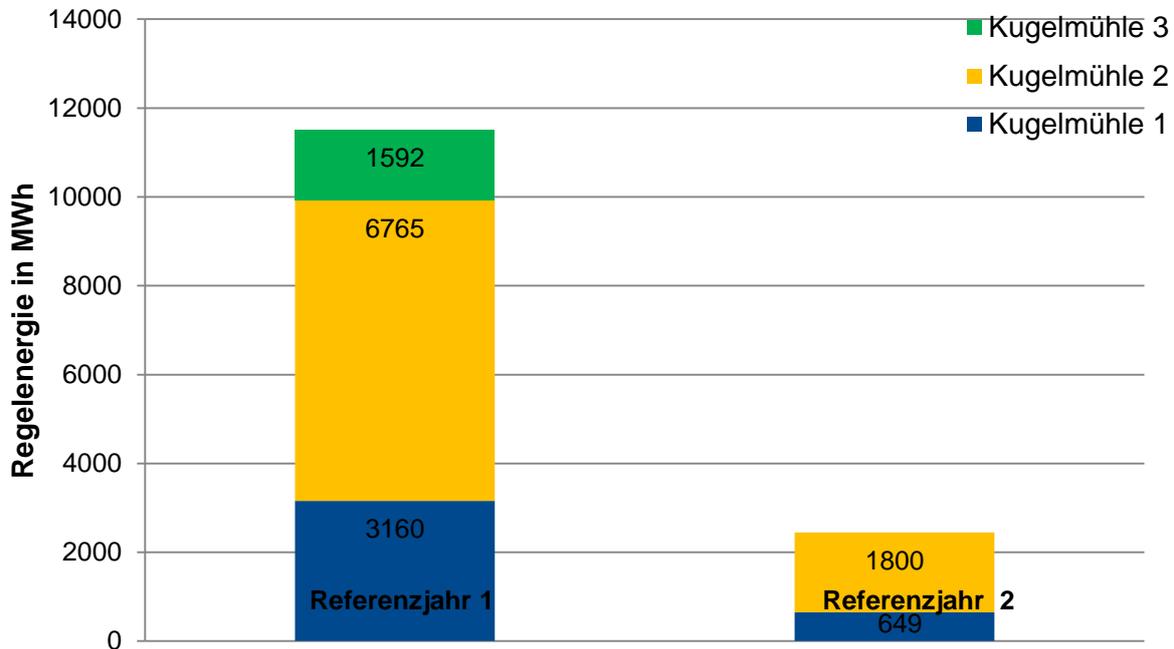
Die im Modell ermittelte flexibel nutzbare Regelenergie basiert hierbei auf einer Maximalabschätzung für die beiden Referenzwerke, da die installierten Mühlenantriebsleistungen den Berechnungen zugrunde gelegt werden und nicht die tatsächlich abgerufene Mühlenantriebsenergie im Jahresmittel.

#### 1.4.5 Parametervariation

Der Einfluss relevanter Eingangsparameter auf das resultierende Lastflexibilisierungspotential wurde anhand einer Parametervariation untersucht. Dementsprechend wurden die Parameter minimaler Silofüllstand und Mindestmühlenbetriebszeit im Rahmen der Parametervariation verändert. Die minimale Mühlenbetriebszeit wird hierbei zwischen 4, 6 und 8 Stunden variiert, das untere Silofüllstandslimit (FG Min1) zwischen 30 % und 50 % (**Tabelle 1-11**). Es zeigt sich hierbei, dass insbesondere die minimalen Silofüllstände einen Einfluss auf die Produktionsziele einzelner Sorten aufweisen und entsprechend angepasst werden müssen. Eine Erhöhung der minimalen Mühlenbetriebszeit auf maximal 8 Stunden weist in Bezug auf das ermittelte Lastflexibilisierungspotential (Regelenergie in MWh/Jahr) hingegen einen vernachlässigbaren Einfluss auf.

#### 1.4.6 Ergebnisse Anforderungsprofil 1

Positive Regelenergie kann im Fall einer Mühlenabschaltung im Modell, also einer Lastreduktion, bereitgestellt werden. Mit Hilfe der Modellberechnung wurde für Zementmühle 2 im ersten Referenzwerk mit der größten Produktionsleistung in beiden Referenzjahren das größte Lastflexibilisierungspotential ermittelt (siehe auch **Abbildung 1-8**). Deutlich zu erkennen ist der Einfluss der Außerbetriebnahme von Zementmühle 3 im zweiten Referenzjahr. Durch die höhere Mühlenauslastung bei etwa gleicher Jahresproduktion sinkt die bereitgestellte positive Regelenergie deutlich.



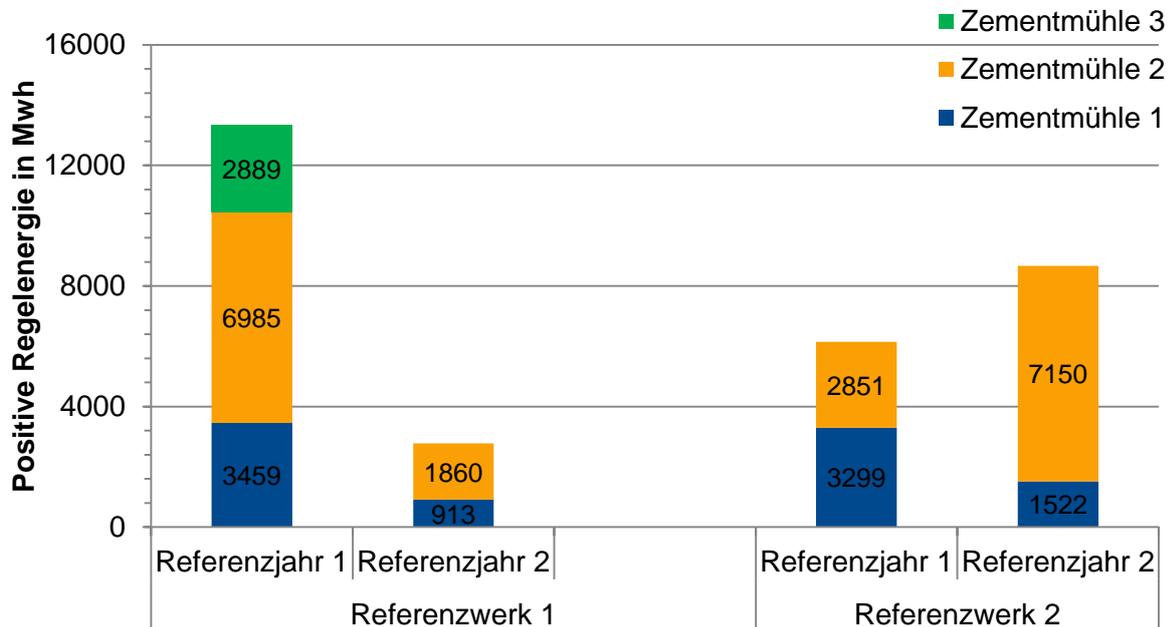
**Abbildung 1-8** Flexibel eingesetzte positive Regelenergie in Referenzwerk 1 für zwei unterschiedliche Referenzjahre bei einer Mindestmühlenbetriebszeit von 4 Std., **Links:** ZM1 bis ZM3 von unten nach oben und **Rechts:** ZM1 bis ZM2 von unten nach oben

**Abbildung 1-8** zeigt die flexibel eingesetzte positive Regelenergie im Jahresverlauf für alle Zementmühlen unter Berücksichtigung der in **Tabelle 1-11** beschriebenen Randbedingungen. Den Ergebnissen liegt hierbei ein Strompreislimit entsprechend der einzelnen Anforderungsprofile zugrunde (**Kapitel 1.4.4**). Das hohe Potential dieser Zementmühle von etwa 6.800 MWh im ersten Referenzjahr lässt sich auf die vergleichsweise geringe zeitliche Auslastung der Mühlen von 59 % (Referenz-Mühlenbetrieb) sowie auf die hohe installierte Antriebsleistung von 5,0 MW zurückführen. Im ersten Referenzjahr verteilt sich der gesamte Regelenergiebetrag zu 27 % auf Zementmühle 1, zu 59 % auf Zementmühle 2 und zu 14 % auf Zementmühle 3. Insgesamt beträgt die positive Regelenergie entsprechend diesem Anforderungsprofil 26 % (11.500 MWh) des Energiebedarfs zur Zementmahlung in diesem Jahr. Positive Regelenergie entsteht durch Lastabschaltung. Die ausgesetzte Produktion wird auf einen späteren Zeitpunkt verschoben oder durch vorherige Produktion ausgeglichen. Zu der positiven Regelenergie tritt somit zu einem anderen Zeitpunkt eine entsprechende negative Energieanpassung, d.h. eine Lasterhöhung und somit eine Einschaltung der Zementmühlen auf. In ähnlicher Größe wurde für ein durchschnittliches deutsches Zementwerk mit drei Zementmühlen und einer installierten Antriebsleistung von insgesamt 7,7 MW **[RT18a, S. 114]**

bei einer mittleren Mühlenauslastung von 51 % ein Lastflexibilisierungspotential von 21 % (1,6 MW) in Bezug auf die Antriebsleistung eingeschätzt. Bei Bezug auf den gesamten Stromeinsatz in einem Zementwerk, zu dem die Zementmahlung zu circa 40 % beiträgt [RT18a], läge der flexible Anteil hiernach bei bis zu 10 %.

Im zweiten Referenzjahr hingegen ist das Lastflexibilisierungspotential aufgrund der hohen zeitlichen Mühlenauslastung (Zementmühle 1: 90 % und Zementmühle 2: 82 %) deutlich geringer. In Summe liegt die verfügbare positive Regelernergie für das Anforderungsprofil 1 hier bei etwa 2.400 MWh. Das entspricht 5 % in Bezug auf die gesamte Antriebsenergie aller Zementmühlen in diesem Jahr.

In **Abbildung 1-9** sind nun die Ergebnisse für beide Referenzwerke zusammenfassend dargestellt. Die Ergebnisse wurden wiederum für minimale Mühlenbetriebszeiten von 4 Stunden ermittelt und basieren auf einem Strompreislimit, welches kontinuierlich über einen gleitenden Zeitraum von einem Monat gebildet wird (siehe **Kapitel 1.4.4**). Die Abbildung zeigt die verfügbare positive Regelernergie gemäß Anforderungsprofil 1 der beiden Werke im Vergleich. In Summe können im ersten Referenzjahr im Fall des ersten Referenzwerks etwa 13.300 MWh an positiver Regelernergie (Lastreduktion) zur Verfügung gestellt werden, im zweiten Referenzjahr hingegen lediglich 2.800 MWh. Die Reduktion der positiven Regelernergie zwischen den 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 Regelernergie 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 Regelernergiebeiträge der einzelnen Zementmühlen aus beiden Referenzwerken zum Gesamtergebnis sind in **Abbildung 1-9** jeweils in einem Balken dargestellt.



**Abbildung 1-9** Vergleich der flexibel eingesetzten positiven Regelernergie für zwei unterschiedliche Referenzwerke und Referenzjahre nach Anforderungsprofil 1 bei einer Mindestmühlenbetriebszeit von 4 Stunden, sowie einem minimalen Füllstandsgrenzwert (FG Min 1) von 50 % für Referenzwerk 1 und 30 % für Referenzwerk 2

#### 1.4.7 Ergebnisse Anforderungsprofil 2

Bei Betrachtung des Mühlenbetriebs liegt der wesentliche Unterschied zwischen Anforderungsprofil 1 und Anforderungsprofil 2 im veränderten Bezugszeitraum von zwei Tagen, welcher für die Ausrichtung auf das Produktionsziel angesetzt wird (**Kapitel 1.4.4**). Der Bezugszeitraum soll hierbei eine zeitliche Flexibilisierung des Mühlenbetriebs innerhalb einem dem Anforderungsprofil entsprechenden Zeitraum ermöglichen. Aus diesem Grund wird das Strompreislimit entsprechend eines Perzentils (in Abhängigkeit der Mühlenauslastung) in diesem Zeitraum gebildet.

**Tabelle 1-12** zeigt die berechnete Jahresregelernergie bei einer Laständerung über einen Zeitraum von mindestens 3 Stunden für das erste Referenzwerk (obere Tabellenhälfte, linke Spalte). Die hohe Differenz der verfügbaren Regelernergie zwischen beiden Referenzjahren lässt sich wiederum auf die unterschiedlichen zeitlichen Mühlenauslastungen zurückführen. Die gestiegene Auslastung im Referenzjahr 2 ergibt sich im Wesentlichen aus dem fehlenden Betrieb von Zementmühle 3. Zementmühle 2 weist im ersten Referenzjahr aufgrund der höchsten installierten Antriebsleistung von 5,0 MW analog zu dem Ergebnis für das Anforderungsprofil 1 das höchste Lastflexibilisierungspotential auf. Insbesondere die Laständerung der größten Mühle weist hierbei mit maximal 10 % im ersten bzw. maximal 4 %

im zweiten Referenzjahr (in Relation zum Gesamtenergiebedarf aller Mühlen) das größte Potential zur Lastflexibilisierung auf und bestätigt damit die im Projekt zuvor getroffenen Einschätzungen (siehe **Kapitel 1.3.2**).

Eine Erhöhung der Randbedingung zur Mindestmühlenbetriebszeit (MMBZ) von 4 auf 6 oder 8 Stunden ändert den flexiblen Energieanteil für den Betrieb der Mühlen im jeweiligen Referenzjahr nur geringfügig im einstelligen Prozentbereich. Die Voraussetzung längerer zusammenhängender Mühlenbetriebszeiten scheint somit keine deutliche Einschränkung für die Regelenergie im Jahresverlauf insgesamt zu ergeben.

In der ersten Tabellenhälfte in **Tabelle 1-12** sind die Ergebnisse nochmals vergleichend gegenübergestellt (links: Regelenergie mit Strompreislimit je Anforderungsprofil, rechts: Regelenergie bei verändertem monatlichem Strompreislimit). Aus der Änderung des Kriteriums für den flexiblen Mühlenbetrieb resultiert ein Anstieg der verfügbaren Regelenergie größer 30 % unabhängig vom betrachteten Referenzjahr.

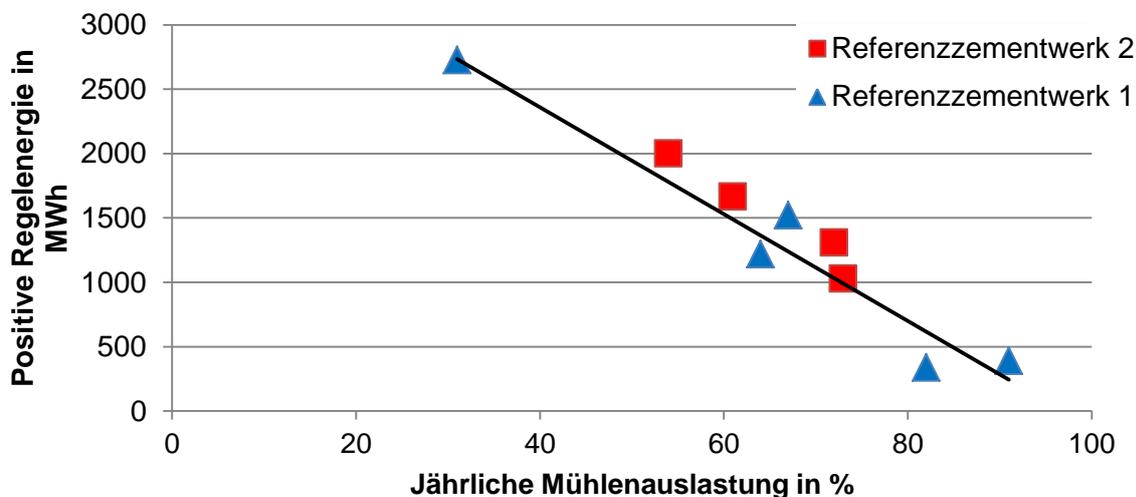
**Tabelle 1-12** Regelenergie der Zementmühlen aus zwei Referenzwerken nach Anforderungsprofil 2 bei einer Mindestmühlenbetriebszeit von 4 Stunden

Regelenergie in MWh	Referenzjahr 1		Referenzjahr 2	
	positiv (Lastminderung)	negativ (Lasterhöhung)	positiv (Lastminderung)	negativ (Lasterhöhung)
<b>Referenzwerk 1</b>				
Zementmühle 1	2300 <sup>1)</sup> / 3500 <sup>2)</sup>	1800 <sup>1)</sup> / 2900 <sup>2)</sup>	500 <sup>1)</sup> / 900 <sup>2)</sup>	500 <sup>1)</sup> / 900 <sup>2)</sup>
Zementmühle 2	4500 <sup>1)</sup> / 6100 <sup>2)</sup>	4600 <sup>1)</sup> / 7900 <sup>2)</sup>	1400 <sup>1)</sup> / 1700 <sup>2)</sup>	1300 <sup>1)</sup> / 1400 <sup>2)</sup>
Zementmühle 3	1300 <sup>1)</sup> / 3000 <sup>2)</sup>	1600 <sup>1)</sup> / 1500 <sup>2)</sup>	-	-
<b>Referenzwerk 2</b>				
Zementmühle 1	2600	2100	1700	6000
Zementmühle 2	3700	2900	6000	1500

<sup>1)</sup> Regelenergie mit Strompreislimit je Anforderungsprofil

<sup>2)</sup> Regelenergie bei verändertem monatlichem Strompreislimit

In **Abbildung 1-10** 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 1-10** eine normierte Antriebsleistung verwendet. Das Diagramm verdeutlicht, dass eine Steigerung der Mühlenauslastung unmittelbar zur Verringerung der bereitgestellten positiven Regelenergie führt. Die berechneten Daten weisen dabei einen linearen Verlauf auf.



**Abbildung 1-10** Korrelation zwischen Mühlenauslastung und verfügbarer Regelenenergie bei einer normierten Mühlenantriebsleistung für zwei unterschiedliche Referenzwerke und Referenzjahre nach Anforderungsprofil 2

#### 1.4.8 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 [ARS18, 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 [ARS18, S. 37]. In Abhängigkeit des betrachteten Szenarios treten solche Ereignisse mit einer relativ geringen Wahrscheinlichkeit auf, die zudem stark von der Netzeinspeisung aus Wind- und Sonnenenergie sowie dem Kriterium zur Definition einer Dunkelflaute abhängt [ARS18, S. 37 Abb. 1.11].

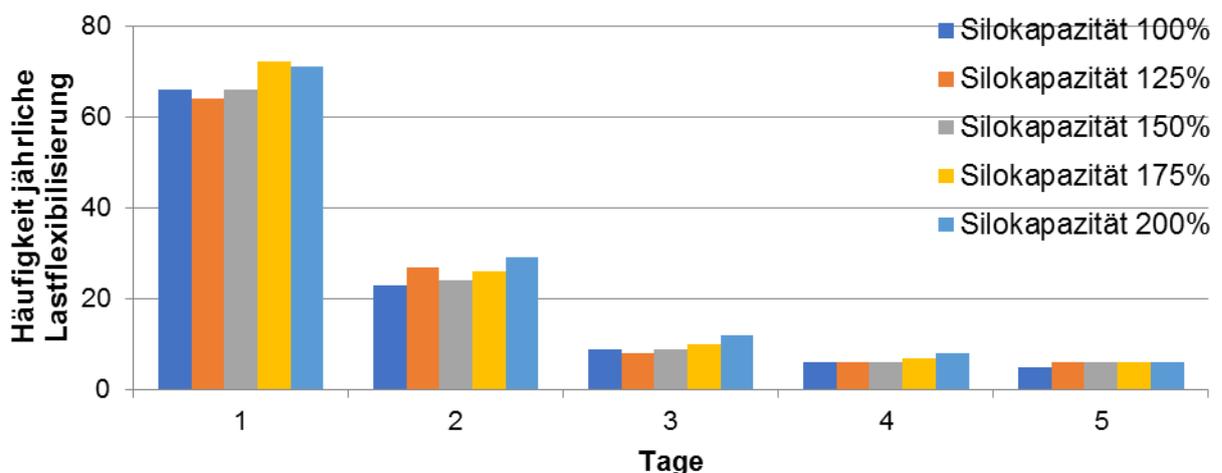
Eine langfristige Lastreduktion bzw. Lasterhöhung setzt zur fortwährenden Gewährleistung der Versandfähigkeit jedoch ausreichende Silofüllstände voraus. Zur Quantifizierung des Lastflexibilisierungspotentials bei Verwendung der Randbedingungen aus Anforderungsprofil 3 wurde das Modell genutzt und eine Parameterstudie durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Berechnungen sind nachfolgend dargestellt.

##### 1.4.8.1 Erhöhung der Silokapazität

**Abbildung 1-11** 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. Ein äquivalentes Diagramm für Referenzwerk 1 findet sich im Anhang (siehe **Anhang B Abbildung 6-4**).

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 Auftrittswahrscheinlichkeit 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 für ein Zementwerk 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.

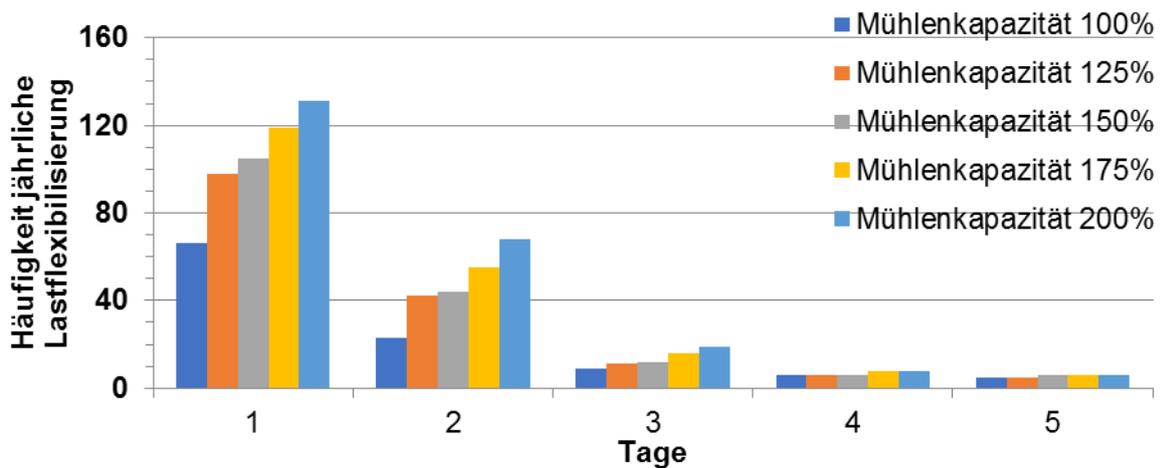


**Abbildung 1-11** Häufigkeiten einer potentiellen positiven Lastflexibilisierung über 1-5 Tage gemäß Anforderungsprofil 3, bei Erhöhung der Silokapazität jeweils für alle Zementmühlen in Referenzwerk 2

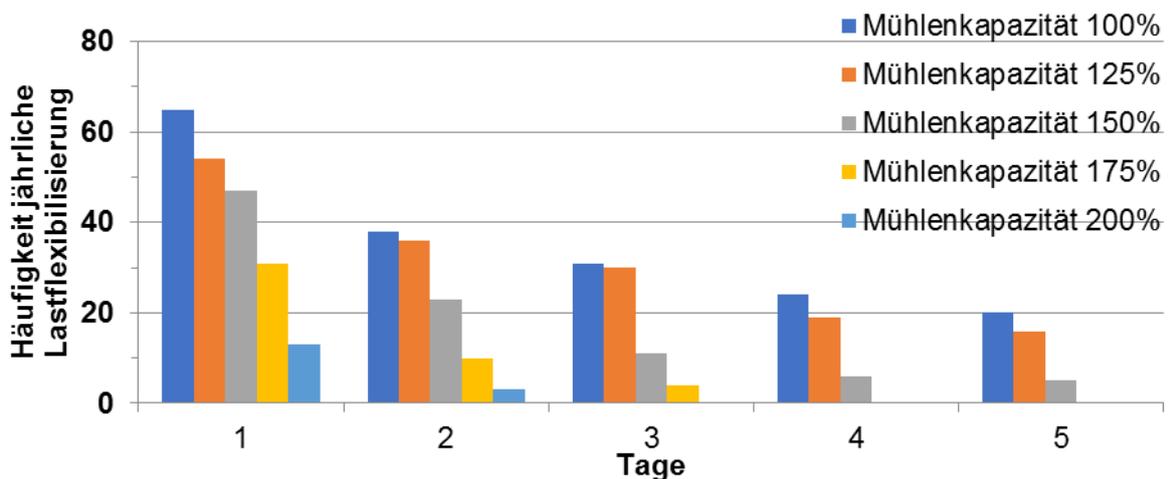
#### 1.4.8.2 Erhöhung der Mühlenkapazität

Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden. sowie Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden. 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 (Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.).



**Abbildung 1-12** Häufigkeiten einer positiven Lastflexibilisierung (Mühlenabschaltung) über 1-5 Tage gemäß Anforderungsprofil 3, bei Erhöhung der Mühlenkapazität für Referenzwerk 2



**Abbildung 1-13** Häufigkeiten einer negativen Lastflexibilisierung (Mühleneinschaltung) über 1-5 Tage gemäß Anforderungsprofil 3, bei Erhöhung der Mühlenkapazität für Referenzwerk 2.

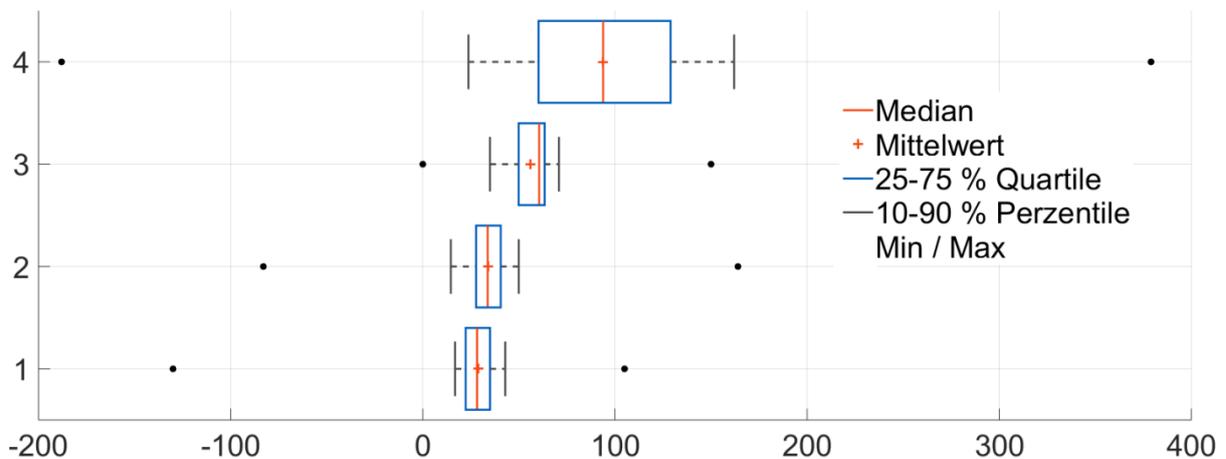
#### 1.4.9 Rahmenbedingungen des flexiblen Mühlenbetriebs und Kostenindizes

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 (**Glossar**) 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 Mühlenein- 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 (siehe auch **Kapitel 1.4.4**). 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.

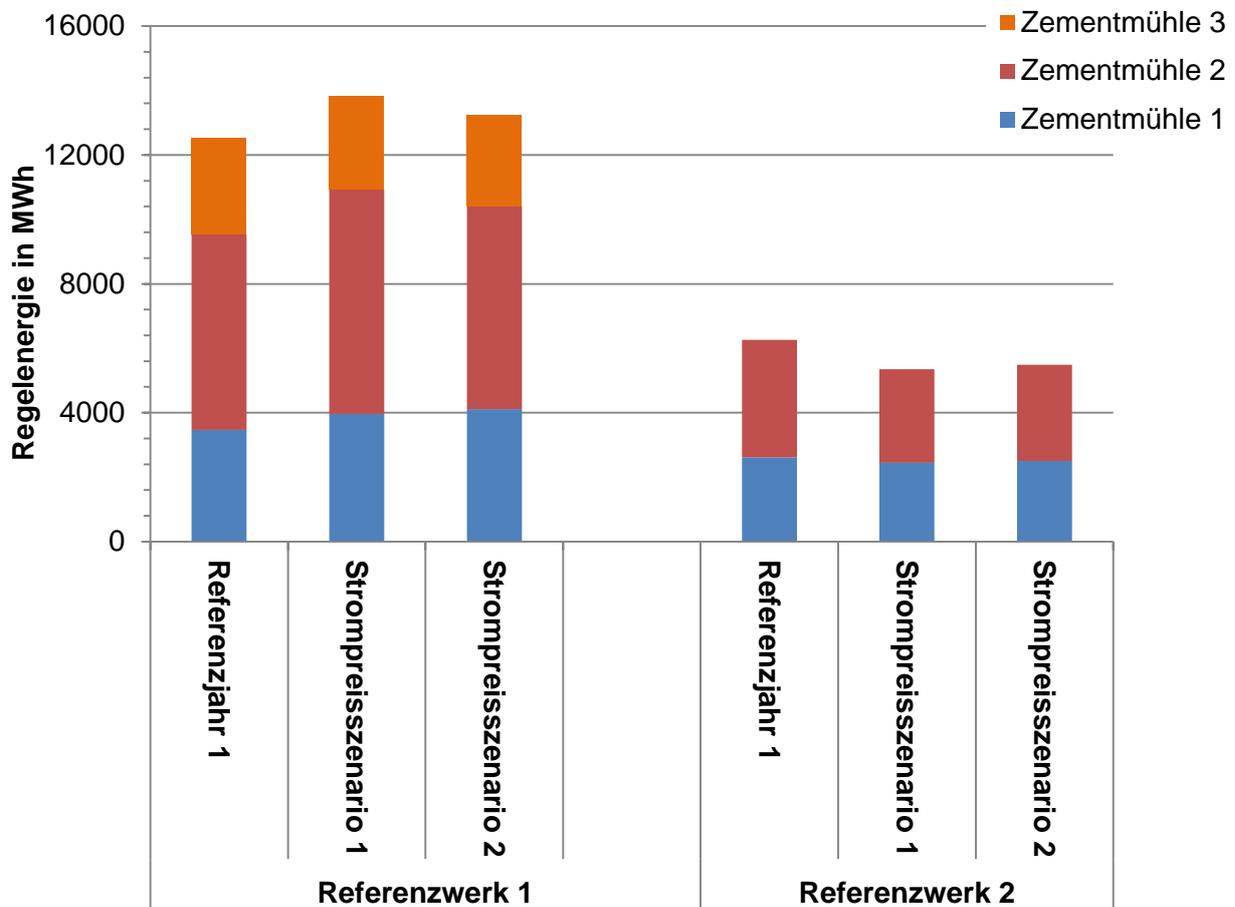
**Abbildung 1-14** zeigt die statistische Auswertung der genutzten Kostenindizes für die beiden Referenzjahre sowie für die beiden unterschiedlichen Strompreisszenarien im Jahr 2030. Insgesamt wird in den Kostenindizes der Strompreisszenarien 1 und 2 von einem bis 2030 deutlich steigenden variablen Anteil im Strompreis ausgegangen (**Abbildung 1-14**, Zeilen 3 und 4, mit annähernder Verdopplung 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 1-14**, 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 1-14**, 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.



**Abbildung 1-14** 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 [EP17] sowie für die Strompreisszenarien 1 und 2 für 2030 [Ök15, SKe17]

#### 1.4.9.1 Modellergebnisse für unterschiedliche Strompreisszenarien

**Abbildung 1-15** zeigt die Entwicklung der positiven Regelenergie (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 Regelenergie 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 Regelenergie im Jahr 2030 um maximal 10 % zunimmt, fällt diese im Fall des zweiten Referenzwerkes um maximal 15 %. Dabei ist der absolute Unterschied der verfügbaren Regelenergie zwischen Referenzwerk 1 und Referenzwerk 2 auf die unterschiedliche Mühlenantriebsleistung sowie auf unterschiedliche Mühlenauslastungen 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.



**Abbildung 1-15** In der Zementmahlung nach Anforderungsprofil 2 flexibel eingesetzte positive Regelenergie bei unterschiedlichen Kostenindizes und bei einer Mindestmühlenbetriebszeit von 4 Stunden

#### 1.4.10 Standortabhängige Hemmnisse

Die bisherigen wirtschaftlichen Analysen ergaben hinsichtlich der Kostenreduktion eher geringe Effekte bis -7 % auf dem Kostenindex durch die zusätzliche Flexibilität im Modellbetrieb [RRT19]. Insbesondere zeigte sich, dass im Fall starker Einschränkung der technischen Möglichkeiten zum flexiblen Betrieb bei hoher Auslastung der Mühlen (**Tabelle 1-13**) 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 1-13**, Referenzjahr 2). Die höhere Flexibilität erlaubt eine etwas weitere Reduktion im angenommenen Kostenindex von -11 % bei geringerer Auslastung der Produktionskapazitäten (**Tabelle 1-13**, 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 1-14**) 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 1-13** Änderung der jährlichen Kostenindizes durch flexiblen Betrieb der Zementmühlen nach Anforderungsprofil 2 im ersten Referenzwerk

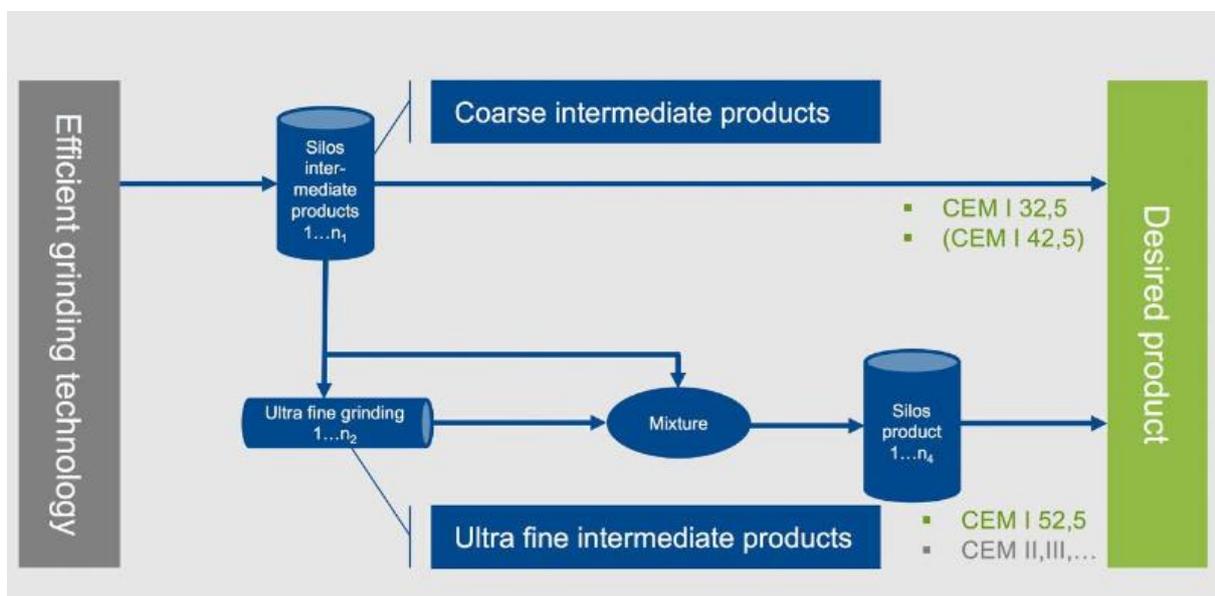
	Zeitliche Auslastung der Zementmühlen	Kostenindex im Referenzbetrieb (ohne zusätzliche Flexibilität) in €/a	Reduktion im Kostenindex, absolut in €/a	Reduktion im Kostenindex
Referenzjahr 1	63 %	1.330.000	-141.000	-11 %
Referenzjahr 2	84 %	1.756.000	-43.000	-2 %
<b>Im Vergleich zu Referenzjahr 1</b>				
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. € **[Ver17a]**. Nach Berücksichtigung der zusätzlichen Betriebskosten scheint eine Amortisation erst nach sehr vielen Jahren möglich. Für eine Investition in zusätzliche Mühlenkapazität müssten höhere Kosten (**Abschnitt 1.4.11.5**) 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, **Abschnitt 1.4.8**) fraglich. Eine geringfügige Steigerung der Mühlenproduktionsleistung bestehender Anlagen um 3 bis 5 % lässt sich unter Umständen durch verfahrenstechnische Maßnahmen wie Anpassung der Kugelmühlen-

gattung 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 wie bereits verdeutlicht 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 Flexibilitätspotentiale sind einschränkend zu berücksichtigen.

1.4.11 Flexibilisierungspotentiale der separaten Feinstmahlung bei der Zementmahlung  
 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 Kugelmöhlen 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 Feinstmöhlen (hier: Rührwerkskugelmöhlen) nachzerkleinert (siehe auch **Abbildung 1-16**).



**Abbildung 1-16** Konzept der separaten Feinstmahlung [TF19]

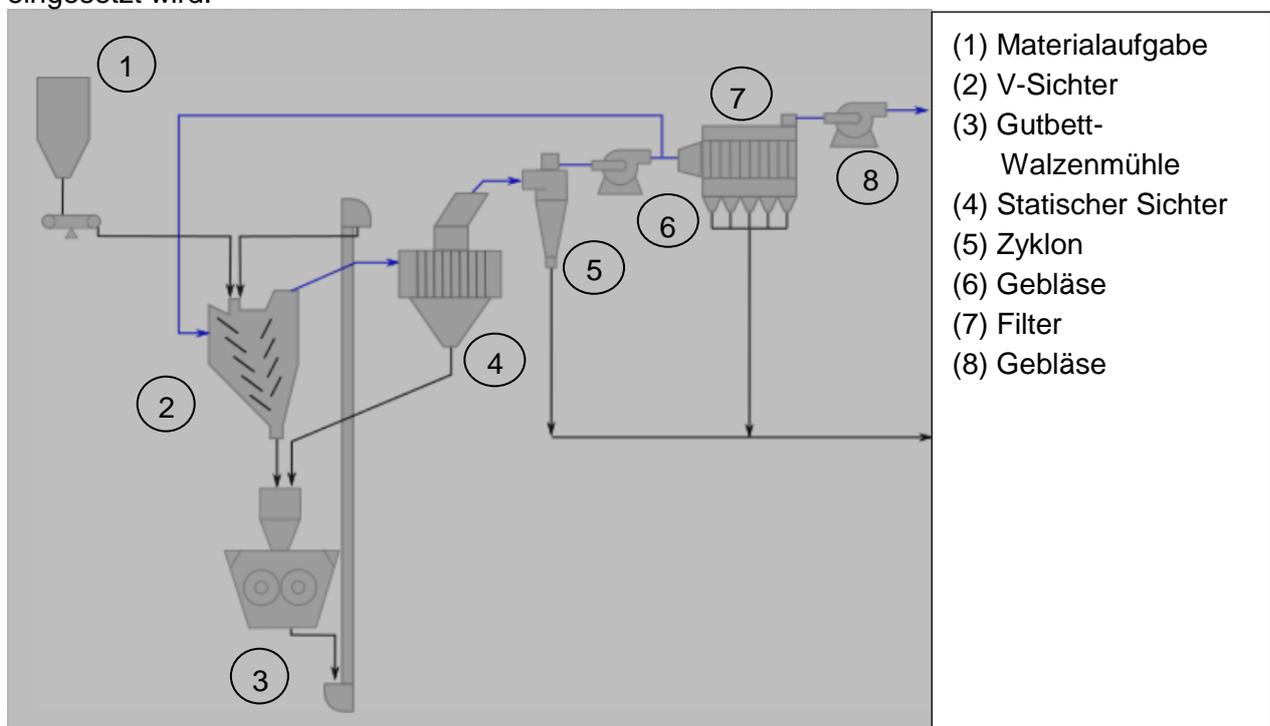
Durch die separate Feinstmahlung kann der spezifische Energiebedarf der Zementmahlung reduziert werden, ohne die Zementeigenschaften negativ zu beeinflussen [TF19]. Um eine Vergleichbarkeit hinsichtlich der Zementeigenschaften zu erreichen, ist es maßgebend, dass die entstehenden Zemente zumindest ähnliche Korngrößenverteilungen aufweisen. Um dieses zu erreichen, ist es nötig mit 10-30 % eines Klinkermehles bei einer typischen



Feinheit von 4000 cm<sup>2</sup>/g nach Blaine in die Mischung zu gehen. Nachfolgend wird der Einfluss der separaten Feinstmahlung auf die Flexibilisierung der Zementmahlung exemplarisch dargestellt.

#### 1.4.11.1 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 Vertikal-Wälzmühle 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 1-17** ist das vereinfachte Fließbild einer Fertigmahlanlage mit Gutbett-Walzenmühle dargestellt, wie es vielfach in der Zement- und Mineralindustrie heute eingesetzt wird.



**Abbildung 1-17** 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 Sichtechnik 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 cm<sup>2</sup>/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 (siehe auch **Anhang A Tabelle 6-2**):

- Produktionsleistung 35 t/h CEM I
- Produktfeinheit 4000 cm<sup>2</sup>/g nach Blaine
- P<sub>Mühle</sub> 620 kW ,installierte Motoren 2x 350 kW
- P<sub>Ventilator</sub> ca. 148 kW (Hauptventilator)
- P<sub>Ventilator</sub> ca. 15 kW (Entstaubung)
- P<sub>Nebenaggregate</sub> 120 kW

Aus den gegebenen technischen Details lässt sich ein spezifischer Energiebedarf der gesamten Anlage von ca. 25 kWh/t bei einer Feinheit von 4000 cm<sup>2</sup>/g abschätzen. Die ist ein recht niedriger Wert und unterstreicht damit die Effizienz der Gutbett-Walzenmühle.

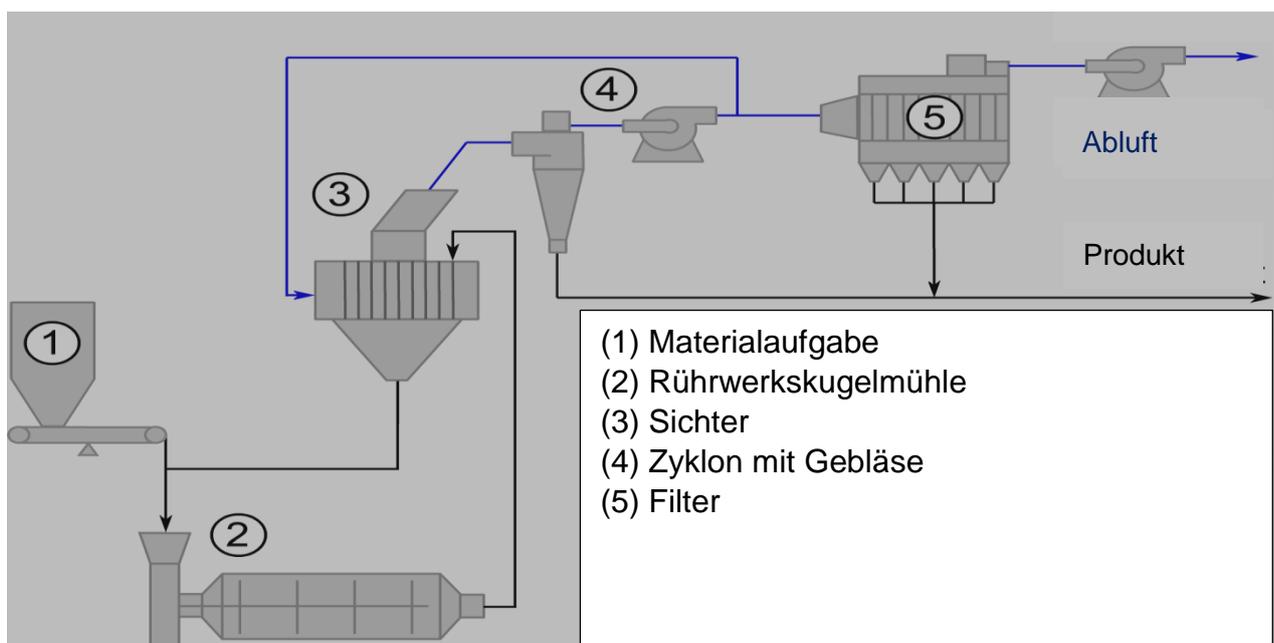
#### 1.4.11.2 Anteilige Feinstmahlung in der Rührwerkskugelmühle

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 1-18**). Trocken betriebene Rührwerkskugelmühlen arbeiten mit kleinen Mahlkörpern (etwa 6 mm), diese werden durch einen Rotor im Mühlenrohr beschleunigt. Dies führt zu einer Beanspruchung mit hoher Intensität, was die Herstellung feinsten Partikel ermöglicht.



**Abbildung 1-18** Horizontale Rührwerkskugelmühle der Fa. Netzsch [TF19]

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 1-19**) keine Unterschiede. Wie in **Abbildung 1-19** dargestellt, kann die Rührwerkskugelmühle im geschlossenen Kreislauf mit einem Sichter betrieben werden.

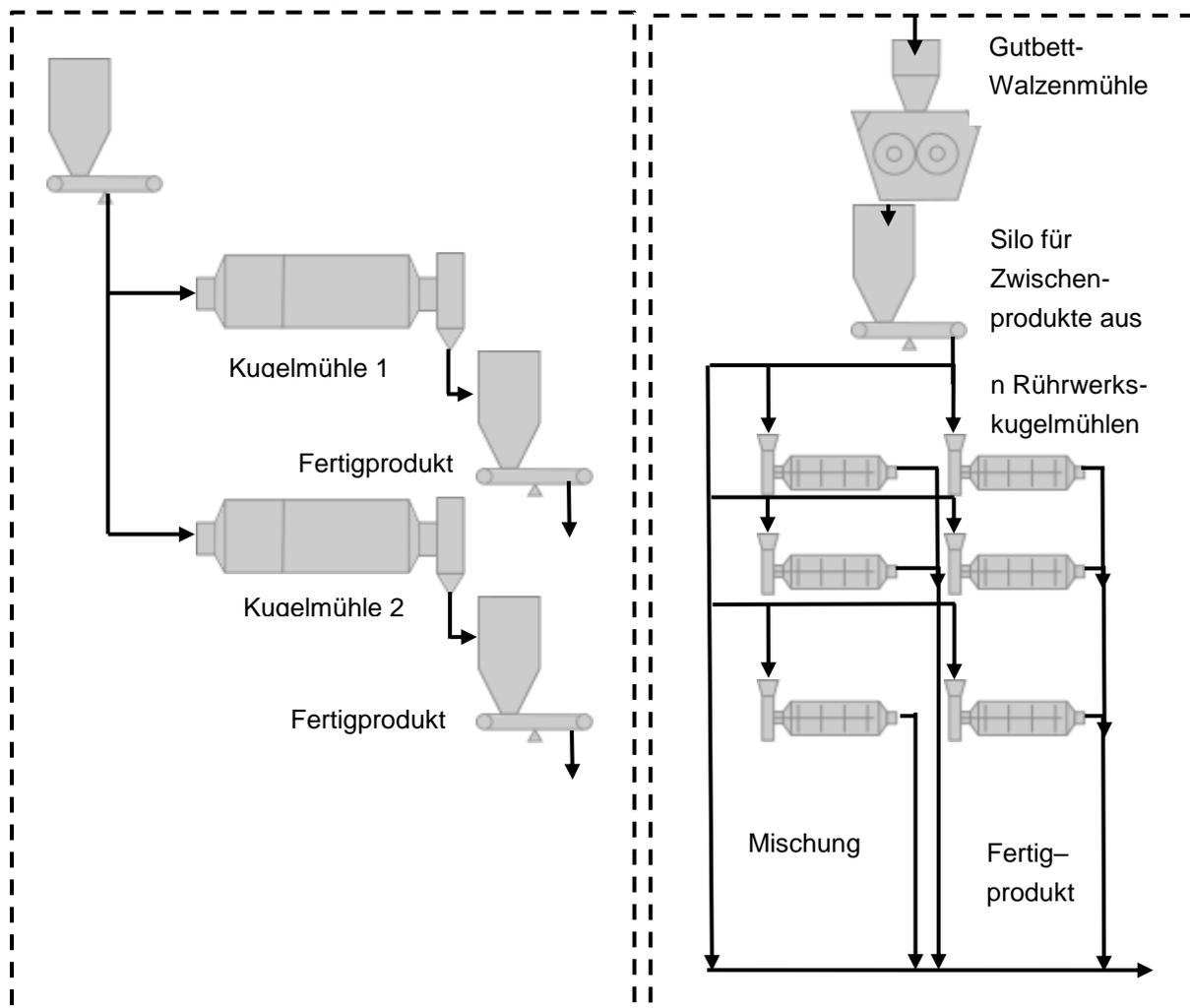


**Abbildung 1-19** Anlagenschaltung einer Rührwerkskugelmühle

### 1.4.11.3 Machbarkeitsstudie

Der Modellansatz (**Kapitel 1.4**) wurde zur Beurteilung des Lastflexibilisierungspotentials bei Einsatz der separaten Feinstmahlung genutzt. Hierzu wurde der mehrstufige Prozess der separaten Feinstmahlung in die Modellstruktur integriert.

Der Mühlenbetrieb wurde exemplarisch anhand des ersten Referenzjahrs und ersten Referenzwerks 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 Kombination aus Gutbett-Walzenmühle (GBWM) und Rührwerkskugelmühlen (RWKM) substituieren einen Teil der Kugelmühlenproduktion der Zementmühlen 1 und 2 sowie die Produktion in Zementmühle 3 im ersten Referenzwerk (**Tabelle 1-14** und **Tabelle 1-15**).



**Abbildung 1-20** Mühlentypen zur Zementproduktion in der untersuchten Anlagenkonfiguration. **Links:** Verbleibende Kugelmühlen. **Rechts:** Separate Feinstmahlung durch n-Rührwerkskugelmühlen mit vorgeschalteter Gutbett-Walzenmühle.

**Tabelle 1-14** Modellierte mittlere Produktionsleistungen der Mahlanlagen sowie produzierte Hauptsorten je Mühle in Referenzwerk 1

	Zementmühle 1	Zementmühle 2	GBWM + RWKM
Mittlere Produktionsleistungen für einzelne Zementsorten in t/h (Referenzwerk 1)	19 bis 54	73 bis 142	GBWM: 35 RWKM: 8
Zementsorten mit hoher Jahresproduktion	CEM II/ A-S 42,5 R CEM II/ B-S 42,5 N CEM II/A-M (S-LL) 42,5 N	CEM I 52,5 N CEM II/A-S 42,5 R CEM II/A-M (S-LL) 42,5 N	Cem I 52,5 N Cem II/A-S 42,5 R

In der vorgeschalteten Gutbett-Walzenmühle wird für die drei Zemente ein Zwischenprodukt 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 minimalen und maximalen Silofüllstände in den Zwischensilos dar. In **Tabelle 1-15** sind die wesentlichen Kennzahlen der Gutbett-Walzenmühle sowie der Rührwerkskugelmühlen zur separaten Feinstmahlung zusammengefasst. Wobei die Produktionsleistung der Rührwerkskugelmühle bei der bereits genannten Parametervariation angepasst wird.

**Tabelle 1-15** Kennzahlen der Gutbett-Walzenmühlen und Rührwerkskugelmühlenproduktion.

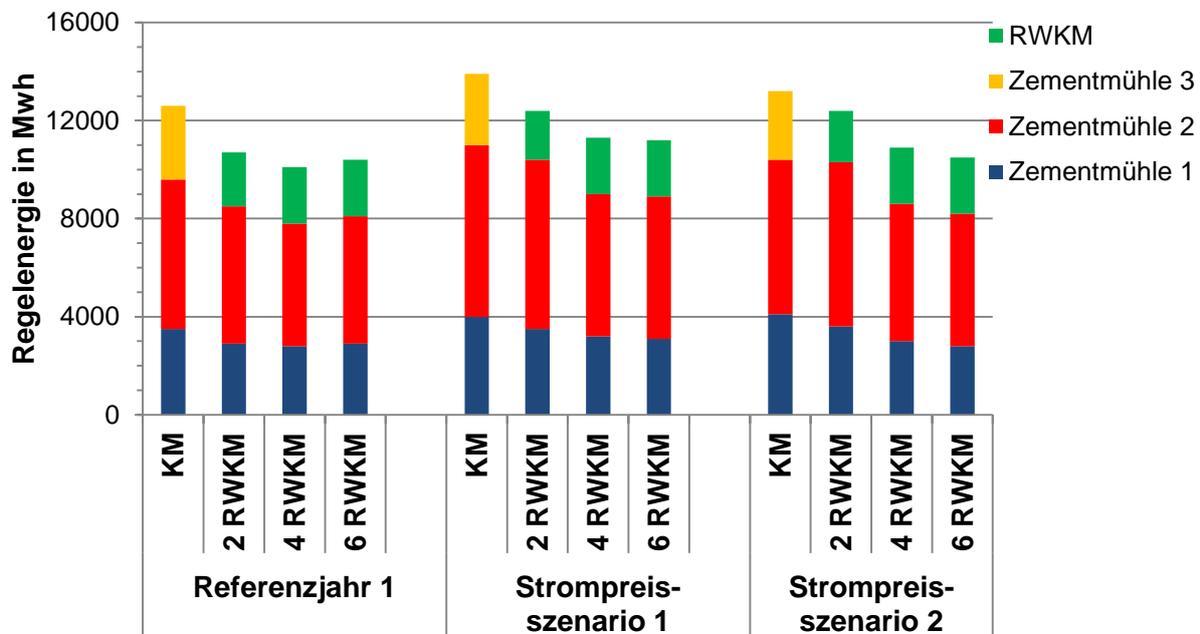
		Gutbett-Walzenmühle	Rührwerkskugelmühle
Produktionsleistung (CEM I)	t/h	35	8
Produktfeinheit	cm <sup>2</sup> /g	3500	5000*
Spezifischer Energiebedarf	kWh/t	25,8	73,0

\* 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

In **Abbildung 1-21** ist die resultierende Regelenergie bei Einsatz einer unterschiedlichen Anzahl von Rührwerkskugelmühlen zur flexiblen separaten Feinstmahlung dargestellt und mit dem Referenz-Zustand verglichen. Im Modell werden die Rührwerkskugelmühlen analog zum Kugelmühlenbetrieb entsprechend eines maximalen Strompreislimits betrieben.

**Abbildung 1-21** zeigt zudem 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. Im Anhang findet sich zudem eine entsprechende Abbildung zur Darstellung der negativen Regelenergie (**Anhang B Abbildung 6-5**).



**Abbildung 1-21** Vergleich der verfügbaren positiven Regelenergie der Zementmühlen bei Einsatz von Rührwerkskugelmühlen gegenüber einer Mahlung in Kugelmühlen für Anforderungsprofil 2 bei einer Mindestmühlenbetriebszeit von 4 Stunden

#### 1.4.11.4 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 Zementeigenschaften 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 Zementeigenschaften 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 an den Investitionskosten 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 die Betriebskosten 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.

Wichtig für eine industrielle Umsetzung der separaten Feinstmahlung zur Steigerung der Flexibilität, wie auch der Umsetzung anderer Maßnahmen, ist die Zukunftssicherheit derartiger Technologien und die weitgehende Sicherstellung ökonomischer Interessen.

#### *1.4.11.5 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. € (+/- 10 %) in Deutschland bei der Integration in eine Bestandsanlage abgeschätzt werden.

**Tabelle 1-16** Gegenüberstellung der Mahlanlagen

	Kapazität in t/h	Feinheit in cm <sup>2</sup> /g nach Blaine	Spezifischer Energie- bedarf in kWh/t	Instandhaltungs- kosten* in 1000 €/a	Investitions- kosten für Neu- anlage in Mio. €
Kugelmühle	42	5000	51	ca. 250	Bestandsanlage
Gutbett- Walzenmühle	35	4000	29,2	ca. 250	ca. 15
Rührwerks- kugelmühle	9	9000	72	ca. 25	ca. 1,8

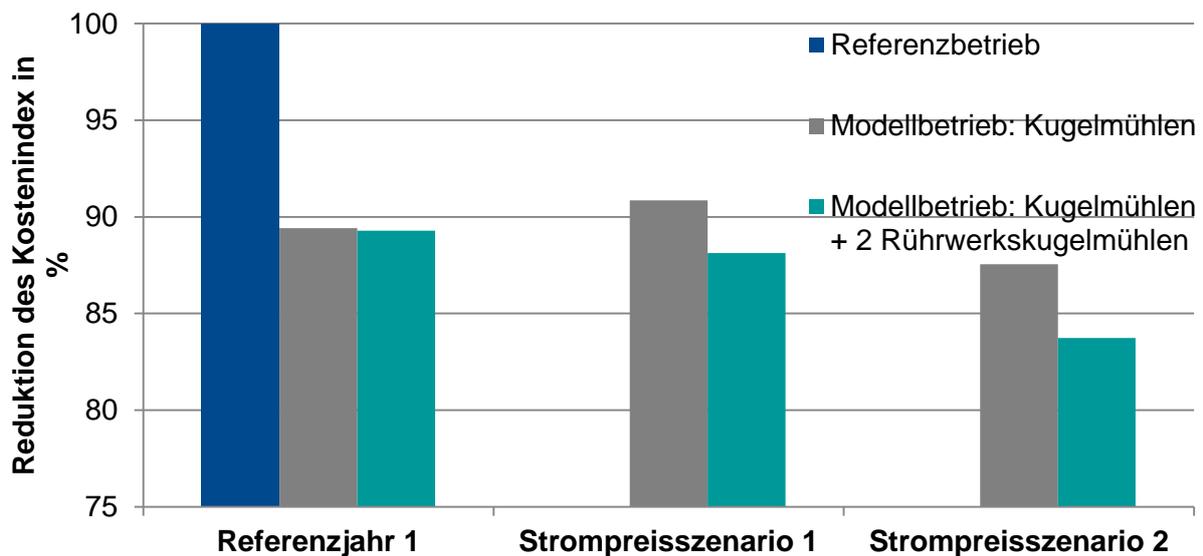
\*incl. Verschleißteile (geschätzt)

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 1-16** 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 vorgemahltes 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 entsprechender Zielfeinheit.

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 bzw. 15 % 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 elektrischer Energie. Bei einem angenommenen Strompreis von 7 Eurocent/kWh ergibt sich ein theoretisches Einsparungspotential von ca. 150 Tsd. €/Jahr. Neben den Energiekosten spielen auch die Instandhaltungskosten eine wichtige Rolle bei der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung. Diese belaufen sich bei der separaten Feinstmahlung auf ca. 275 Tsd. € gegenüber 250 Tsd. € bei der konventionellen Mahlung in der Kugelmühle. Daraus ergibt sich ein bereinigtes Einsparungspotential von ca. 125 Tsd. €/Jahr.

**Abbildung 1-22** zeigt nun die berechnete relative Kostenreduktion des Modellmühlenbetriebs im Vergleich zum Referenzmühlenbetrieb in Abhängigkeit des zugrunde liegenden Strompreisszenarios für maximal zwei Rührwerkskugelmühlen.



**Abbildung 1-22** Prozentuale Kostenreduktion des Modellmühlenbetriebs mit Kugelmühlen sowie mit Kugelmühlen und 2 Rührwerkskugelmühlen basierend auf den unterschiedlichen Kostenindizes

Es stellt sich heraus, dass die relative Kostenreduktion jeweils in einer vergleichbaren Größenordnung für unterschiedliche Strompreisszenarien 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 4 % (bei 2 Rührwerkskugelmühlen sowie mit Strompreisszenario 2) gegenüber dem Kugelmühlenbetrieb im Modell, da drei Zementprodukte energieeffizienter produziert werden können. Es zeigt sich jedoch auch, dass mit zunehmender Volatilität am Strommarkt derartige Konzepte Vorteile gegenüber klassischen Betriebsweisen haben.

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 125 Tsd. €/Jahr wirtschaftlich nicht zu rechtfertigen. Vielmehr muss hier der Vergleich mit einer Neuanlage bzw. der eingesparten Menge an CO<sub>2</sub> erfolgen. In dieser Bewertung ist die Komplettsubstitution einer Mahlanlage betrachtet worden. Sind bereits Anlagenteile vorhanden, die genutzt werden können, so ändern sich die Gesamtinvestitionskosten deutlich und damit auch die Amortisationsdauer. Denkbar ist hier die Umrüstung einer Mahlanlage, die bereits eine Gutbett-Walzenmühle zur Vormahlung nutzt, da der Löwenanteil der Investitionskosten auf die Gutbett-Walzenmühle entfällt.

Neben einer Verringerung der Strombezugskosten können durch die Flexibilisierung des Mühlenbetriebs mit Kugelmühlen und auch mit Rührwerkskugelmühlen indirekt gleichzeitig CO<sub>2</sub>-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 CO<sub>2</sub>-Intensität des genutzten Strommixes für Strompreisszenario 1 [Bö, Ök15] ermöglichen jedoch keine direkte Gegenüberstellung zu einem Referenzmühlenbetrieb für das Zukunftsjahr 2030. Die abschätzbare Reduktion weist hierbei jedoch in Bezug auf die gesamten CO<sub>2</sub>-Emissionen eines Zementwerks mit Klinkerproduktion vergleichsweise geringe Senkungspotentiale auf. Die CO<sub>2</sub>-Emissionen aus der Klinkerherstellung sind hierbei mit durchschnittlich circa 0,6 t CO<sub>2</sub> / t<sub>Zement</sub> bei einer Produktion von knapp 34.000.000 t für alle deutschen Zementwerke deutlich höher [Ver14b].

#### 1.4.12 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 damit in gewissem Umfang eine Flexibilisierung dieser Teilprozesse mit dem größten Einsatz elektrischer Energie erreicht werden.

Zerkleinerungsverfahren haben einen relativ niedrigen energetischen Wirkungsgrad, der nicht mit z.B. elektrischen Wirkungsgraden vergleichbar ist. Die kontinuierliche Überprüfung der Effizienz und ggf. möglicher Optimierungen gehören zu den täglichen Aufgaben der Mitarbeiter der Werke und sind das Ziel von speziellen Projekten, die zum Teil 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 in der Regel durch Rezirkulierung 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. Führt die Flexibilisierung der Mühlen jedoch zu zunehmenden thermischen Verlusten, kann die Zementqualität stärker beeinträchtigt werden. In diesem Fall wäre von einem höheren zusätzlichen 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 zunehmenden Investitionskosten führt. Im Modell wurde für einen exemplarischen Anwendungsfall die Anzahl an Sortenwechseln untersucht. Die Anzahl der Sortenwechsel und Produktionsunterbrechungen in Abhängigkeit von der vorgegebenen Mindestmühlenbetriebszeit steigt hierbei um bis zu 130 % zwischen dem Referenzbetrieb und dem flexiblen Mühlenbetrieb im Modell. Dieses Ergebnis wurde anhand von Anforderungsprofil 2 im Referenzjahr 1 für Zementmühle 1 abgeschätzt. Hierbei stellt die minimale Mühlenbetriebszeit von 4 Stunden wiederum ein unteres Limit dar (**Kapitel 1.4.3**), um eine hohe und gleichbleibende Produktqualität sicherzustellen. In den untersuchten Zement-

mühlen wird im Regelbetrieb häufig über längere Produktionszeiträume von 10-20 Stunden eine Sorte produziert.

Im Mühlenbetrieb bei der Erhebung der technischen Potentiale sind diese Zeiträume häufig kürzer. Diese Zeiträume werden durch den zeitlich veränderten Modell-Mühlenbetrieb zur Erhebung der technischen Potentiale häufig verkürzt.

Gleichzeitig steigt der Produktionsausschuss bzw. die Gesamttonnage der Mahlschwänze. Für den Fall des betrachteten Anforderungsprofils ergibt sich bei einer Sortenwechselzeit von circa 15 Minuten eine deutliche Zunahme des Produktionsausschusses von 7.300 auf 15.900 Tonnen, was einer Steigerung von 118 % und einem deutlichen Verlust an Effizienz in der Zementproduktion entspricht. Die Anzahl an Sortenwechsel sinkt, wenn längere Mindestmühlenbetriebszeiten als Randbedingung festgelegt werden, da dann häufiger ein Produkt über einen längeren Zeitraum ohne Unterbrechung produziert werden kann. Solange die absolute Menge der Mahlschwänze begrenzt bleibt, können diese häufig in kleinen Mengen noch in Zementprodukten eingesetzt werden. Dadurch kann ein Effizienzverlust beim Sortenwechsel in begrenztem Maß teilweise vermieden werden.

Die Rohmahlung dient zum einen der Zerkleinerung aber auch zur Trocknung der Rohmaterialien. Hier ist die Effizienz der Anlage besonders von der effizienten Nutzung der thermischen Energie der Gasvolumenströme 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 1.1.1** dargestellte hohe mittlere Verbundbetriebszeit. Eine Flexibilisierung der Rohmahlung kann zu einer Erhöhung des thermischen Energiebedarfs für die Rohmehltrocknung führen und damit zu Wechselwirkungen zwischen elektrischer und thermischer Energieeffizienz. Der thermische Energiebedarf im Klinkerbrennprozess und die Nutzung verbleibender thermischer Energie zur Rohmaterialtrocknung übersteigen den Einsatz des elektrischen Energiebedarfs deutlich. Höhere thermische Energieverluste zugunsten einer Erhöhung der Flexibilität bei der elektrischen Energienutzung erscheinen deshalb im Sinne der Gesamtenergieeffizienz insgesamt als kaum akzeptabel.

#### 1.4.13 Fazit / Zusammenfassung

Der verkettete Prozess der Zementherstellung ist durch verschiedene Zwischensilos und Lagerstätten in die Bereiche Rohmaterialherstellung, Rohmahlung, Klinkerbrennen und Zementmahlung unterteilbar. Durch Zwischenproduktsilos können die Anlagen in den Teilprozessen zu einem gewissen Grad flexibilisiert werden. Vergleichsweise einfach können die Mahlanlagen in und außer Betrieb genommen werden, wobei der Klinker-Brennprozess aus verschiedenen Gründen als nicht flexibilisierbar gilt. Die praktische Nutzung von Flexibilitätspotentialen in den Mahlprozessen bei der Zementherstellung erfordert eine Schaffung geeigneter Voraussetzungen und die Beseitigung von bestehenden Hemmnissen (**Kapitel 1.3.7**). Neben ökonomischen und organisatorischen Einflüssen des flexiblen Betriebs von Produktionsanlagen ist die Qualitätssicherung des Baustoffs Zement von übergeordnetem Interesse. Besonders die Mahlguttemperatur bei der Rohmehl- oder Zementvermahlung ist hier ein wesentlicher Parameter. Längere Stillstandzeiten verursachen zunehmend mehr Ausschussprodukt, welches erneut der Mahlanlage aufgegeben werden muss. Stillstandzeiten von Zementmahlanlagen mit Kugelmühlen von bis zu 2 Stunden können dabei als unkritisch angesehen werden. Individuelle Untersuchungen dieser Voraussetzung unter Berücksichtigung der besonderen Gegebenheiten am Standort sind jedoch zwingend erforderlich. 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 [**Sc14**] und in Untersuchungen eines Industrieanlagenbauers [**Br17**] gemacht. Neben der Kompensation von direktem Mehraufwand und betrieblicher Risiken ist als Voraussetzung auch die tatsächliche Verfügbarkeit von Personal sowie deren Weiterqualifikation und Ausbildung zu berücksichtigen. Technisch kann die Erweiterung der Silo- und Mühlenkapazität unter Umständen zur Steigerung der Flexibilität bei der Mahlung in einem Werk beitragen. Kritisch ist der Einfluss der Auslastung der Mahlanlagen, bedingt durch den Zementabsatz. In industriellen Herstellungsprozessen werden aus ökonomischen Gründen hohe Auslastungen angestrebt, dies steht jedoch im Widerspruch zu möglichen Flexibilisierungspotentialen. Besonders Mahlanlagen, die zur Mahlung des Rohmehls vor dem Klinker-Brennprozess genutzt werden, weisen im deutschen Mittel sehr hohe Auslastungen von über 80 % auf. Die Abschaltung dieser Anlagen ist insbesondere aus emissionstechnischen Gesichtspunkten nicht immer möglich. Die Rohmühlen sind für die Betriebssicherheit des Ofens mitverantwortlich. Dementsprechend werden die freien Zeiträume für Wartungsarbeiten genutzt und stehen damit nur sehr bedingt für den flexiblen Anlagenbetrieb zur Verfügung. Durch Modellrechnungen wurde anhand der Zementmühlen-Produktionsdaten aus zwei Referenzwerken bestätigt, dass besonders die kurz- und mittelfristige Flexibilisierung des Zementmühlenbetriebs eine starke Abhängigkeit von der Mühlenauslastung aufweist. Der ermittelte positive Regelenergieanteil (flexible Energie in Bezug auf den jährlichen

Energiebedarf) liegt im ersten Referenzwerk bei 22 % und bei etwa 5 % bei stark gesteigerter Mühlenauslastung im zweiten Referenzjahr (bei einem berechneten Jahresenergiebedarf von maximal 35.800 MWh für die größte Zementmühle im Modellbetrieb). Die drei Zementmühlen verfügen hierbei im ersten Referenzjahr über installierte Antriebsleistungen von 2,3, 5,0 und 1,1 MW. Im zweiten Referenzjahr sind nur noch die ersten beiden Zementmühlen in Betrieb. Im zweiten Referenzwerk liegt der positive Regelenergieanteil zwischen 16 % und 31 % (bei einem berechneten Jahresenergiebedarf von maximal 23.000 MWh für die größte Zementmühle im Modellbetrieb). Die beiden Zementmühlen verfügen hier über installierte Antriebsleistungen von 1,3 und 3,6 MW. Insgesamt weist das zweite Referenzwerk trotz anderer Werksstruktur hinsichtlich der Zementmühlen, -silos und -sorten gegenüber dem ersten Referenzwerk ein in der Größenordnung vergleichbares Lastflexibilisierungspotential auf.

Eine Hochrechnung der Ergebnisse nach Anforderungsprofil 1 für beide Referenzwerke ergibt für 100 % aller flexiblen und aktiven Mühlen ein Potential zur Flexibilisierung zwischen 0,10 bis 0,34 TWh für alle Zementwerke in Deutschland. Dieser Hochrechnung liegt die Voraussetzung zugrunde, dass lediglich die größte Mühle flexibel betrieben werden kann. Unter der Voraussetzung, dass lediglich 50 % der aktiven, größten Mühlen gleichzeitig zur Flexibilisierung eingesetzt werden können, ergibt sich ein reduziertes Potential zwischen 0,05 bis 0,17 TWh. Hinsichtlich der Flexibilität über lange Zeiträume deuten die Modellergebnisse auf ein Optimum zur Lastverschiebung über einen Zeitraum von maximal einem Tag hin, welches für längere Zeiträume zwischen 2 und 5 Tagen bei unveränderter Silo- und Mühlenkapazität eingeschränkt ist. Die Parameterstudie zur Anpassung der Silo- und Mühlenkapazität zeigt, dass die Vergrößerung der Mühlenkapazität einen großen Stellhebel zur Erhöhung der positiven Regelenergiebereitstellung durch Lastreduktion bei 1 bis 2 Tagen aufweist. Eine Erhöhung der Mühlenkapazität weist im Vergleich zur Erhöhung der Silokapazität insgesamt einen größeren Einfluss auf das Potential zur Lastflexibilisierung auf. Die hohen Investitionskosten zur Erhöhung der Silo- oder Mühlenkapazität stellen jedoch einen wirtschaftlich limitierenden Faktor dar. Diese hohen Investitionskosten zur Steigerung der Flexibilität sind aus heutiger Sicht wirtschaftlich nicht tragbar. Mit zunehmender Volatilität am Strommarkt kann in Abhängigkeit der Strompreisentwicklung in Zukunft die Wirtschaftlichkeit jedoch tendenziell verbessert werden.

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. Hochfeine Zementsorten werden voraussichtlich auch in Zukunft steigende Absatzzahlen verzeichnen. Die Mahlung dieser hochfeinen Produkte ist sehr energieintensiv. 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. Modellrechnungen haben gezeigt, dass die separate Feinstmahlung eine Reduktion des Lastflexibilisierungspotentials bzw. der verfügbaren Regelenergie zwischen 15 % und 19 % in Abhängigkeit des Strompreisszenarios in der vorliegenden Anlagenkonfiguration mit zwei Rührwerkskugelmühlen aufweisen kann. Der Anteil flexibel einsetzbarer Energie

verringert sich insgesamt aufgrund der Substitution einer Kugelmühle durch eine Gutbett-Walzenmühle und einzelner Rührwerkskugelmühlen, welche neben den verbleibenden Kugelmühlen zur Lastflexibilisierung eingesetzt werden. Dies ist insbesondere auf den niedrigeren spezifischen Energiebedarf (hier 15 % geringer) des Anlagenkonzepts der separaten Feinstmahlung im Vergleich zur Zementvermahlung auf Kugelmühlen zurückzuführen. 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. Mit Hilfe des Modells konnte bei flexibler Fahrweise und abhängig vom genutzten Kostenindex für den variablen Stromkostenanteil eine Reduktion zwischen 11-16 % bei Einsatz von zwei Rührwerkskugelmühlen bestimmt werden. Letztendlich lässt sich jedoch schlussfolgern, dass die separate Feinstmahlung erst ökonomisch vertretbar wird, wenn die sehr hohen Investitionskosten sinken oder sich andere Randbedingungen ändern. Unter Umständen könnte die Nutzung bereits vorhandener Mahlanlagen eine separate Feinstmahlung ermöglichen.

## 2 Zahlenmäßiger Nachweis: wichtigste Positionen

Die Kosten setzen sich aus Personal- und Reisekosten zusammen. Die Reisekosten sind für die Teilnahme an Projekttreffen des Synergie-Konsortiums entstanden. Die Personalkosten setzen sich aus den Kosten für Wissenschaftliche Mitarbeiter sowie für Techniker zusammen. In der nachfolgenden **Tabelle 1-17** sind die einzelnen Positionen des Gesamtfinanzierungsplan aufgeführt.

**Tabelle 1-17** Kostenübersicht nach Gesamtfinanzierungsplan

Kostenart	Abgerufene Kosten in €
Personalausgaben Wissenschaftler	192.088,00
Personalausgaben Techniker	23.055,59
Reisekosten	1.086,55

## 3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die im Forschungsprojekt durchgeführten Arbeiten entsprechend der in **Kapitel 3** definierten Arbeitspakete waren notwendig und angemessen, da sie den im Projektantrag definierten Zielen zur Evaluierung des Lastflexibilisierungspotentials der energieintensiven Schlüsselproduktionsprozesse in der Zementindustrie entsprechen. Es wurden alle in der Meilensteinplanung des VDZ definierten Aufgabenstellungen erfolgreich bearbeitet.

## 4 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere Verwertbarkeit des Ergebnisses

Die Ableitung von Flexibilitätspotentialen unter Nutzung von mittleren statistischen Daten der gesamten deutschen Zementindustrie sowie basierend auf spezifischen Anlagen- und Produktionsdaten aus zwei Referenzwerken ermöglicht branchenspezifische Einschätzungen

bezüglich zukünftiger Handlungsoptionen zur Lastflexibilisierung. Weiterhin wurde die Abhängigkeit relevanter Kennzahlen wie nutzbarer Regelenergie im Jahresverlauf zur Beschreibung des Flexibilitätspotentials von wesentlichen Anlagen- und Produktionsdaten ermittelt. Diese Zusammenhänge können zur Erweiterung von Technologieperspektiven für die effiziente und flexible Energienutzung in der Zementindustrie herangezogen werden. Ein flexibler Betrieb und eine Entkopplung von anderen Prozessen sind für die Mahlprozesse unter bestimmten Voraussetzungen möglich, da die Zwischen- und Endprodukte in Silos gelagert werden. Dies eröffnet Möglichkeiten, den Strombedarf in der Höhe zu variieren und zeitlich zu verschieben, um auf das fluktuierende Stromangebot flexibler reagieren zu können. Die Bewertung von Kosten und Nutzen erfolgt unter Berücksichtigung von Effizienz und Flexibilität der Mahlprozesse bei zunehmender Lastflexibilisierung. Es wurden die technischen und ökonomischen Hemmnisse, welche einer Steigerung der Flexibilität einzelner Produktionsprozesse in der Zementindustrie entgegenstehen, identifiziert und beschrieben. Dazu zählen insbesondere Qualitätsanforderungen der Produkte und betriebstechnische Voraussetzungen für einen effizienten Mühlenbetrieb. Sie müssen bei der Evaluierung der Umsetzbarkeit unterschiedlicher Konzepte wie beispielsweise der separaten Feinstmahlung in der Praxis mitberücksichtigt werden. Die entwickelten Ergebnisse zeigen somit eine Perspektive für die praktische Anwendung im Bereich der Zementmahlung auf. Eine weiterführende praktische Demonstration in Zukunft steigert das Potential für die Umsetzung von Demand-Side-Response in den Unternehmen der deutschen Zementindustrie.

## 5 Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens

Im Berichtszeitraum sind keine FE-Ergebnisse von Seiten Dritter bekannt geworden, die für die Durchführung des Vorhabens relevant sind.

## 6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichung des Ergebnisses

- Ausfelder, F., S.v. Roon und A. Seitz, 2018. Flexibilitätsoptionen in der Grundstoffindustrie : Methodik, Potentiale, Hemmnisse. Charakteristische Energiewirtschaftliche Situationen für die Bereitstellung von Flexibilität [online]. Verfügbar unter: <https://www.vdz-online.de/forschung/abgeschlossene-projekte/synergie/>
- Ruppert, J. und K. Treiber, Mai 2018. Statusbericht: Flexibilitätsoptionen in der Grundstoffindustrie. Ausblick für die Zementindustrie. S.52-56. 3. Auflage. Schüttgut.
- VDZ-Mitteilungen Nr.166: SynErgie: Strom flexibel in Mahlprozessen nutzen. Mai. 2018.
- Ruppert, J. und K. Treiber, Okt. 2018. Cement International: Flexible use of power in grinding processes. S.27. Heft Nr.4
- VDZ-Tätigkeitsbericht: Synchronisierte und energieadaptive Produktionstechnik zur flexiblen Ausrichtung von Industrieprozessen auf eine fluktuierende Energieversorgung (SynErgie), Okt. 2018. <https://www.vdz-online.de/publikationen/taetigkeitsberichte/>
- Ruppert, J., S. Rösch und K. Treiber, 2019. Energieflexibilität der deutschen Industrie. Einschätzung des Flexibilitätspotentials bei der Zementmahlung.
- VDZ-Mitteilungen Nr.170: Lastflexibilisierung der Zementmahlung: Technische Potentiale und Hemmnisse, Aug. 2019
- Ruppert, J., S. Rösch, S. Seeman und K. Treiber, 2019. Flexibilitätsoptionen in der Grundstoffindustrie : Analysen | Technologien | Beispiele (Band 2). Einschätzung des Flexibilitätspotentials bei der Zementmahlung. VDZ gGmbH. <https://www.vdz-online.de/forschung/abgeschlossene-projekte/synergie/>

## 7 Literatur

- [ARS18]** Ausfelder, F.; Roon, S. v.; Seitz, A.: Flexibilitätsoptionen in der Grundstoff-industrie Methodik, Potenziale, Hemmnisse. Charakteristische Energie wirtschaftliche Situationen für die Bereitstellung von Flexibilität, Frankfurt am Main, 2018.
- [Bo13]** Bohan, R. P. et al.: Design principles and operational considerations of VRMs, World Cement. 2013, (7), S.121-125
- [Bö]** Böing, F. et al.: ISAaR Integriertes Simulationsmodell zur Anlageneinsatz- und Ausbauplanung mit Regionalisierung. FfE Forschungsstelle für Energie-wirtschaft e.V.
- [Br17]** Brockmann, B.: Flexibilität ist Trumpf, S.24-27. ThyssenKrupp techforum, 2017.
- [Du77]** Duda, W. H.: Internationale Verfahrenstechniken der Zementindustrie Rechenverfahren, Formeln, Diagramme, Tabellen. cement data book 1, Wiesbaden, 1977.
- [DR18]** Dufter, C.; Roon, S. v.: Definition Anforderungsprofile, München, 2018.
- [EP17]** Marktdaten der EPEX-Spot SE. ftp-Server der EPEX-Spot SE, Leipzig.
- [Eu15]** European Cement Research Academy (ECRA): ECRA Future Grinding Tech nologies Project - Report about Phase 1. Evaluation of Roundtable event (Technical report TR 127/2015), Düsseldorf, 2015. Verfügbar unter: [https://ecra-online.org/fileadmin/redaktion/files/pdf/ECRA\\_TR\\_Future\\_Grinding\\_Technologies\\_Phase\\_I.pdf](https://ecra-online.org/fileadmin/redaktion/files/pdf/ECRA_TR_Future_Grinding_Technologies_Phase_I.pdf)
- [FST15]** Fleiger, P.; Schneider, M.; Treiber, K.: Future grinding technologies - ECRA's new research project. In: Chalmers University of Technology, Ed. 14th European Symposium on Comminution and Classification (Göteborg 07.- 10.09.2015). Göteborg, 2015
- [Ho13]** Hoenig, V. et al.: Energieeffizienz bei der Zementherstellung: Teil 1, Teil 2. Cement International. 2013, II (3/4), S.50-67/S.46-65
- [LL13]** Lidbetter, R. T.; Liebenberg Leon: Load-Shifting opportunities for typical cement plants, Journal of Energy in Southern Africa. 2013 S.35-45.
- [MFT17]** Müller-Pfeiffer, M.; Fleiger, P.; Treiber, K.: State of the art in cement grinding. First results from VDZ working-group "Comminution", Luxemburg, 2017.
- [Ök15]** Öko-Institut: Klimaschutzszenario 2050 - 2. Endbericht, Berlin, 2015.  
Verfügbar unter: <https://www.oeko.de/oekodoc/2451/2015-608-de.pdf>
- [Ru19]** Ruppert, J. et al. Hrsg.: Flexibilitätsoptionen in der Grundstoffindustrie Methodik, Potenziale, Hemmnisse (Band 2). Einschätzung des Flexibilitätspotentials bei der Zementmahlung, 2019.
- [RRT19]** Ruppert, J.; Rösch, S.; Treiber, K. Hrsg.: Energieflexibilität der deutschen In dustrie. Einschätzung des Flexibilitätspotentials bei der Zementmahlung, 2019.

- [RT18a]** Ruppert, J.; Treiber, K. Hrsg.: Flexibilitätsoptionen in der Grundstoffindustrie Methodik, Potenziale, Hemmnisse (Band 1). Flexibilitätspotentiale und -perspektiven in der Roh- und Zementmahlung, 2018.
- [RT18b]** Ruppert, J.; Treiber, K.: Statusbericht: Flexibilitätsoptionen in der Grundstoffindustrie. Ausblick für die Zementindustrie. Schüttgut. 2018,S.52-56
- [Ru18]** Ruppert, J. et al.: Prozesskettenorientierte Ermittlung der Material- und Energieeffizienzpotentiale in der Zementindustrie. Umweltforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit Forschungskennzahl [3716 36 320 0], 2019; S. 1–119.
- [SKe17]** Samweber, F.; Köppl, S.; et al: Projekt MONA 2030: Bewertung Netzoptimierender Maßnahmen gemäß technischer, ökonomischer, ökologischer, gesellschaftlicher und rechtlicher Kriterien. Teilbericht Einsatzreihenfolgen, München, 2017.
- [Sc14]** Schmidthaler, M. et al.: LoadShift: Lastverschiebung in Haushalt, Industrie, Gewerbe und kommunaler Infrastruktur Potenzialanalyse für Smart Grids. Lastverschiebung in der Industrie, Österreichische Begleitforschung zu Smart Grids, Wien, 2014.
- [TF19]** Treiber, K.; Fleiger, P.: Increase in energy efficiency and enhancement of cement properties by means of separate ultra-fine grinding. Cement International. 2019, 17(1), S.26-35
- [Ver14a]** Verein Deutscher Zementwerke e.V., Hrsg. Umweltdaten der deutschen Zementindustrie: 2014: Environmental data of the German cement industry 2014. Düsseldorf 2015  
Verfügbar unter: <https://www.vdz-online.de/publikationen/umweltdaten/>
- [Ver14b]** Verein Deutscher Zementwerke e.V, Hrsg. Zahlen und Daten: 2014; Stand: August 2014; Zementindustrie in Deutschland 2014, Düsseldorf, 2014.  
Verfügbar unter: <https://www.vdz-online.de/publikationen/zahlen-und-daten/>
- [Ver17a]** Verein Deutscher Zementwerke e.V.: Expertengespräche zu Flexibilitätspotentialen und -perspektiven in der Zementindustrie. Projektdokumente SynErgie, 2017.
- [Ver17b]** Verein Deutscher Zementwerke e.V.: VDZ Modell: Flexible Zementmahlung. Projektdokumente SynErgie, 2017.
- [Ver18]** Verein Deutscher Zementwerke e.V.: Zementversand Inland (Monatsdaten), Düsseldorf, 2018.  
Verfügbar unter: <https://www.vdz-online.de/publikationen/zahlen-und-daten/>
- [Ver19]** Verein Deutscher Zementwerke e.V, Hrsg. Zahlen und Daten: 2018; Stand: August 2018; Zementindustrie in Deutschland 2018, Düsseldorf, 2018.  
Verfügbar unter: <https://www.vdz-online.de/publikationen/zahlen-und-daten/>



- [VJ16]** Virag, A.; Jezdinsky, T.: Innovative business models for market uptake of renewable electricity unlocking the potential for flexibility in the industrial electricity use. Simplified assessment methodology for optimal valorization of Flexible Industrial Electricity Demand, 2016.
- [WB17]** WBCSD GNR: Cement plant power consumption - Weighted average Grey and white cement, 2017



## 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 in Megawattstunden im Jahresverlauf zusammen.

**A Anhang**

**A Tabellen**

**Tabelle 6-1** Übersicht der Eingangsdaten der Produktionszeitreihen

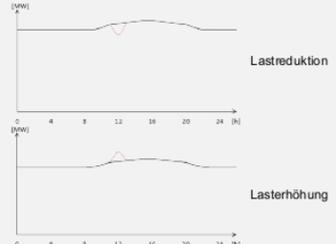
	<b>Mühlenbetriebszeiten in Stunden</b>	<b>Produktions leistungen je Mühle in Tonnen/Stu nde</b>	<b>Versand in Tonnen</b>	<b>Silo-Füllstände in Tonnen</b>
<b>Referenz- werk 1</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tagesdatensätze je Zementmühle und Sorte</li> <li>• LIMS-Daten (Labor-Informationssystem) für stündliche Betriebszeiten je Zementmühle und Sorte</li> </ul>	berechnet aus Jahresproduktion und Jahresbetriebszeiten	Versanddaten je Sorte und Tag	berechnet aus Produktion und Versand (Ref.-jahr 1) je Sorte und Tag für jedes Silo (Ref.-jahr 2)
<b>Referenz- werk 2</b>	Betriebsdaten aus Leitsystem (Betriebszeiten je Tag)	berechnet aus Jahresproduktion und Jahresbetriebszeiten	Versanddaten je Sorte und Tag	Silofüllstände (Höhe) mit Silobezeichnung und Sorte

**Tabelle 6-2** Spezifikationen der Gutbett-Walzenmühle zur separaten Feinstmahlung

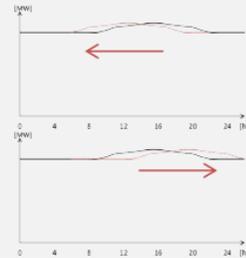
<b>Gutbett-Walzenmühle</b>	
Produktionsleistung	ca. 35 t/h CEM I
Produktfeinheit	3500 cm <sup>2</sup> /g nach Blaine
Frischgutbunker Anforderung	mind. 300 t Kapazität (für Klinker) und 5 t
Dosierbandwaagen	5-50 t/h bzw. 1-5 t/h
Rollenabmessungen	ca. 1400 mm / 900 mm
Antriebsleistung Mühle	620 kW (installierte Motoren 2x 350 kW)
Volumenstrom Hauptventilator	ca. 85.000 m <sup>3</sup> /h bei 1013 mbar und 90°C
Antriebsleistung Hauptventilator $P_{\text{Ventilator}}$	ca. 148 kW
Volumenstrom Entstaubungsventilator:	ca. 10.000 m <sup>3</sup> /h bei 1013 mbar und 90°C
Antriebsleistung Entstaubungsventilator $P_{\text{Ventilator}}$	ca. 15 kW
<b>Transportorgane</b>	
$P_{\text{Nebenaggregate}}$	ca. 120 kW
Kapazität Transportorgane im Kreislauf (Becherwerk und Bänder) ca. 400 t/h	ca. 400 t/h
Kapazität Transportorgane in und aus dem Kreislauf (Bänder/Fließrinne)	ca. 45 t/h

**B Bilder**

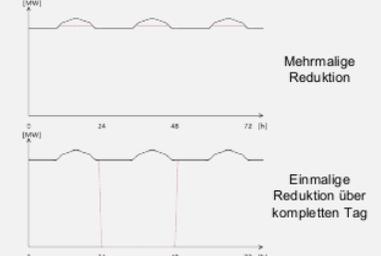
**Bild B-1** Anforderungsprofil 1: Kurzfristige Anpassung der Last [DR18]  
 Anforderungsprofil 1: Kurzfristige Anpassung der Last

Rahmenbedingungen	<p><b>Energiewirtschaftlicher Hintergrund</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Ausgleich kurzfristiger Schwankungen von Erzeugung und Nachfrage durch den Kauf von Systemdienstleistungen durch den Netzbetreiber</li> <li>- Auszahlung eines festen Betrages für die Leistungsbereitstellung entsprechend Auktion (Leistungspreis) und zusätzliche Zahlung bei Abruf der Leistung (Arbeitspreis)</li> </ul>	<p><b>Bedeutung heute</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Es existieren vier Produkte: Primär-, Sekundär- und Tertiärregelleistung sowie die „Verordnung zu abschaltbaren Lasten“ (AbLaV)</li> </ul> <p><b>Bedeutung in Zukunft</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Zunehmende Unsicherheit über die Stromerzeugung wird voraussichtlich die Bedeutung von Systemdienstleistungen erhöhen</li> </ul>	
	Technische Daten	<p><b>Vorankündigungszeit</b></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; width: fit-content; margin: 10px auto;">15 Minuten</div>	
Business Case	<p><b>Möglicher Business Case zum Anforderungsprofil 1</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Anbieten von zu- oder abschaltbarer Leistung am Regelleistungsmarkt</li> <li>- 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.</li> <li>- 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.</li> </ul>		<p><b>Beispiel</b></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>

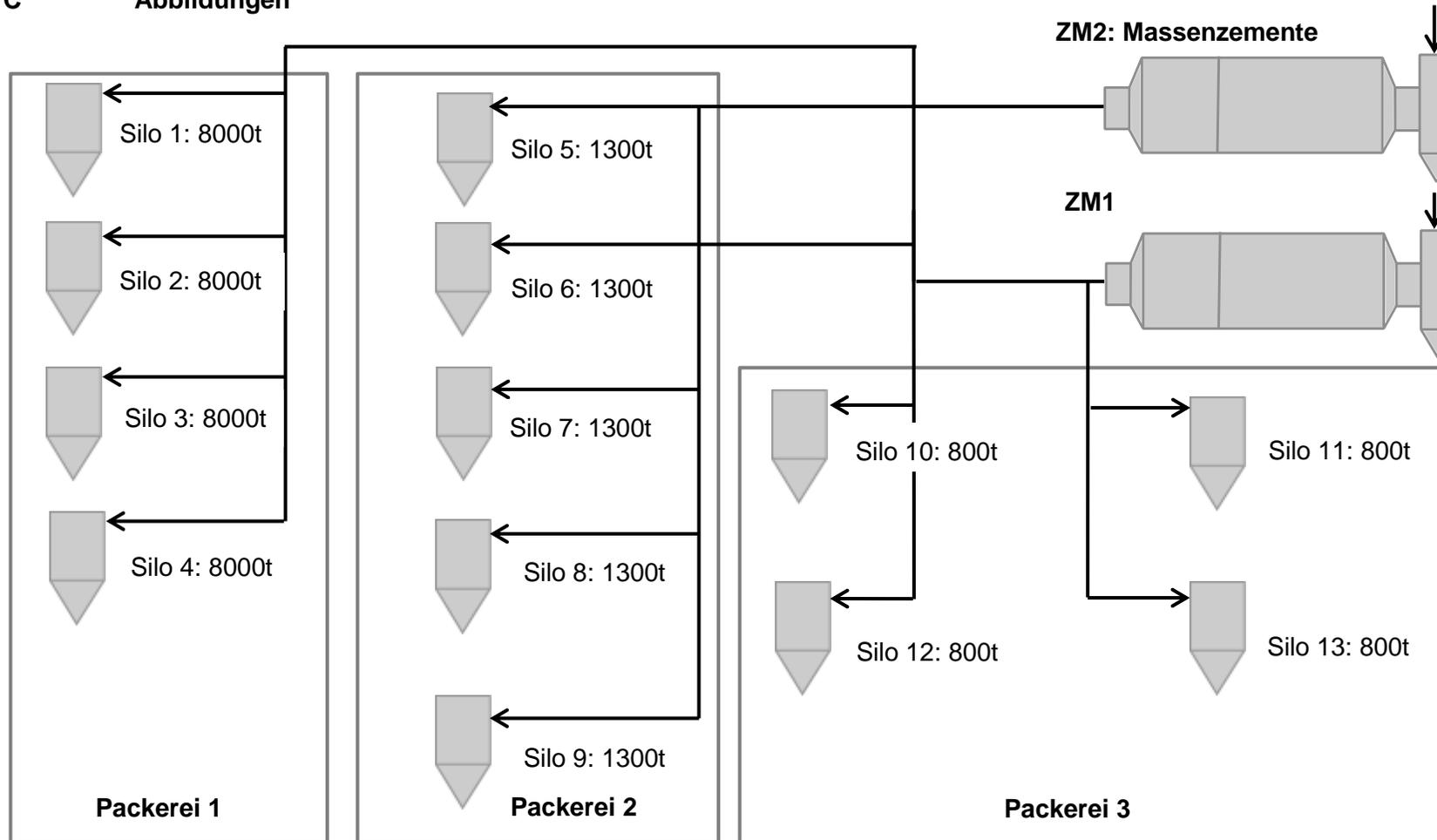
**Bild B-2 Anforderungsprofil 2: Anpassung der Last über mehrere Stunden [DR18]**  
**Anforderungsprofil 2: Anpassung der Last über mehrere Stunden**

<b>Rahmenbedingungen</b>	<p><b>Energiewirtschaftlicher Hintergrund</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Der Strompreis schwankt abhängig von Stromerzeugung und -verbrauch. Daher variiert der Strompreis in Abhängigkeit der Tageszeit.</li> <li>- 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.</li> </ul>	<p><b>Bedeutung heute</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Aufgrund des höheren Verbrauchs stehen hohe Preise im Tagesverlauf geringeren Preisen zur Nacht gegenüber.</li> </ul> <p><b>Bedeutung in Zukunft</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 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.</li> </ul>	
<b>Technische Daten</b>	<p><b>Vorankündigungszeit</b></p> <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: 10px auto;">1 Tag</div>		<p><b>Abrufdauer</b></p> <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: 10px auto;">3-12 Stunden</div>
<b>Business Case</b>	<p><b>Möglicher Business Case zum Anforderungsprofil 2</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Negative Strompreise und große untertägige Preis-Spreads bieten die Möglichkeit die Kosten für den Strombezug zu reduzieren.</li> </ul>		<p><b>Beispiel</b></p> <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>

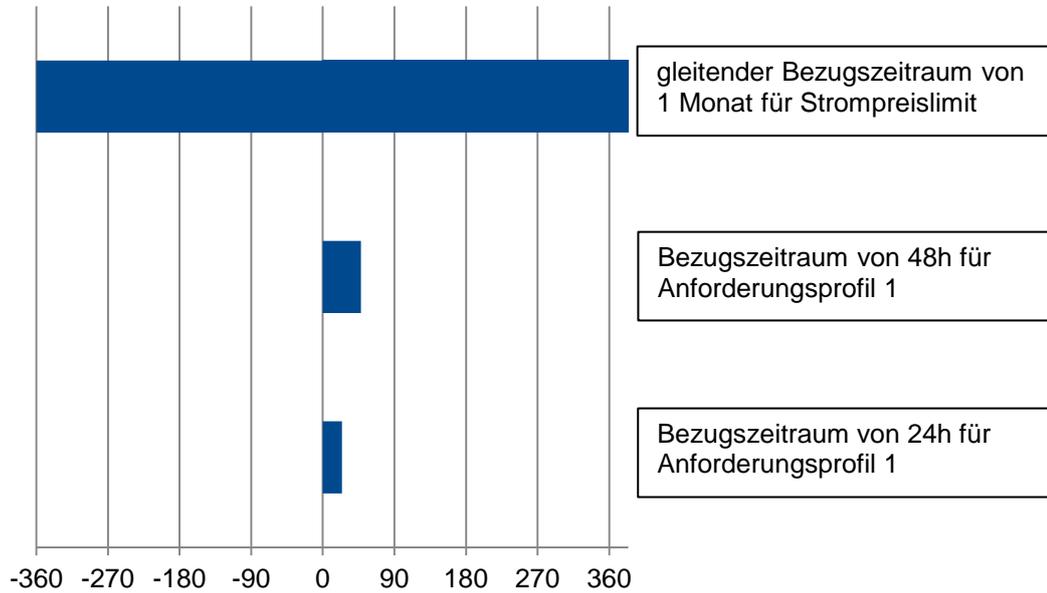
**Bild B-3** Anforderungsprofil 3: Reduktion der Last über mehrere Tage [DR18]  
**Anforderungsprofil 3: Reduktion der Last über mehrere Tage**

<b>Rahmenbedingungen</b>	<p><b>Energiewirtschaftlicher Hintergrund</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Im Winter können durch die schwächere Sonneneinstrahlung und mehrere aufeinanderfolgende windstille und bewölkte Tage sehr ungünstige Situationen für Erneuerbare Energie auftreten (Dunkelflaute).</li> <li>- Zur Anpassung an länger andauemde, ungünstige Wetterbedingungen eignet sich eine Lastreduktion über mehrere Tage.</li> </ul>	<p><b>Bedeutung heute</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Aufgrund des noch hohen Anteils von konventionellen Kraftwerken im Stromsektor ist eine längerfristige Reduktion über mehrere Tage noch nicht relevant.</li> </ul> <p><b>Bedeutung in Zukunft</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Die Bedeutung von Flexibilisierungen über längere Zeiträume wird aufgrund des ansteigenden Anteils der Erneuerbaren Energien in Zukunft zunehmen.</li> </ul>	
<b>Technische Daten</b>	<p><b>Vorankündigungszeit</b></p> <p>Auf Basis von Wetterprognosen ist die Dunkelflaute bereits 2 bis 5 Tage im Voraus prognostizierbar</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 10px; text-align: center; margin-top: 20px;"> <p><b>2-5 Tage</b></p> </div>		<p><b>Abrufdauer</b></p> <p>Jede Art von Lastreduktion ohne Nachholbedarf innerhalb dieser 5 Tage liefert einen positiven Beitrag zur Versorgungssicherheit</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 10px; text-align: center; margin-top: 20px;"> <p><b>1-5 Tage</b></p> </div>
<b>Business Case</b>	<p><b>Möglicher Business Case zum Anforderungsprofil 3</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Im Falle einer Dunkelflaute werden Strompreise in der Größenordnung von &gt; 10.000 €/MWh erwartet.</li> <li>- Eine Lastreduktion in diesem Zeitraum kann durch den Wiederverkauf des bereits kontrahierten Strombezugs zu erheblichen Erlösen führen.</li> </ul>		<p><b>Beispiel</b></p> <p>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 Weiterverkauf des kontrahierten Strombezugs in diesem Zeitraum deutliche Erlöse generieren.</p>

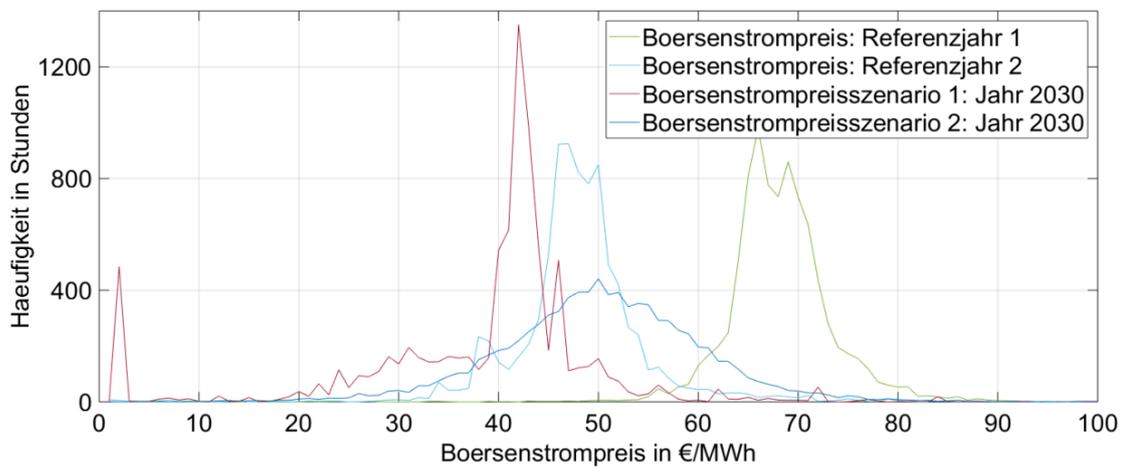
**C** **Abbildungen**



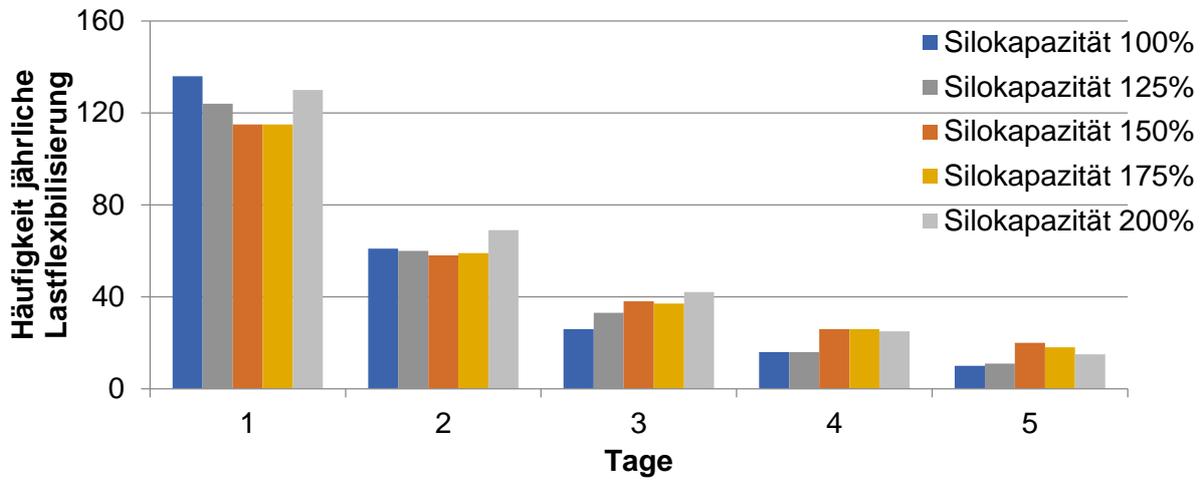
**Abbildung 6-1** Verschaltungsplan der Zementmühlen in Referenzwerk 1



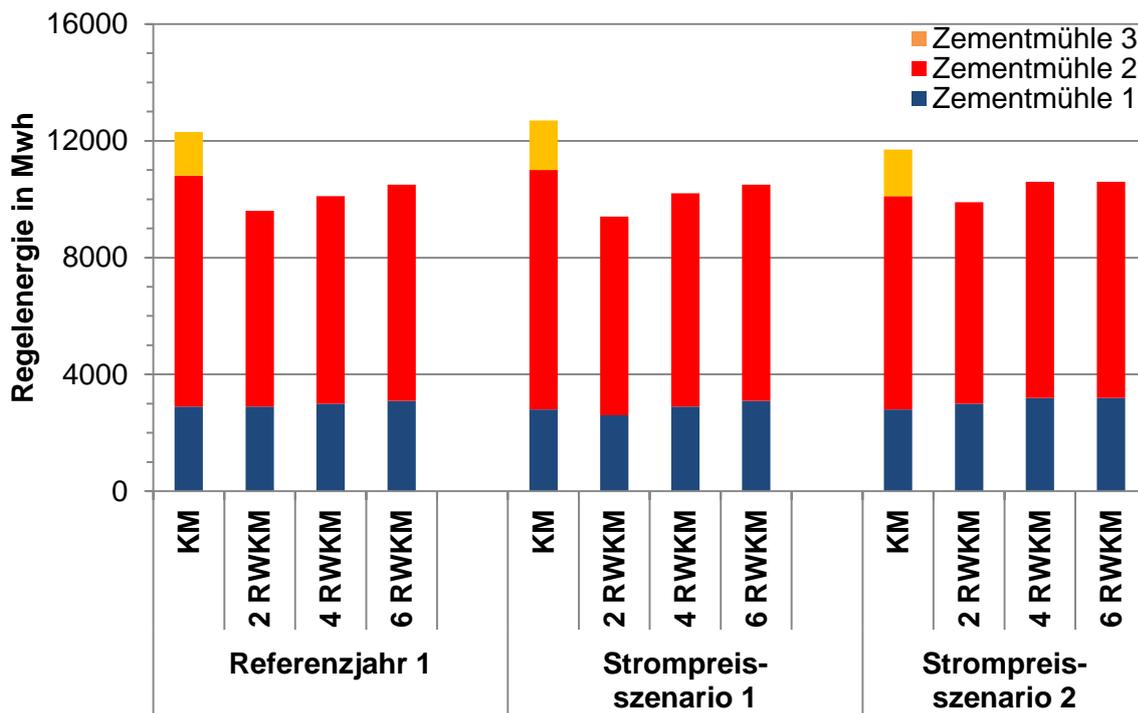
**Abbildung 6-2** Bezugszeiträume zur Berechnung des Strompreislimits im Modell ausgehend vom aktuellen Modell-Zeitschritt in Stunden



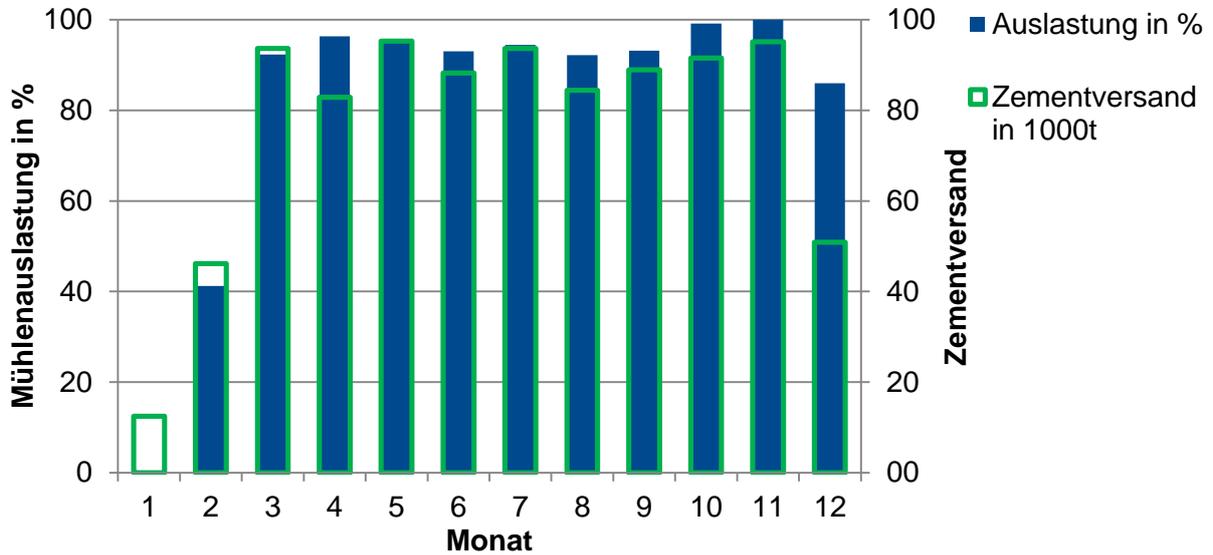
**Abbildung 6-3** Häufigkeitsverteilung der Kostenindizes für die unterschiedlichen Strompreisszenarien



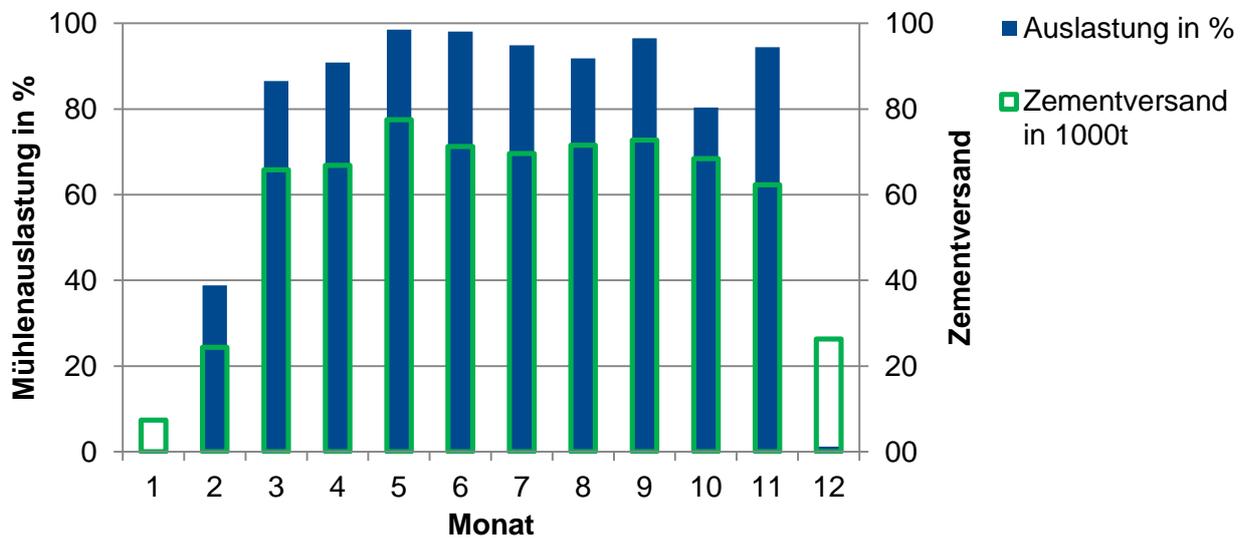
**Abbildung 6-4** Berechnete Häufigkeiten einer potentiellen positiven Lastflexibilisierung über 1-5 Tage gemäß Anforderungsprofil 3, bei Erhöhung der Silokapazität jeweils für alle Zementmühlen in Referenzwerk 1



**Abbildung 6-5** Vergleich der verfügbaren negativen Regelenergie der Zementmühlen bei Einsatz von Rührwerkskugelmühlen gegenüber einer Mahlung in Kugelmühlen für Anforderungsprofil 2 bei einer Mindestmühlenbetriebszeit von 4 Stunden \*dargestellt ist lediglich die negativ ermittelte Regelenergie der Kugelmühlen, da für die RWKM kein Referenzbetrieb vorhanden ist



**Abbildung 6-6** Monatliche Mühlenauslastung und Zementversand für die größte Zementmühle in Referenzwerk 1 und Referenzjahr 2



**Abbildung 6-7** Monatliche Mühlenauslastung und Zementversand für die größte Zementmühle in Referenzwerk 2 und Referenzjahr 2

## Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN -	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht
3. Titel SynErgie - Synchronisierte und energieadaptive Produktionstechnik zur flexiblen Ausrichtung von Industrieprozessen auf eine fluktuierende Energieversorgung Lastflexibilisierung in der Zementindustrie	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Ruppert, Johannes Rösch, Sebastian Treiber, Kevin	5. Abschlussdatum des Vorhabens Oktober 2019
	6. Veröffentlichungsdatum Februar 2020
	7. Form der Publikation Bericht
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) VDZ gGmbH, Forschungsinstitut der Zementindustrie	9. Ber. Nr. Durchführende Institution
	10. Förderkennzeichen 03SFK3K0
	11. Seitenzahl 78
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. Literaturangaben 29
	14. Tabellen 19
	15. Abbildungen 29
16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) Lastflexibilisierung in der Zementindustrie Düsseldorf, Februar 2020	

18. Kurzfassung

Die Zementindustrie zählt zu den energieintensiven Industriebranchen der Grundstoffindustrie. Im Rahmen des Projekts wurden charakteristische Schlüsselproduktionsprozesse identifiziert, welche sich für eine Flexibilisierung des elektrischen Energieeinsatzes eignen. Die Prozesse der Roh- und Zementmahlung kommen aufgrund vorhandener Silokapazitäten in Frage. Es wurden technische und ökonomische Voraussetzungen untersucht, welche für die Flexibilisierung dieser energieintensiven Produktionsabschnitte von Bedeutung sind.

Die Ergebnisse umfassen abschätzbare Potentiale zur Flexibilisierung der Roh- und Zementmahlung unter Nutzung von statistischen Anlagen- und Produktionskapazitäten für die gesamte deutsche Zementindustrie.

Das Lastflexibilisierungspotential des Referenzprozesses Zementmahlung wurde anschließend spezifisch 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 Ergebnisse bestätigen hierbei die hauptsächliche Abhängigkeit des Lastflexibilisierungspotentials von der installierten Mühlenantriebsleistung und der jährlichen Mühlenauslastung.

Der ermittelte Regelenergieanteil (flexibler elektrischer Energieeinsatz in Bezug auf den jährlichen Energiebedarf) entsprechend Anforderungsprofil 2 liegt im ersten Referenzwerk für die größte Mühle zwischen 22 % und bei 5 % bei gesteigener 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.

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 (Börsenstrompreise) kaum wirtschaftliche Potentiale für den flexiblen Stromeinsatz in der Zementmahlung entstehen. Die Kostenersparnis selbst kann in der Regel keine neuen Investitionen zur Erhöhung der Flexibilität begründen.

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 erstens die geringen Produktionsleistungen der einzelnen Rührwerkskugelmühlen und zweitens der geringere spezifische Energiebedarf dieser Mahlanlagen in Kombination mit Gutbett-Walzenmühlen gegenüber Kugelmühlen.

19. Schlagwörter

Lastflexibilisierung, Zementmahlung, Deutsche Zementindustrie

20. Verlag

21. Preis

## Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN -	2. type of document (e.g. report, publication) report
3. title SynErgie - Synchronized and energy-adaptive production technology for flexible alignment of industrial processes to a fluctuating energy supply Load flexibility in the cement industry	
4. author(s) (family name, first name(s)) Ruppert, Johannes Rösch, Sebastian Treiber, Kevin	5. end of project October 2019
	6. publication date February 2020
	7. form of publication report
8. performing organization(s) (name, address) VDZ gGmbH, research institute of the Cement Industry	9. originator's report no.
	10. reference no. 03SFK3K0
	11. no. of pages 78
12. sponsoring agency (name, address) Federal Ministry of Education and Research (BMBF) 53170 Bonn	13. no. of references 29
	14. no. of tables 19
	15. no. of figures 29
16. supplementary notes	
17. presented at (title, place, date) Load flexibility in the cement industry Düsseldorf, February 2020	

18. abstract

The cement industry is one of the energy-intensive industrial sectors of the primary industries. Within the scope of the project characteristic key production processes were identified, that are suitable for flexible electrical load shifting. The processes of raw material and cement grinding are considered due to available silo capacities. Technical and economical requirements, which are relevant for the demand-side response of these energy-intensive production processes, were examined.

The results comprise assessable potentials for flexible load management of raw material and cement grinding for the whole German cement industry using statistical machine and production capacities.

The practical potential for flexible load management in cement grinding as a reference process is assessed based on production data of two different cement plants. The developed model compares a flexible grinding mode with reference grinding modes 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 its utilization rate. They are similar to results of the first cement plant and show a comparable scale.

The calculated amount of balance energy (flexible electrical energy in relation to the yearly energy demand) according to demand profile 2 varies between 22% and 5% in case of an increased utilization rate in the second reference year. In the second reference cement plant the amount of balance energy varies between 16% and 31% in dependence of the reference year. Altogether the second reference cement plant shows a comparable magnitude with regard to the load shifting potential despite of a different plant structure.

The economic conditions and obstacles during flexible operation of cement mills were assessed based on cost-indexes for two different historical reference years and electricity price 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.

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 pre-grinding 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 lower specific energy demand of these grinding mills in combination with high-pressure grinding rolls compared to ball mills.

19. keywords

load shifting, cement grinding, German cement industry

20. publisher

21. price