

TEXTE

48/2020

Prozesskettenorientierte Ermittlung der Material- und Energieeffizienzpotentiale in der Zementindustrie

Abschlussbericht

TEXTE 48/2020

Umweltforschungsplan des
Bundesministeriums für Umwelt,
Naturschutz und nukleare Sicherheit

Forschungskennzahl 3716 36 320 0
FB000170

Prozesskettenorientierte Ermittlung der Material- und Energieeffizienzpotentiale in der Zementindustrie

Abschlussbericht

von

Johannes Ruppert, Carina Wagener, Sebastian Palm, Wilfried Scheuer,
Volker Hoenig
VDZ gGmbH, Düsseldorf

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber:

Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
Tel: +49 340-2103-0
Fax: +49 340-2103-2285
buergerservice@uba.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

 /umweltbundesamt.de

 /umweltbundesamt

Durchführung der Studie:

VDZ gGmbH
Tannenstr. 2
40476 Düsseldorf

Abschlussdatum:

Mai 2019

Redaktion:

Fachgebiet III 2.2 Ressourcenschonung, Stoffkreisläufe, Mineral- und
Metallindustrie
Maja Bernicke

Publikationen als pdf:

<http://www.umweltbundesamt.de/publikationen>

ISSN 1862-4804

Dessau-Roßlau, März 2020

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den
Autorinnen und Autoren.

Referenz:

- ▶ Ruppert, Johannes; Wagener, Carina; Palm, Sebastian; Scheuer, Wilfried; Hoenig, Volker. Prozesskettenorientierte Ermittlung der Material- und Energieeffizienzpotentiale in der Zementindustrie: Abschlussbericht (UFOPLAN FKZ 3716 36 320 0). VDZ: Düsseldorf, 2019. <https://www.vdz-online.de/forschung/aktuelle-projekte/prozesskettenorientierte-ermittlung-der-material-und-energieeffizienzpotentiale-in-der-zementindustrie/>
- ▶ Ruppert, Johannes; Wagener, Carina; Palm, Sebastian; Scheuer, Wilfried; Hoenig, Volker. Assessment of the material and energy efficiency potential in the process chain of the cement industry: Final report (UFOPLAN FKZ 3716 36 320 0). VDZ: Düsseldorf, 2019. <https://www.vdz-online.de/forschung/aktuelle-projekte/prozesskettenorientierte-ermittlung-der-material-und-energieeffizienzpotentiale-in-der-zementindustrie/>

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	3
Abbildungsverzeichnis	6
Tabellenverzeichnis	8
Abkürzungsverzeichnis	9
Zusammenfassung.....	11
Summary.....	15
Einleitung.....	19
Workshop	21
Fachgespräch.....	21
1 Thermische Energieeffizienz.....	23
1.1 Moderne Anlagentechnik	30
1.1.1 Moderne Öfen bzw. Brenner in der Zementindustrie	30
1.1.2 Erhöhung der Ofenkapazität	31
1.1.3 Vorwärmer	31
1.1.4 Klinkerkühler	31
1.1.5 Wirbelschichttechnologie	32
1.2 Wärmenutzung	32
1.2.1 Prozessinterne Wärmenutzung.....	32
1.2.2 Trocknung von Rohmaterial.....	33
1.2.3 Trocknung von Hüttensand.....	33
1.2.4 Trocknung von Brennstoffen.....	33
1.2.5 Stromerzeugung mittels Wasser-Dampfkreislauf	34
1.2.6 Stromerzeugung mittels ORC-Verfahren	34
1.2.7 Stromerzeugung mittels Kalina-Verfahren	35
1.2.8 Nutzung für Gebäudeheizungen auf dem Werksgelände.....	35
1.2.9 Nutzung für Nah- und Fernwärme	35
1.2.10 Betrieb einer SCR-Anlage mittels Abwärme.....	36
2 Elektrische Energieeffizienz	37
2.1 Optimierung der Rohmaterialaufbereitung und der Zementmahlung.....	42
2.1.1 Rohmaterialaufbereitung.....	42
2.1.2 Zementmahlung	42
2.1.3 Potenziale durch Ersatz bzw. Ergänzung der Kugelmöhlen durch effiziente Mahlsysteme	42
2.1.4 Mahltechnik im Stadium der Forschung und Entwicklung.....	46
2.2 Moderne Anlagentechnik	46
2.2.1 Elektrische Antriebe	46
2.2.2 Anlagenautomatisierung.....	46
2.2.3 Variable Drehzahltriebe	47
2.2.4 Druckluftherzeugung und -nutzung	47
2.2.5 Beleuchtung	47
2.3 Energieversorgung und Nutzung	48
2.3.1 Energiemanagement	48
2.3.2 Nutzung erneuerbarer Energien	48
2.3.3 Energiebedarf für Umweltschutzmaßnahmen.....	48
3 Einsatz alternativer Brennstoffe.....	50
3.1 Einsatzstoffe.....	58
3.1.1 Einsatz von Industrie-/Gewerbeabfall und Siedlungsabfall	58
3.1.2 Einsatz von Altreifen	59
3.1.3 Einsatz von Klärschlamm.....	60
3.1.4 Zukünftige Pflicht zur Phosphorrückgewinnung aus Klärschlämmen.....	62

3.1.5	Anwendung von Hydrothormaler Karbonisierung bei Klärschlamm	62
3.1.6	Potentiell neuer alternativer Einsatzstoff: Carbonfaserverstärkte Kunststoffe	63
3.1.7	Potentiell neuer alternativer Einsatzstoff: Windradrotorblätter	63
3.2	Technologien zur Verbesserung des Einsatzes alternativer Brennstoffe	63
3.2.1	Sauerstoffeindüsung bei Drehofenanlagen	63
3.2.2	Vorbehandlung von Brennstoffen.....	64
3.2.3	Vorverbrennung oder Vergasung von alternativen Brennstoffen	64
4	Einsatz alternativer Rohstoffe in der Klinkererzeugung	65
4.1	Klärschlamm	70
4.2	Kalziumhaltige und bereits entsäuerte alternative Rohstoffe.....	70
4.3	Steinkohle- und Braunkohleflugaschen als alternativer Rohstoff in der Klinkererzeugung	70
4.4	Potentiell neuer Einsatzstoff: Müllverbrennungs-Aschen (MVA-Aschen).....	70
4.5	Potentiell neuer Einsatzstoff: Aluminiumschlacke und Rotschlamm	71
4.6	Potentiell neuer Einsatzstoff: Glasfaserhaltige Kunststoffe (GFK)	71
4.7	Potentiell neuer Einsatzstoff: Ziegelsplitt.....	71
5	Effizienter Einsatz von Klinker in Zement (Zemente mit mehreren Hauptbestandteilen)	72
5.1	Granulierte Hochofenschlacke (Hüttensand)	77
5.2	Flugasche als weiterer Hauptbestandteil in der Zementherstellung	77
5.3	Kalksteinmehl.....	78
5.4	Natürliche Puzzolane	79
5.5	Natürliche kalzinierte Puzzolane - kalzinierte Tone.....	79
5.6	Potentiell neuer Einsatzstoff: Stahlwerksschlacken (LD-Schlacke und Elektroofenschlacke).....	80
6	Einsatz neuer Bindemittel.....	81
6.1	Alkali-aktivierte Bindemittel (Geopolymere).....	82
6.2	Belit-Zemente	82
6.3	Zemente auf Basis der Karbonatisierung von Kalziumsilikaten	83
6.4	Kalzium-Sulfoaluminat-Klinker.....	83
6.5	CSH-Binder	84
6.6	Magnesia-basierte Binder.....	84
7	Materialeffizienz in der Betonherstellung, -anwendung und -recycling	85
7.1	Klinkereffizienter Einsatz von Zement in Beton.....	87
7.1.1	Ultrahochleistungsbeton (UHPC, ultra high performance concrete)	87
7.1.2	Carbonbeton	87
7.2	Betonrecycling	88
7.2.1	Recyclingquote in Deutschland	88
7.2.2	Einsatz von Betonen mit rezyklierten mineralischen Baumaterialien	89
7.2.3	Feinfraktionen aus rezyklierten Gesteinskörnungen (Brechsande).....	90
7.2.4	Müllverbrennungsasche als Gesteinskörnung	91
7.3	Einsatz von Betonen mit weiteren industriellen Nebenprodukten	91
7.3.1	Steinkohlenflugasche	91
7.3.2	Hüttensandmehl.....	92
8	Abscheidung, dauerhafte Speicherung und Nutzung von CO ₂ aus gefassten Quellen.....	93
8.1	Carbon Capture.....	94
8.1.1	Pre-Combustion-Technologie.....	96
8.1.2	Oxyfuel-Technologie	96
8.1.3	Post-Combustion-Technologie	97
8.1.4	Weitere Verfahren zur CO ₂ -Abscheidung	97
8.1.4.1	Calcium-Looping	97
8.1.4.2	Direkte Kalzinierung	97
8.2	Stoffliche Nutzung von CO ₂	98

9	Strombasierte Klinkererzeugung	101
10	Modellierung der Material- und Energieeffizienz	103
	10.1 Modellgrundlage.....	103
	10.2 Zielparameter	103
	10.3 Referenzzementwerk und Basis 2016.....	103
	10.4 Indirekte CO ₂ -Emissionen gemäß Strommix.....	105
	10.5 Szenarien-Übersicht.....	106
	10.6 Beispiele	106
11	Einschätzung des Material- und Energieeinsatzes und damit verbundener CO ₂ -Emissionen	107
	11.1 Szenario 1: Basis 2030.....	107
	11.1.1 Thermischer Energieeinsatz und Brennstoffmix	107
	11.1.2 Entwicklung des Zementportfolios	108
	11.1.3 Elektrischer Energieeinsatz für Umwelttechnologien.....	111
	11.1.4 Elektrische Energieeffizienz in Querschnittstechnologien.....	111
	11.1.5 Auswirkungen auf die direkten und indirekten CO ₂ -Emissionen.....	111
	11.2 Szenario 2: Anlagenoptimierung	111
	11.2.1 Thermische Energieeffizienz	112
	11.2.2 Technologie zum optimierten Einsatz von alternativen Brennstoffen	112
	11.2.3 Maximalansatz zur Optimierung von Querschnittstechnologien	113
	11.2.4 Auswirkungen auf den Energieeinsatz	114
	11.2.5 Auswirkungen auf die direkten und indirekten CO ₂ -Emissionen.....	114
	11.3 Szenario 3: Hüttensandeinsatz ca. -25 %.....	114
	11.3.1 Entwicklung des Klinker/Zement-Faktors	115
	11.3.2 Auswirkungen auf den Einsatz von weiteren Zementhauptbestandteilen.....	116
	11.3.3 Auswirkungen auf die direkten und indirekten CO ₂ -Emissionen.....	116
	11.3.4 Ausblick zur Verfügbarkeit von Hüttensand	117
	11.4 Szenario 4: BAT-Mahlung.....	117
	11.4.1 Entwicklung der produktspezifischen Mahlenergie.....	118
	11.4.2 Auswirkungen auf den elektrischen Energieeinsatz	119
	11.4.3 Auswirkungen auf die indirekten CO ₂ -Emissionen	119
	11.5 Szenario 5: Oxyfuel-Prozess mit 95 % CO ₂ -Abscheidung.....	119
	11.5.1 Auswirkungen auf den Energieeinsatz	121
	11.5.2 Auswirkungen auf die direkten CO ₂ -Emissionen.....	122
	11.5.3 Einbindung von CO ₂ durch Karbonatisierung von Beton im Lebenszyklus	123
	11.5.4 Auswirkungen auf die indirekten CO ₂ -Emissionen.....	124
	11.5.5 Auswirkungen auf die direkten und indirekten CO ₂ -Emissionen.....	124
	11.5.6 Ausblick zur Anwendung von Technologien zur CO ₂ -Abscheidung im Zementherstellungsprozess und Bewertung der CO ₂ -Vermeidungskosten	125
12	Beispiele zu Einflüssen auf die Material- und Ressourceneffizienz.....	127
	12.1 Beispiel 6: Zemente auf Basis der Karbonatisierung von Kalziumsilikaten	127
	12.2 Beispiel 7: Flugasche Einsatz im Beton	127
	12.3 Beispiel 8: Carbonbeton.....	128
	12.4 Beispiel 9: R-Zement	130
	Quellenverzeichnis	132
	Anhang 1 – Relevanz für Ressourcen- und Energieeffizienz	140
	Anhang 2 – Fördermöglichkeiten	141
	Anhang 3 – Modellergebnisse in Tabellen	142
	Anhang 4 – Modellergebnisse als spezifische Werte in Tabellen.....	147

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Thermischer Energiebedarf der Zementwerke in Deutschland in kJ/kg Klinker	24
Abbildung 2: Thermischer Energiebedarf der Zementwerke in Deutschland in kJ/kg Zement].....	24
Abbildung 3: Temperaturniveaus im Klinkerbrennprozess am Beispiel eines Drehrohrofens mit Kalzinator und Tertiärluftleitung	26
Abbildung 4: Steigende Nachfrage nach den Produkten höherer Festigkeitsklassen 52.5 und 42.5 im Vergleich zur Festigkeitsklasse 32.5	37
Abbildung 5: Elektrischer Energiebedarf (vorläufiger Wert für 2015)	38
Abbildung 6: Vormahlung.....	43
Abbildung 7: Hybridmahlung.....	44
Abbildung 8: Teilfertigmahlung	44
Abbildung 9: Getrennte Mahlung am Beispiel der Hüttenzementherstellung	46
Abbildung 10: Brennstoffeinsatz in der deutschen Zementindustrie 2015 und Beispiel zur Vermeidung fossiler CO ₂ -Emissionen anhand von Daten zum Einsatz von alternativen Brennstoffen im Jahr 2016	50
Abbildung 11: Entwicklung der Staubemissionen (Jahresmittelwerte) und Substitutionsraten	53
Abbildung 12: Entwicklung der NO _x -Emissionen (Jahresmittelwerte) und Substitutionsraten	54
Abbildung 13: Fluff	58
Abbildung 14: Chemische Zusammensetzung von Fluff.....	59
Abbildung 15: Chemische Zusammensetzung von Altreifen.....	60
Abbildung 16: Chemische Zusammensetzung von getrocknetem Klärschlamm	61
Abbildung 17: Klärschlamm, links getrocknete Klärschlamm pellets (Trockensubstanz > 85 %); rechts feuchter Klärschlamm (Trockensubstanz < 30 %).....	61
Abbildung 18: Chemische Zusammensetzung des Klinkers sowie Aschezusammensetzung ausgewählter Brennstoffe und alternativer Rohstoffe.....	65
Abbildung 19: Zementversand in Deutschland	72
Abbildung 20: Recyclingsituation in Deutschland 2014	88
Abbildung 21: Statistisch erfasste Mengen mineralischer Bauabfälle 2014 in Mio. t.....	90
Abbildung 22: CO ₂ -Intensität des deutschen Strommix und Trendannahme für 2030..	105
Abbildung 23: Entwicklung der Festigkeitsklassen im Zementversand in Deutschland..	109
Abbildung 24: Entwicklung der Zementarten in Deutschland in den Szenarien 1, 2, 4, 5, VDZ-Modell2018.....	110
Abbildung 25: Entwicklung der Zementarten in Deutschland bei abnehmender Verfügbarkeit und vermindertem Einsatz von Hüttsand um -25 % im Szenario 3, VDZ-Modell2018	115
Abbildung 26: Entwicklung des Klinker/Zement-Faktors im VDZ-Modell2018	116
Abbildung 27: Modellierung der produktspezifischen Mahlergie im VDZ- Modell2018.....	118
Abbildung 28: Technologiepfade zur Minderung von direkten CO ₂ -Emissionen bei der weltweiten Herstellung von Zement	121
Abbildung 29: Weltweite Perspektive zur Anwendung von Technologien zur CO ₂ - Abscheidung in der Zementindustrie	121
Abbildung 30: Elektrischer Energiebedarf beim vollständigen Oxyfuel-Prozess.....	122
Abbildung 31: Entwicklung der CO ₂ -Emissionen in einem Referenzementwerk bei Anwendung des Oxyfuel-Prozesses mit 95 % CO ₂ -Abscheidung, Szenario 5, VDZ-Modell2018, in Deutsch und Englisch	125

Abbildung 32: Beispiele mit Einschätzung der Änderung direkter und indirekter CO ₂ -Emissionen.....	128
Abbildung 33: Bewertungsmatrix aus dem Projektworkshop am 21.09.2017 im VDZ (Arbeitspaket 2)	140

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Anzahl und Kapazität der Öfen mit Betriebsgenehmigung in Deutschland (Stand 2016) [VDZ16a].....	30
Tabelle 2: Einsatz und durchschnittliche Heizwerte alternativer Brennstoffe in 2015 [VDZ16a]	51
Tabelle 3: Referenzzementwerk im VDZ-Modell2018.....	104
Tabelle 4: Brennstoffmix 2030	108
Tabelle 5: VDZ-Modell2018 für ein Referenzzementwerk nach Szenario 1: Basis 2030.	142
Tabelle 6: VDZ-Modell2018 für ein Referenzzementwerk nach Szenario 2: Anlagenoptimierung	143
Tabelle 7: VDZ-Modell2018 für ein Referenzzementwerk nach Szenario 3: HÜS ca. - 25 %	144
Tabelle 8: VDZ-Modell2018 für ein Referenzzementwerk nach Szenario 4: BAT- Mahlung.....	145
Tabelle 9: VDZ-Modell2018 für ein Referenzzementwerk nach Szenario 5: Oxyfuel 95 % CO ₂ -Abscheidung, Start ab 2030 bis 2050	146
Tabelle 10: VDZ-Modell2018 für ein Referenzzementwerk nach Szenario 1: Basis 2030 – spezifische Werte bezogen auf Zement	147
Tabelle 11: VDZ-Modell2018 für ein Referenzzementwerk nach Szenario 2: Anlagenoptimierung – spezifische Werte bezogen auf Zement	147
Tabelle 12: VDZ-Modell2018 für ein Referenzzementwerk nach Szenario 3: HÜS ca. -25 % – spezifische Werte bezogen auf Zement	148
Tabelle 13: VDZ-Modell2018 für ein Referenzzementwerk nach Szenario 4: BAT-Mahlung – spezifische Werte bezogen auf Zement	148
Tabelle 14: VDZ-Modell2018 für ein Referenzzementwerk nach Szenario 5: Oxyfuel 95 % CO ₂ -Abscheidung, Start ab 2030 bis 2050 – spezifische Werte bezogen auf Zement.....	149
Tabelle 15: VDZ-Modell2018 Brennstoffparameter für Szenarien 1 bis 5	149

Abkürzungsverzeichnis

Kürzel	Beschreibung
ABS	Alternative Brennstoffe
BBQ	Richtlinie zur Betonbauqualität
BIM	Building information management
CCS	Carbon Capture and Storage
CCU	Carbon Capture und Utilization
CEMBUREAU	European Cement Association
CEMCAP	CO ₂ capture from cement production [CEMg]
CFK	Karbonfaserverstärkte Kunststoffe
CLEANKER	Clean clinker production by oxyfuel calcination and calcium looping [CLE]
CPU	CO ₂ purification unit
CSH	Kalziumhydrosilikate
CSI	Cement Sustainability Initiative
DafStB	Deutscher Ausschuss für Stahlbeton
ECRA	European Cement Research Academy
EOR	Enhanced Oil Recovery
FEhS	Instituts für Baustoff-Forschung e.V.
FU	Frequenzumrichter
FWL	Feuerungswärmeleistung
HBCD	Hexabromcyclododecan
HPC	High Performance Concrete
HTC	Hydrothermale Karbonisierung
HÜS	Hüttensand
HPRG	High pressure roller grinder, Hochdruck-Rollenpresse
GCCA	Global Cement and Concrete Association
GFK	Glasfaserhaltige Kunststoffe

IEA	International Energy Agency
IKT	Informations- und Kommunikationstechnik
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
LEILAC	Low Emissions Intensity Lime And Cement [LEIa]
MVA	Müllverbrennungsanlage
NET	Negative Emission Technology, Technologie für CO ₂ -negative Emissionen bzw. CO ₂ -Entzug aus der Atmosphäre
ORC	Organic Rankine Cycle
PCB	Polychlorierte Biphenyle
POP	Persistent organic pollutant
RC	Rezyklierte Gesteinskörnung
REA	Rauchgasentschwefelungsanlagen
ROI	Return on invest
SCR	Selective Catalytic Reduction
TA Luft	Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft
TOC	Total Organic Carbon, Gesamtgehalt an organischem Kohlenstoff
TRL	Technologischer Reifegrad, technological readiness level
UBA	Umweltbundesamt
UHPC	Ultra High Performance Concrete
VDZ	Verein Deutscher Zementwerke
VÖZ	Vereinigung der Österreichischen Zementindustrie
VRM	Vertical roller mill, Vertikal-Wälz-Mühle
WHR	Waste heat recovery
WT	Wärmetauscher

Zusammenfassung

Die Zementindustrie liefert mit der Herstellung von Zement einen der wichtigsten Baustoffe für viele verschiedene Anwendungsbereiche. Die Prozesse zur Produktion von Zementklinker und Zementen machen sie gleichzeitig zu einer energie- und rohstoffintensiven Branche.

Maßnahmen zur Optimierung der Prozesse und des Materialeinsatzes werden entlang der gesamten Wertschöpfungskette der Herstellung von Zement und Beton angewendet und weiter entwickelt. Sie leisten wichtige Beiträge zur Ressourcenschonung und zum Klimaschutz. Heutige Technologien und weitere Entwicklungen zur Steigerung der Energie- und Materialeffizienz beziehen sich auf den gesamten Lebenszyklus der Zementprodukte von der Rohstoffgewinnung über die Produktion und Weiterverarbeitung bis zur Gebäudenutzung und zum Recycling der Baustoffe nach einem Abriss [IGB; CEMb; CEMc]. In der Zementindustrie kommt der hochwertigen Nutzung von Nebenprodukten benachbarter Industrien und einer energetischen und stofflichen Nutzung von alternativen Einsatzstoffen schon seit langer Zeit eine besondere Bedeutung zu. Dies trägt im Sinne der Kreislaufwirtschaft zum effizienten Einsatz von Materialien und einem vermindertem Bedarf an primären Einsatzstoffen bei. [WUP].

Im Jahr 2015 produzierten in Deutschland 22 Zementunternehmen etwa 31 Mio. t Zement. Für die Zementproduktion wurden etwa 23 Mio. t Zementklinker hergestellt [VDZ 16]. Hierfür wurden 48,6 Mio. t Rohstoffe eingesetzt, davon 7,8 Mio. t alternative Rohstoffe, wodurch mehr als 11 Mio. t Kalkstein eingespart werden konnten [VDZ 16]. Zur Klinkererzeugung wurden in Deutschland im Jahr 2015 etwa 4,4 Mio. t Brennstoffe eingesetzt, davon etwa 3,1 Mio. t alternative Brennstoffe [VDZ 16] aus Abfällen und Reststoffen. Der thermische Energiebedarf wird somit heute überwiegend durch alternative Brennstoffe wie aufbereitete Gewerbe- und Siedlungsabfälle, Altreifen, Altöl oder Klärschlamm gedeckt (64,6 % in 2015). Die Substitution fossiler Energieträger ist für die Verringerung der Treibhausgas-Emissionen in der Zementindustrie von entscheidender Bedeutung. Der Anteil fossiler Brennstoffe (vor allem Braun- und Steinkohle) ging kontinuierlich von 74,3 % im Jahr 2000 auf aktuell 35,4 % zurück.

Langfristig betrachtet, erfordern zusätzliche Beiträge zur Ressourcenschonung und zum Klimaschutz die Weiterentwicklung von Maßnahmen und Technologien und die Erschließung neuer Potentiale in Hinblick auf die Steigerung der Energie- und Materialeffizienz in der Zementindustrie [ECRA]. Wichtige Maßnahmen stellen dabei die Verringerung des thermischen und elektrischen Energiebedarfs, der weitere Einsatz von alternativen Roh- und Brennstoffen sowie die Minderung von CO₂-Emissionen und der effiziente Einsatz von Klinker in Zement und Beton dar [SCH].

Mit den in der Studie vorgestellten technologischen Ansätzen werden Potenziale aufgezeigt, die die Material- und Energieeffizienz zukünftig weiter steigern können. Die Maßnahmen erfordern allerdings heute und zukünftig in allen Technologiebereichen eine Weiterentwicklung. Hiernach kann eine Umsetzung und Anwendung der Technologien die Energie- und Materialeffizienz in der Zementindustrie weiter optimieren. Zudem ist eine standort- und werkspezifische Bewertung erforderlich, um geeignete Technologien und Maßnahmen zu identifizieren.

Thermische Energie

Entsprechend dem spezifischen Energiebedarf für die Zementklinkerherstellung bei hohen Temperaturen bis 1.450 °C ist die Optimierung der Energienutzung seit jeher ein entscheidender Antrieb für die Weiterentwicklung der Technologien zur Zementherstellung. Optimierungspotentiale aus dem Einsatz moderner Ofentechnologie und effizienter Wärmetauscher sind in Zementwerken in Deutschland weitgehend umgesetzt. Das zusätzliche Potential hinsichtlich der Steigerung der thermischen Energieeffizienz ist deshalb langfristig eher gering einzustufen.

Die Steigerung der thermischen Energieeffizienz in der Zementherstellung kann zukünftig am ehesten durch weitere optimale Wärmerückgewinnung und Abwärmenutzung erfolgen. Energie aus dem Klinkerbrennprozess auf niedrigeren Temperaturstufen kann zur weiteren (Vor-)Trocknung von Roh- und Brennstoffen sowie zur direkten Wärmebereitstellung oder Stromerzeugung genutzt werden. Einer stetigen Optimierung sind insbesondere durch den thermischen Energiebedarf der Prozesse selbst, den Energiebedarf für die Roh- und Brennstofftrocknung und den technologisch z.T. unvermeidbaren Wärmeverlusten Grenzen gesetzt.

Elektrische Energie

Der elektrische Energieeinsatz in der Zementindustrie findet insbesondere in der Zement- und Rohmahlung statt. Deshalb kommt der Weiterentwicklung von effizienteren Mühlen und der Optimierung der Mahlprozesse eine große Bedeutung zu. Steigende Anforderungen an die Qualität der Produkte sowie der Einsatz von weiteren Bestandteilen neben Klinker in der Zementherstellung, führen gleichzeitig zu einem steigenden elektrischen Energiebedarf. Weiterhin tragen erhöhte Umweltauflagen zur Erhöhung des elektrischen Energiebedarfs durch zusätzliche Anlagen bei. Eine systematische Bewertung, auch von kleineren spezifischen Einsparpotentialen findet durch die Nutzung von Energiemanagementsystemen in der Zementindustrie in Deutschland statt.

Alternative Brennstoffe

Zur Reduktion des Einsatzes von Primärbrennstoffen und zur Minderung von fossilen CO₂-Emissionen aus dem Klinkerbrennprozess, werden seit vielen Jahren alternative Brennstoffe eingesetzt. Die Zementindustrie in Deutschland nimmt hierbei zusammen mit der Zementindustrie in einigen umliegenden Ländern eine führende Rolle bei dem Einsatz diesbezüglicher Technologien ein. Um die Material- und Energieeffizienz im Klinkerbrennprozess weiterhin zu optimieren, sollten potenziell neue alternative Brennstoffe und neu entstehende Abfälle und Möglichkeiten zur Aufbereitung von Reststoffen (z.B. aus dem zunehmenden Einsatz von Faser-Verbundwerkstoffen) auf ihre Verfügbarkeit und Eignung für den Einsatz im Klinkerbrennprozess untersucht werden.

Alternative Rohstoffe in der Zementklinkerherstellung

Zementklinker wird aus unterschiedlichen natürlichen und alternativen Rohstoffen mit genau abgestimmter Zusammensetzung der Stoffkomponenten hergestellt. Zur Schonung der Ressourcen und zur Minderung des Energieeinsatzes und der CO₂-Emissionen, werden heute immer mehr alternative Rohstoffe wie z.B. industrielle Nebenprodukte in der Klinkererzeugung eingesetzt. Aufgrund der regional und langfristig begrenzten Verfügbarkeit von Nebenprodukten bestimmter Industrien (z.B. Hütensand oder Flugasche) könnten weitere alternative Rohstoffe, wie z.B. Schlacken aus Müllverbrennungsanlagen, hinsichtlich ihrer Eignung für den Einsatz zur Klinkererzeugung untersucht werden. Von Bedeutung ist hierbei vor allem der ggf. erforderliche Aufwand für die Entfrachtung von Schadstoffen. Sowohl die hohen Anforderungen an eine genau eingestellte Rohmaterialzusammensetzung hinsichtlich der Produktqualität als auch die Vermeidung negativer Umwelteinflüsse, bleiben zu beachten.

Zemente mit mehreren Hauptbestandteilen

Um den Klinker möglichst effizient einzusetzen und dadurch die Material- und Energieeffizienz in der Zementindustrie zu steigern, werden bereits seit langem Zemente mit mehreren Hauptbestandteilen hergestellt. Die Stoffe, die als weitere Hauptbestandteile eingesetzt werden, vermindern den Anteil an Zementklinker im Produkt und vermeiden somit den Ressourcen- und Energieeinsatz in der Zementklinkerherstellung sowie die entsprechenden CO₂-Emissionen. Maßgeblich sind hierbei die hohen Anforderungen an die Qualität und Zuverlässigkeit der Zementprodukte, die sich insbesondere aus der europäischen Zementnorm DIN EN 197-1 und der Nachfrage nach leistungsfähigen Zementen in der Baupraxis ergeben.

In Deutschland kommen, neben Hüttensand und Flugasche, seit längerem dem Einsatz von Kalksteintmehl als weiterem Hauptbestandteil eine wichtige Bedeutung zu. Die Kombination von verschiedenen weiteren Hauptbestandteilen wird als wichtiges Feld für weitere Entwicklungen unter anderem in der Normung angesehen. Forschungsansätzen zufolge könnten weitere Nebenprodukte wie bestimmte Stahlwerksschlacken nach einer geeigneten Aufbereitung bzw. Entfrachtung als Hauptbestandteil zukünftig in Frage kommen. Für die Weiterentwicklung von Zementen mit mehreren Hauptbestandteilen sind allerdings auch die langfristige Verfügbarkeit der möglichen einzusetzenden Stoffe, die Umweltwirkungen und die Marktakzeptanz zu berücksichtigen.

Neue Bindemittel

Neue Bindemittel ermöglichen aus heutiger Sicht zukünftig Zemente in bestimmten Bauanwendungen teilweise zu ersetzen. Viele der neuen Bindemittel befinden sich jedoch nach wie vor im Stadium der Forschung und Entwicklung. Nach erfolgreicher Prüfung der Eignung der Bindemittel könnte sich je nach Produktionsverfahren des Bindemittels und nach einer vollständigen Betrachtung aller Einsatzstoffe, eine Verringerung der benötigten Energiemengen und Ressourcen ergeben. Die Anwendung der neuen Bindemittel bleibt nach heutigem Kenntnisstand oft auf spezielle Produktbereiche oder -nischen beschränkt. Derzeit erscheint kein neues Bindemittel geeignet, im industriellen Maßstab Zemente auf der Basis von Zementklinker zu ersetzen. Neue Bindemittel könnten somit in begrenzten Mengen angewendet werden und dementsprechend zu einer effizienten Nutzung von Zement beitragen.

Betonherstellung, -anwendung und -recycling

Im Bereich der Betonherstellung zeigen der Einsatz von klinkereffizientem Zement im Beton, der Einsatz von Betonen mit industriellen Nebenprodukten sowie das Betonrecycling Möglichkeiten auf, um den Einsatz von primären Rohstoffen und Materialien sowie Energieverbrauch und CO₂-Emissionen zu mindern. Beispielsweise könnte der Einsatz von recycelten Gesteinskörnungen (Grob- und Feinfraktion) als Materialkomponente in der Betonherstellung natürliche Rohstoffe ersetzen und somit primäre Ressourcen einsparen. Ihr Einsatz hat allerdings auch Auswirkungen auf den Zementverbrauch, den Wasseranspruch, die Verarbeitbarkeit sowie die Verdichtung des Betons, sodass gültige Normen und Richtlinien ihren Einsatz z.T. begrenzen.

Modellierung für ein Referenzzementwerk

Zur weiteren Beschreibung und Bewertung wesentlicher Technologiebereiche wurde im Projekt das VDZ-Modell2018 entwickelt und angewendet. Ausgehend von statistischen Daten der Zementindustrie in Deutschland aus dem Jahr 2016 und am Beispiel eines Referenzzementwerks, wurden fünf Szenarien für das Jahr 2030 beschrieben. Diese umfassten die Nutzung von 80 % alternativer Brennstoffe, die stetige und maximal angesetzte Anlagenoptimierung, Variationen in der Verfügbarkeit von weiteren Hauptbestandteilen für Zement, den Austausch von Mahlanlagen und eine 95 %ige Abscheidung von CO₂ durch einen Oxyfuel-Prozess mit anschließender dauerhafter Speicherung.

Die Ergebnisse zeigen die besondere Bedeutung der effizienten Nutzung von Zementklinker für die Herstellung von Baustoffen auf. Im Zusammenwirken mit einer umfangreichen Anlagenoptimierung und dem verstärkten Einsatz von alternativen Brennstoffen wurden für das Referenzzementwerk Verminderungen der CO₂-Emissionen zwischen -5 % und -8 % abgeschätzt (Szenarien 1, 2, 4). Die Einschränkung der eingeschätzten Potentiale muss angesichts standort- und werkspezifischer Voraussetzungen, der lokalen Verfügbarkeit von geeigneten Materialien und der begrenzten Wirtschaftlichkeit für die Anwendung vieler Technologien erwartet werden.

Zusammenfassend zeigen diese Szenarien zusätzliche jedoch begrenzte Potentiale zur Verminderung von CO₂-Emissionen mit klassischen Technologien. Ihre Umsetzung erfordert eine zunehmende Integration entlang der Wertschöpfungskette und die Betrachtung des ganzen Lebenszyklus, angefangen von der Produktion und zur Anwendung von Zement und Beton bis hin zur Planung und Nutzung von Bauwerken. Selbst bei sehr umfangreicher Umsetzung der Technologien zur effizienten Produktnutzung sind die zu erwartenden Minderungen nicht ausreichend, um dadurch das Ziel einer Treibhausgas-neutralen Zementproduktion und -anwendung zu erreichen.

Die Nutzung von Break-Through-Technologien erscheint nur unter sich ändernden Randbedingungen realistisch umsetzbar. Grundlegend hierfür ist ein zunehmender Dialog mit Politik und Gesellschaft. Insbesondere erfordert die Umsetzung von Break-Through-Technologien eine gezielte Nachfrage nach CO₂-neutralen Zementen und Bauprodukten mit höheren Produktionskosten, zuverlässige Standards für die Qualitätssicherung und effektive Instrumente zur Vermeidung von Carbon-Leakage.

Eine tiefgreifende Minderung der zu 2/3 prozessbedingten CO₂-Emissionen wurde im Szenario 5 durch die CO₂-Abscheidung am Beispiel eines Oxyfuel-Prozesses dargestellt. In Kombination mit dem Einsatz alternativer Brennstoffe mit biogenem Kohlenstoffanteil (Szenario 1) zeigt es die Möglichkeit einer negativen Bilanz direkter CO₂-Emissionen, d.h. eines Entzugs von CO₂ aus der Atmosphäre auf (Negative Emission Technology, NET). Voraussetzung dafür ist die Vermeidung indirekter CO₂-Emissionen aus dem Einsatz elektrischer Energie. Für die CO₂-Abscheidung, -Nutzung und -Speicherung ist außerdem die Klärung und Schaffung geeigneter Rechtsgrundlagen erforderlich.

Summary

The cement industry produces and supplies one of the most important building materials for a wide variety of areas of application. At the same time, the processes involved in the production of cement clinker and cements make it a major consumer of energy and raw materials.

Measures designed to optimise the processes and material usage are employed throughout the entire value chain for the production of cement and concrete and are being constantly advanced. These make a significant contribution to the preservation of resources and climate protection. Modern technologies and further developments to increase energy and material efficiency are aimed at the entire life cycle of the cement products, including the extraction of raw materials, as well as production and further processing, and also the usage of buildings and the recycling of building materials following demolition [IGB; CEMb; CEMc]. For a long time now, the cement industry has attached particular significance to the high-grade utilisation of by-products from related industries, as well as the energy-efficient use of alternative constituents. In keeping with the principles of a circular economy, this helps to ensure the efficient utilisation of materials whilst reducing the demand for primary constituents. [WUP].

In 2015, 22 cement companies in Germany produced around 31 million tonnes of cement. This involved the production of some 23 million tonnes of cement clinker [VDZ 16]. 48.6 million tonnes of raw materials were required. The 7.8 million tonnes of alternative raw materials included in this figure made it possible to save on more than 11 million tonnes of limestone [VDZ 16]. In 2015, roughly 4.4 million tonnes of fuel were used for clinker production in Germany, of which around 3.1 million tonnes were alternative fuels [VDZ 16] from waste and residual materials. Today, the thermal energy demand is thus largely covered by alternative fuels such as pre-treated industrial and municipal waste, used tyres, waste oil or sewage sludge (64.6% in 2015). The replacement of fossil energy sources is of crucial importance with regard to the reduction of greenhouse gas emissions in the cement industry. The proportion of fossil fuels (primarily lignite and hard coal) has continuously decreased from 74.3% in the year 2000 to its present level of 35.4%.

From a long-term perspective, additional efforts to preserve resources and protect the climate will demand the further advancement of methods and technologies, as well as the development of new opportunities for enhancing energy and material efficiency in the cement industry [ECRA]. Important aspects in this regard are a reduction in thermal and electrical energy demand, the continued utilisation of alternative raw materials and fuels, the lowering of CO₂ emissions and the efficient use of clinker in cement and concrete [SCH].

The technological approaches presented in this study outline possible ways of further increasing future material and energy efficiency. The methods involved will however necessitate further advancement in all areas of technology both today and in the future. Implementation and application of the technologies could then allow further optimisation of energy and material efficiency in the cement industry. Case-specific assessment based on the plant and its location is also essential to be able to identify suitable technologies and measures.

Thermal energy

In the light of the specific energy demand for cement clinker production at high temperatures up to 1,450°C, the optimisation of energy utilisation has always been a driving force behind the advancement of cement production technologies.

The potential for optimisation offered by the use of modern kiln technology and efficient heat exchangers has already been largely implemented at cement plants in Germany. There would thus appear to be relatively little further scope here for any enhancement of thermal energy efficiency over the long term.

In the future, better thermal energy efficiency in cement production is more likely to be obtained from the increased use of optimum heat recovery and waste heat utilisation techniques. Energy from the clinker burning process at lower temperature levels can be employed for the further (pre-)drying of raw materials and fuels as well as for the direct provision of heat or power generation. The thermal energy demand for the actual processes, the energy demand for the drying of raw materials and fuels and also the sometimes unavoidable heat losses associated with the technologies are prime factors limiting the scope for constant optimisation.

Electrical energy

The electrical energy input in the cement industry is accounted for first and foremost by the cement and raw meal grinding processes. Therefore, the development of more efficient mills and optimisation of the grinding processes are of great significance. Higher product quality standards and the use of other constituents in addition to clinker in cement production are associated with a rising electrical energy demand. More stringent environmental requirements also play a part in increasing the electrical energy demand on account of the additional installations involved. The use of energy management systems in the German cement industry provides a systematic assessment of even minor specific savings potential.

Alternative fuels

Alternative fuels have been employed for many years now as a way of cutting down the use of primary fuels and reducing fossil CO₂ emissions from the clinker burning process. The cement industries in Germany and several neighbouring countries together play a leading role in the utilisation of such technologies. To further optimise material and energy efficiency in the clinker burning process, potential new alternative fuels, as well as new types of waste occurring and methods of treating residual materials (e.g. from the increasing use of fiber composite materials) are to be investigated with regard to their availability and suitability for use in the clinker burning process.

Alternative raw materials in cement clinker production

Cement clinker is produced from a variety of natural and alternative raw materials with a precisely defined component composition. In the interests of preserving resources and reducing both energy input and CO₂ emissions, ever more alternative raw materials such as industrial by-products are being used in clinker production these days. Given the limited regional and long-term availability of by-products from certain industries (e.g. blast furnace slag or fly ash), further alternative raw materials, such as slags from waste incinerators, could be investigated with regard to their suitability for use in clinker production. The effort possibly required for the removal of pollutants is of particular significance in this respect. Consideration must also be given to the need to precisely set the raw material composition for the product quality concerned as well as to the avoidance of negative effects on the environment.

Cements with several main constituents

For a long time now, cements have been made with several main constituents in order to make the most efficient possible use of the clinker and thus to enhance material and energy efficiency in the cement industry.

The materials employed as further main constituents lower the proportion of cement clinker in the product and so reduce the amount of resources and energy used in cement clinker production, as well as cutting CO₂ emissions accordingly. The definitive factors are the requirements made of the cement products in terms of quality and reliability which arise in particular from the European cement standard DIN EN 197-1 and the demand for high-performance cements in the building industry.

The use of limestone meal as a further main constituent alongside blast furnace slag and fly ash has long since become an important aspect in Germany.

The combination of various other main constituents is viewed as a significant field for further development in the context of standardisation, for example. Research shows that, following suitable treatment and pollutant removal, other by-products such as certain steel works slags could be considered for use as main constituents. As regards the further development of cements with several main constituents, consideration must however also be given to the long-term availability of the possible materials to be used, effects on the environment and acceptability in the market place.

New binders

From the current perspective, new binders will make it possible to partially replace cements in certain building applications in future. Many of the new binders are however still at the research and development stage. Once their suitability has been successfully checked, the binders could, depending on the production processes employed and following full assessment of all the constituents, bring about a reduction in the amount of energy and resources required. Based on today's level of knowledge, use of the new binders will often be restricted to special product ranges or niches. At present, no new binder would appear to be capable of replacing cements based on cement clinker on an industrial scale. New binders could thus be employed to a limited degree and so contribute towards the efficient use of cement.

Production, use and recycling of concrete

In the field of concrete production, the use of clinker-efficient cement in the concrete, the utilisation of concretes with industrial by-products and concrete recycling offer potential for reducing the amount of primary raw materials employed, energy consumption and CO₂ emissions. Recycled aggregates (coarse and fine fraction) could, for example, replace natural raw materials as material component in concrete production and thus save on primary resources. The use of these does however also have consequences for cement consumption, water demand, workability and compaction of the concrete, so that their application is to some extent restricted by applicable standards and directives.

Modelling for a reference cement plant

For the further description and assessment of relevant areas of technology, the VDZ-Model2018 was developed and applied in the project. Based on statistical data from the German cement industry for the year 2016 and taking a reference cement plant as an example, five scenarios were described for the year 2030. These encompassed the utilisation of 80% alternative fuels, constant and assumed maximum plant optimisation, variations in the availability of further main constituents for cement, the replacement of grinding plants and 95% carbon capture in an oxyfuel process with subsequent permanent storage.

The results show the particular significance of the efficient use of cement clinker for the production of building materials. In combination with extensive plant optimisation and the increased utilisation of alternative fuels, reductions in CO₂ emission levels of between -5% and -8% were estimated for the reference cement plant (scenarios 1, 2, 4). Restrictions to the estimated potential must be anticipated on account of specific location and plant-related conditions, the local availability of suitable materials and the limited cost-effectiveness associated with the application of many technologies.

To summarise, these scenarios illustrate additional, but limited potential for reducing CO₂ emissions with conventional technologies. Their implementation would require increasing integration along the value chain and a consideration of the life cycle as a whole, starting with the production and application of cement and concrete right through to the planning and utilisation of buildings. Even assuming extremely extensive implementation of the technologies for efficient product utilisation, the reductions to be expected will not be sufficient to achieve the goal of greenhouse gas-neutral cement production and application.

The implementation of breakthrough technologies would only appear to be realistic given a change in boundary conditions. A more intensive political and public debate is a basic prerequisite for this. Above all, the implementation of breakthrough technologies requires a specific demand for carbon-neutral cements and construction products with higher production costs, reliable standards for quality assurance and effective instruments for the avoidance of carbon leakage.

A substantial reduction in the 2/3 process-related CO₂ emissions was illustrated in scenario 5 based on the example of carbon capture in an oxyfuel process. In conjunction with the use of alternative fuels with biogenic carbon content (scenario 1), it shows the possibility of a negative balance for direct CO₂ emissions, i.e. the extraction of CO₂ from the atmosphere (Negative Emission Technology, NET). This presupposes the avoidance of indirect CO₂ emissions from the use of electrical energy. The clarification and creation of an appropriate legal basis would also be necessary for the capture, utilisation and storage of carbon.

Einleitung

Die Zementindustrie liefert mit der Herstellung von Zement einen der wichtigsten Baustoffe für viele verschiedene Anwendungsbereiche. Die Prozesse zur Produktion von Zementklinker und Zementen machen sie gleichzeitig zu einer energie- und rohstoffintensiven Branche. Sie trägt weltweit 6 bis 7 % [RUPa] der anthropogenen CO₂-Emissionen bei. Die deutsche Zementindustrie verursachte im Jahr 2015 etwa 2,3 % der anthropogenen CO₂-Emissionen in Deutschland [VET, TGI]. Entsprechend den Zielen des Pariser Klimaschutzabkommens sind langfristige Strategien für eine zunehmend klimaneutrale Zementherstellung erforderlich. Gleichzeitig sollen im Sinne einer nachhaltigen Bauwirtschaft Möglichkeiten zur Steigerung der Ressourceneffizienz bei der Herstellung sowie im Bereich der Produktanwendung identifiziert und soweit wie möglich genutzt werden.

Maßnahmen zur Optimierung der Prozesse und des Materialeinsatzes werden heute bereits entlang der gesamten Wertschöpfungskette der Herstellung von Zement und Beton angewendet und weiter entwickelt. Sie leisten wichtige Beiträge zur Ressourcenschonung und zum Klimaschutz. Die eingesetzten Technologien und weitere Entwicklungen zur Steigerung der Energie- und Materialeffizienz beziehen sich hierbei auf den gesamten Lebenszyklus der Zementprodukte von der Rohstoffgewinnung über die Produktion und Weiterverarbeitung bis zur Gebäudenutzung und zum Recycling der Baustoffe nach Abriss. In der Zementindustrie kommt der hochwertigen Nutzung von Nebenprodukten benachbarter Industrien sowie der energetischen und stofflichen Nutzung von alternativen Einsatzstoffen schon seit langer Zeit eine besondere Bedeutung zu. Dies trägt im Sinne der Kreislaufwirtschaft zum effizienten Einsatz von Materialien und einem verminderten Bedarf an primären Einsatzstoffen und Energieträgern bei:

Im Jahr 2015 produzierten in Deutschland 22 Zementunternehmen etwa 31 Mio. t Zement. Für die Zementproduktion wurden etwa 23 Mio. t Zementklinker hergestellt [VDZ 16]. Hierfür wurden 48,6 Mio. t Rohstoffe eingesetzt, davon 7,8 Mio. t alternative Rohstoffe, wodurch mehr als 11 Mio. t Kalkstein eingespart werden konnte [VDZ 16]. Zur Klinkererzeugung wurden in Deutschland im Jahr 2015 etwa 4,4 Mio. t Brennstoffe eingesetzt, davon etwa 3,1 Mio. t alternative Brennstoffe aus Abfällen und Reststoffen [VDZ 16]. Der thermische Energiebedarf wird somit heute überwiegend durch alternative Brennstoffe wie aufbereitete Gewerbe- und Siedlungsabfälle, Altreifen, Altöl oder Klärschlamm gedeckt (64,6 % in 2015). Die Substitution fossiler Energieträger ist für die Verringerung der Treibhausgas-Emissionen in der Zementindustrie von entscheidender Bedeutung. Der Anteil fossiler Brennstoffe (vor allem Braun- und Steinkohle) ging kontinuierlich von 74,3 % im Jahr 2000 auf aktuell 35,4 % zurück.

Langfristig betrachtet, erfordern zusätzliche Beiträge zur Ressourcenschonung und zum Klimaschutz die Weiterentwicklung von Maßnahmen und Technologien und die Erschließung neuer Potentiale im Hinblick auf die Steigerung der Energie- und Materialeffizienz in der Zementindustrie. Wichtige Ziele stellen dabei die Verringerung des thermischen und elektrischen Energiebedarfs, der weitere Einsatz von alternativen Roh- und Brennstoffen sowie die Minderung von CO₂-Emissionen dar.

Hierzu wurde die vorliegende Studie im Rahmen des Forschungsvorhabens „Prozesskettenorientierte Ermittlung der Material- und Energieeffizienzpotentiale in der Zementindustrie“ erstellt. Die VDZ gGmbH hat in dieser Studie im Auftrag des Umweltbundesamtes (UBA) neu eingesetzte Technologien und Forschungsansätze in Hinblick auf Potentiale zur Steigerung von Material- und Energieeffizienz in der Zementindustrie in Deutschland ermittelt und bewertet. Die Studie gibt einen Überblick über bereits anwendbare oder ggf. zukünftig anwendbare Technologien zur Material- und Energieeffizienz in der Zementindustrie.

Folgende Technologiebereiche bezüglich der Steigerung der Material- und Energieeffizienz werden betrachtet:

- ▶ Minderung des thermischen und elektrischen Energiebedarfs
- ▶ Einsatz von alternativen Roh- und Brennstoffen in der Klinkererzeugung
- ▶ Einsatz alternativer Rohstoffe in der Zementmahlung und Zemente mit mehreren Hauptbestandteilen
- ▶ Einsatz neuer Bindemittel
- ▶ Materialeffizienz in den Bereichen Betonherstellung, -anwendung und -recycling
- ▶ Carbon Capture, CO₂ Storage und Utilization
- ▶ Forschungsansätze zur strombasierten Klinkererzeugung

Voraussetzungen und mögliche Hemmnisse in der Anwendbarkeit der Technologien sowie Synergien und Zielkonflikte mit weiteren rohstoff- und energieintensiven Industrien, werden zusammenfassend in Stichpunkten aufgezeigt. Zudem werden wesentliche Literaturquellen und Projektbeispiele zu einzelnen Technologien genannt. Besonders relevante Technologien werden in einzelnen Unterkapiteln hinsichtlich ihrer Möglichkeiten zur effizienten Energienutzung und zur Ressourcenschonung beschrieben.

Die deutsche Zementindustrie nutzt bereits heute eine Vielzahl von Materialien, die in anderen Branchen als Nebenprodukte hergestellt werden oder als Abfälle anfallen, als alternative Roh- oder Brennstoffe. Entsprechend dem Ziele zur weitergehenden Verbesserung der Ressourceneffizienz und zum Klimaschutz werden sowohl eine weitere Steigerung der Material- und Energieeffizienz in der Zementindustrie als auch die Grenzen der Anwendbarkeit von derzeit umgesetzten Maßnahmen anhand eines Modells für ein Referenzzementwerk in Deutschland ermittelt und diskutiert. Hierbei werden Zusammenhänge mit direkt angrenzenden Wirtschaftsbereichen (z.B. der Stahlindustrie) mit betrachtet. Aktuelle Forschungsansätze bezüglich der gesamten Zementherstellung und –anwendung werden auf Umsetzbarkeit und Auswirkungen auf die Ressourcenschonung untersucht.

Die technologischen Ansätze erfordern heute und zukünftig in allen Bereichen eine Weiterentwicklung. Zudem ist eine standort- und werksspezifische Bewertung erforderlich, um geeignete Technologien und Maßnahmen zu identifizieren.

Die Studie wurde auf Basis der praktischen Erfahrungen und Kenntnisse aus Projekten des VDZ zum Thema Material- und Energieeffizienzsteigerung erarbeitet. Zusätzlich hat der VDZ seine Kontakte zu nationalen und internationalen Unternehmen und Organisationen der Zementindustrie genutzt. Die vorliegende Studie des VDZ umfasst als Abschlussbericht des Projekts die Ergebnisse aus einem Workshop (Arbeitspaket 2) mit Experten der Zementindustrie und benachbarter Industrien und eines abschließenden Fachgesprächs (Arbeitspaket 4).

Die in diesem Forschungsvorhaben gewonnenen Erkenntnisse sollen in die Diskussion des Umweltbundesamtes und der Bundesregierung zu Möglichkeiten und Grenzen der Ressourcenschonung in der Zementindustrie und Bauwirtschaft in Deutschland einfließen.

Workshop

Der VDZ hat den Workshop im Rahmen des Forschungsvorhabens am 21.09.2017 mit Experten aus Industrie und Wissenschaft durchgeführt. Die Teilnehmer haben die Möglichkeiten zur Ressourcennutzung und einer weiteren Verbesserung der Energieeffizienz in der Zementindustrie in Deutschland diskutiert. Ziel war die Bewertung der Relevanz einzelner Technologien und Maßnahmen in Zusammenhang mit einer weiteren Energieeinsparung, Ressourcenschonung und CO₂-Minderung. Aus Sicht der Teilnehmer haben überwiegend alle Themenbereiche entlang der Prozesskette von Zement und Beton vor 2030 eine relevante Bedeutung, um die Ressourcen- und Energieeffizienz weiter steigern zu können (s. Anhang 1). Die industrielle Anwendung von Technologien zur Abscheidung und Weiterleitung bzw. Speicherung von CO₂ und die strombasierte Klinkerherstellung scheinen aufgrund der frühen Entwicklungsstadien erst nach 2030 an Relevanz gewinnen können. Wesentliche Voraussetzungen sind Gegenstand heutiger Forschungsarbeiten. Die Gespräche und abschließende Diskussion haben gezeigt, dass die Verschärfung von Gesetzen und die Wirtschaftlichkeit oft Grenzen hinsichtlich Umsetzung und Anwendbarkeit von Technologien zur weiteren Steigerung der Energieeffizienz und Schonung von natürlichen Ressourcen in der Klinker-, Zement- und Betonherstellung darstellen. Die Diskussionen in den Arbeitsgruppen haben ebenfalls gezeigt, dass Zementwerkbetreiber bei der Entwicklung und Umsetzung von neuen Technologien hohe Anforderungen aus der Umweltgesetzgebung erfüllen müssen.

Die Teilnehmer des Workshops haben daher eine aktive Begleitung und Unterstützung der Umweltpolitik bei der Projektenentwicklung und -umsetzung gefordert (Fördermöglichkeiten s. Anhang 2).

Eine weitere Steigerung der Material- und Energieeffizienz erfordert entlang der Prozesskette von Zement und Beton geeignete gesetzliche Rahmenbedingungen und eine Verbesserung von Investitionsanreizen. Eine Kooperation der wesentlichen Akteure ist aus Sicht der Teilnehmer wünschenswert und erforderlich bei der Entwicklung und Umsetzung von Technologien und Maßnahmen.

Fachgespräch

Die Ergebnisse des Forschungsvorhabens wurden am 7.12.2018 im VDZ in Düsseldorf vorgestellt und abschließend mit Experten aus der Industrie und interessierten Teilnehmern des Workshops diskutiert. Die Teilnehmer haben hierbei die Einschätzung und Modellierung der Material- und Energieeffizienzpotentiale in der Zementindustrie in Deutschland (Arbeitspaket 3, VDZ-Modell2018, Kapitel 10 und 11) bewertet. Hierbei wurden förderliche und hinderliche Aspekte festgehalten sowie mögliche Forschungsansätze in Hinblick auf Potentiale zur Steigerung von Material- und Energieeffizienz in den folgenden wesentlichen Technologiebereichen:

- ▶ Entwicklung der Zementarten nach Hauptbestandteilen, Zementportfolio
- ▶ Kontinuierliche Anlagenoptimierung und Steigerung der thermischen Energieeffizienz
- ▶ Elektrischer Energieeinsatz
- ▶ Einsatz alternativer Brennstoffe
- ▶ Effizienter Einsatz von Klinker im Zement, Klinker/Zement-Faktor, Perspektiven zum Einsatz von Hüttsand
- ▶ Alternativer Rohstoffeinsatz
- ▶ Optimierung und Umrüstung von Mühlen und Einsatz neuer Mahltechniken
- ▶ Langfristige Technology Roadmaps zur Treibhausgasneutralität
- ▶ CO₂-Abscheidung
- ▶ Entwicklung neuer Bindemittel

Als zusätzliche Technologiebeispiele (Kapitel 12) zur Materialeffizienz wurde die Praxis des Betonrecyclings, Möglichkeiten zur Herstellung von R-Zementen und die Entwicklung und Nachhaltigkeitsbewertung von Carbon-Beton diskutiert.

1 Thermische Energieeffizienz

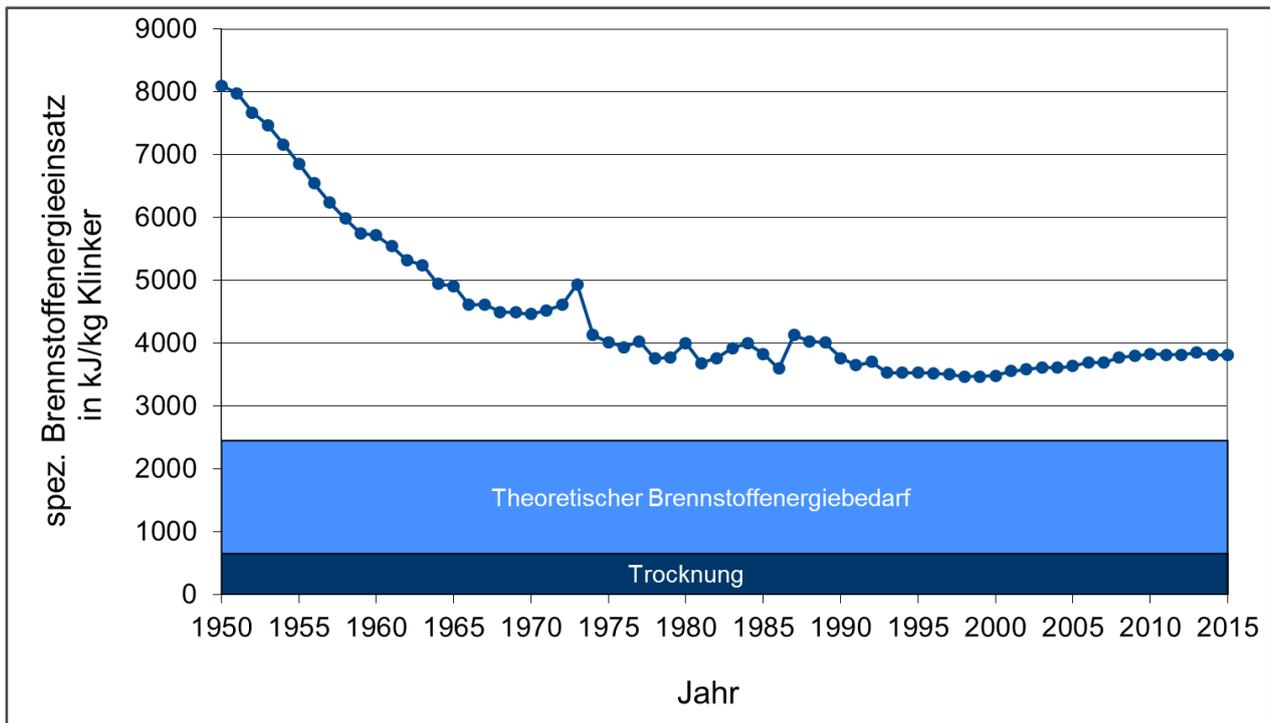
Thermische Energie wird beim Klinkerbrennprozess für die Vorwärmung des Rohmaterials im Gegenstrom zum Ofenabgas, die Entsäuerung des Kalksteins bei Temperaturen von 830 bis 950 °C (Kalzinierung), die weitere Aufwärmung des Brennguts auf Sintertemperatur sowie für die Bildung stabiler Zementklinkerphasen benötigt. Die Zementklinkerphasen entstehen bei Temperaturen von ca. 1.450 °C durch die chemische und mineralogische Umwandlung der verwendeten Rohstoffe. Die im Klinkerbrennprozess anfallende Abwärme wird überwiegend für die Vorwärmung und Trocknung der Rohmaterialien oder Brennstoffe, wie Kohle, Petrolkoks oder von Zementbestandteilen wie granulierten Hochofenschlacke (Hüttensand) eingesetzt (Wärmenutzung).

Der thermische Energiebedarf (z.B. in MJ/t) ist die übliche Kenngröße für die Beurteilung des Aufwands an Brennstoffenergie bei der Zementherstellung. Der weit überwiegende Teil des thermischen Energiebedarfs entfällt auf den Klinkerbrennprozess; geringere Anteile auf Trocknungsprozesse z.B. in Mahlwerken, in denen keine Ofenabwärme zur Verfügung steht. Die thermische Energieeffizienz (in der Regel in %) eines Zementwerks beschreibt dagegen die (z.B. für die chemischen Reaktionen) genutzte Energie bezogen auf den mit den Brennstoffen zugeführtem Energiestrom. Energiebedarf und Energieeffizienz stehen damit zwar in einem Verhältnis zu einander; ein direkter Zusammenhang besteht jedoch nicht. So kann der Einsatz alternativer Brennstoffe oder das Brennen eines höherwertigen Klinkers den thermischen Energiebedarf zwar erhöhen. Die thermische Energieeffizienz der Anlage kann dabei aber unverändert bleiben. Dies bedeutet, dass ein steigender Energiebedarf nicht automatisch zu einer Verminderung der Energieeffizienz führt.

Ausgehend von den Umweltdaten des VDZ aus den Jahren 1950 bis 2015 beträgt der thermische Energiebedarf für die Zementklinkerproduktion in Deutschland im Durchschnitt etwa 3.800 MJ/t Klinker bzw. 3.000 MJ/t Zement (s. Abbildung 1) [VDZ16a]. Der thermische Energiebedarf enthält hierbei die benötigte thermische Energie für die chemischen und mineralogischen Umwandlungen im Brennprozess sowie die Trocknungsenergie für die Roh- und Brennstoffe.

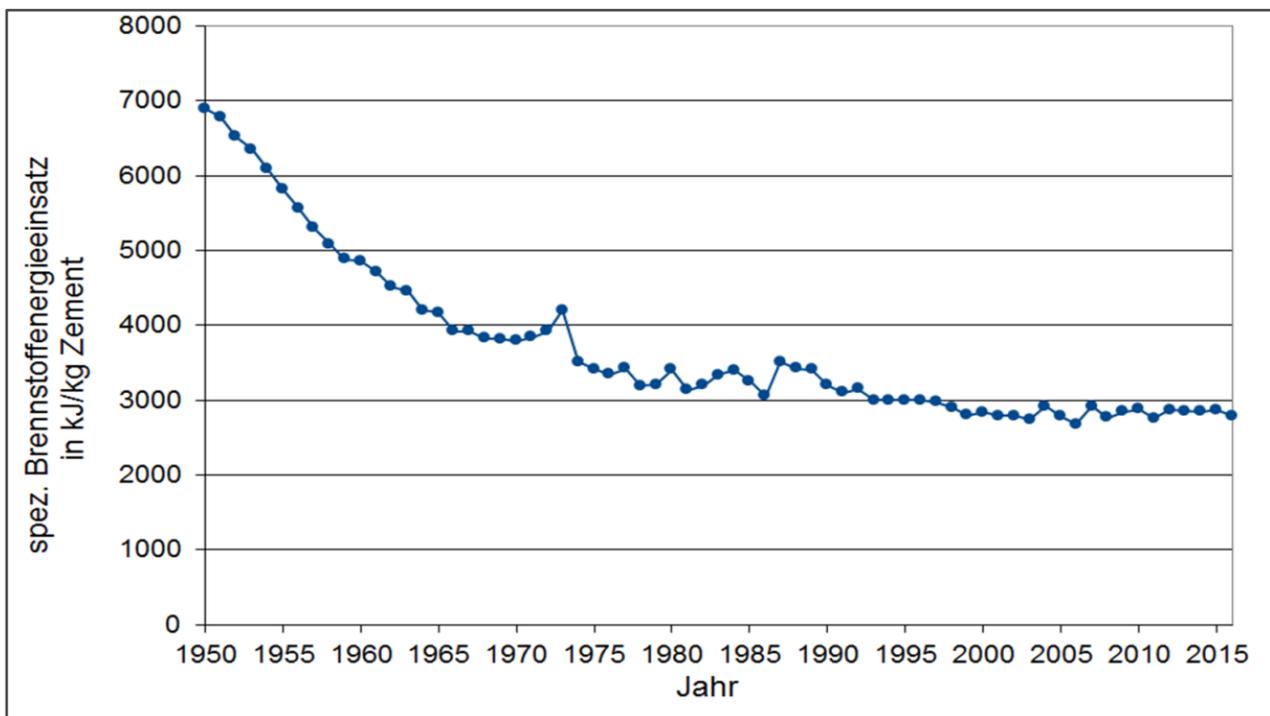
Der thermische Energiebedarf wird beeinflusst von Anlagentyp, Zustand der Anlage, Betriebsweise der Anlage, Ofenkapazität, der Zusammensetzung, Feuchte und Brennbarkeit des Rohmaterials sowie von den Eigenschaften der eingesetzten Brennstoffe und deren Anteile am Energieeintrag. Aus diesem Grund variiert der spezifische Energiebedarf von Zementwerk zu Zementwerk.

Abbildung 1: Thermischer Energiebedarf der Zementwerke in Deutschland in kJ/kg Klinker



Quelle: VDZ, eigene Darstellung, [VDZ16a]

Abbildung 2: Thermischer Energiebedarf der Zementwerke in Deutschland in kJ/kg Zement



Quelle: VDZ, eigene Darstellung, [VDZ16a]

Die European Cement Research Academy (ECRA) hat im Zeitraum 2016/2017 die sogenannten CSI/ECRA Technology Papers aus dem Jahr 2009 überarbeitet [ECRA]. Die Technology Papers sind eine umfassende Darstellung aller relevanten Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz (thermisch

und elektrisch) und zur Minderung der CO₂-Emissionen der Zementherstellung, bis hin zu Carbon Capture-Technologien und zur Herstellung neuer Bindemittel.

Sie haben einen globalen Bezug und dienen als Input für die von der International Energy Agency (IEA) veröffentlichten „Cement Technology Roadmap“ [IEA]. In den Technology Papers sind u.a. folgende Technologien beschrieben und bewertet, die zur Steigerung der thermischen Energieeffizienz in mittel- und langfristiger Zukunft beitragen können:

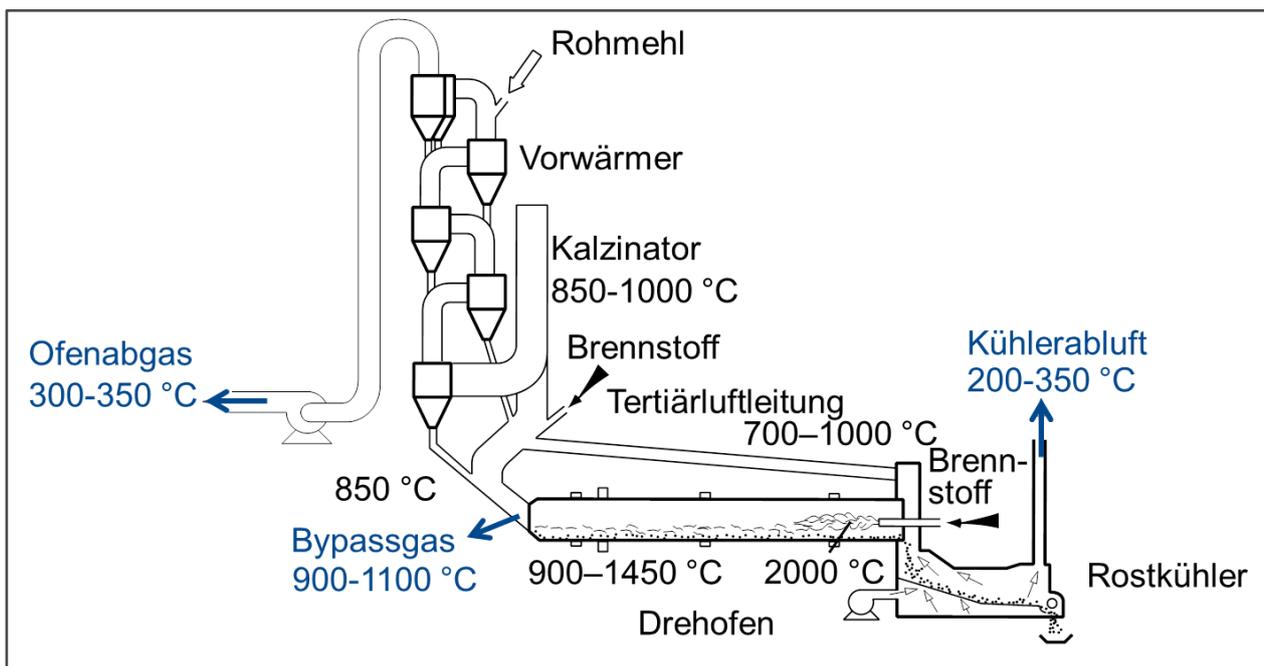
1. Klinkerbrennprozess
 - ▶ Modernisierung der Öfen
 - ▶ Effiziente Brenner
 - ▶ Optimierung der Vorwärmer (z.B. Zubau von einer zusätzlichen Zyklonstufe)
 - ▶ Optimierung der Klinkerkühler

2. Wärmenutzung
 - ▶ Wärmenutzung zur Rohmaterial- und Brennstofftrocknung
 - ▶ Stromerzeugung mittels Wasser-Dampfkraftprozess, Organic-Rankine-Cycle-Verfahren (ORC), Kalina-Verfahren

Die in den Technology Papers ebenfalls beschriebenen Maßnahmen bezüglich des umfassenden Austausches von Öfen mit älteren Technologien gegen Öfen mit neuer Technologie (Vorkalziniertechnik) sind auf Grund der sehr hohen Investition und der langen Investitionszyklen in Deutschland praktisch nicht relevant.

Der Einsatz effizienter Wärmetauscher führt zu einer weitgehenden Ausnutzung der eingesetzten thermischen Energie für die Reaktionsprozesse und Trocknung der Einsatzstoffe. Ungenutzte Wärme auf nutzbarem Temperaturniveau steht in deutschen Zementwerken nur eingeschränkt zur Verfügung. Unter spezifischen Voraussetzungen kann Abwärme aus heißem Ofenabgas, Kühlerabluft und Bypassgas für eine Nutzung zur Verfügung stehen. Das Ofenabgas wird nach dem Vorwärmer abgezogen. Seine Temperatur liegt in der Regel bei 300 bis 350 °C. Der Abzug der Kühlerabluft erfolgt im hinteren Teil des Kühlers. Die Temperatur der Kühlerabluft beträgt etwa 200 bis 350 °C. Bypassgas hat eine Temperatur von etwa 900 bis 1.100 °C und wird im unteren Teil des Gassteigschachts, direkt oberhalb des Ofeneinlaufgehäuses, abgezogen. Typische Temperaturniveaus sind in Abbildung 3 schematisch dargestellt.

Abbildung 3: Temperaturniveaus im Klinkerbrennprozess am Beispiel eines Drehrohrofens mit Kalzinator und Tertiärluftleitung



Quelle: VDZ, eigene Darstellung, [VDZ08]

Neben der Trocknung von Roh- und Brennstoffen kann in Abhängigkeit der begrenzten Verfügbarkeit und des Temperaturniveaus Abwärme zur Stromerzeugung und zur direkten Wärmebereitstellung, z.B. für Gebäudeheizungen genutzt werden. Abwärme kann u.U. in ein bestehendes Nah- bzw. Fernwärmenetz am Standort des Werks eingespeist werden.

Mit erzeugtem Strom aus überschüssiger Abwärme kann teilweise der Eigenbedarf des Zementwerks gedeckt werden. Eine weitere Nutzung ausgekoppelter Abwärme ist gegebenenfalls für die Aufheizung der Abgase für den Betrieb einer Tail-End-SCR-Anlage zur selektiven katalytischen Reduktion (SCR) der NO_x -Emissionen möglich.

Eine weitere wichtige Maßnahme zur Minderung des Energiebedarfs der Zementherstellung (d.h. auf die Tonne Zement bezogen) besteht in der Herstellung von Zementen mit geringerem Gehalt an gebranntem Klinker. Dabei wird die für das Brennen des substituierten Klinkers aufgewendete thermische Energie praktisch vollständig eingespart (s. Kapitel 5).

Möglichkeiten zur effizienten Wärmenutzung

Prozessintegrierte Wärmenutzung:

- ▶ Steigerung der Energieeffizienz durch Wärmenutzung aus dem Prozess (z.B. effizienter Kühler bzw. Vorwärmer)
- ▶ Einsatz höherwertiger (z.B. vorgetrockneter) alternativer Brennstoffe
- ▶ Trocknung mit Prozessgasen für Hüttensand, Fluff, Klärschlamm
- ▶ Nutzung von Abwärme für weitere Trocknungsprozesse (Trocknung von Rohmaterial, Kohle, Hüttensand, alternativen Brennstoffen)
- ▶ Vor-Ort-Trocknung effizienter als dezentrale Nutzung vorhandener Wärmequellen

Hydrothermale Karbonisierung (Hydrothermale Karbonisierung (HTC)):

- ▶ Trocknung von Klärschlamm mit geringerem thermischen und elektrischen Energieaufwand nach HTC

- ▶ Zementwerke als Alternative zu Klärschlamm-Monoverbrennung

Externe Wärmenutzung - Nah- und Fernwärme, Stromerzeugung:

- ▶ Nutzung von Abwärme zur Wärmebereitstellung für thermische Prozesse (z.B. Heizung, Warmwassererzeugung)
- ▶ Auskopplung von höherwertiger Wärme aus Wärmetauschergasen oder Kühlermittelluft
- ▶ Prozesswärme für andere (benachbarte) Betriebe
- ▶ Nutzung von Abwärme zur Stromerzeugung (Verminderte Abhängigkeit von externer Energieversorgung, Reduzierung der Energiekosten)
- ▶ Nutzung der Wärme aus Kühlerabluft, von Ofenabgasen, aus Bypass-Abgasen für die Verstromung

Möglichkeiten zur Ressourcenschonung

- ▶ Nutzung der mineralischen Bestandteile der Einsatzstoffe zur Klinkerproduktion

Voraussetzungen, unterstützende Faktoren und mögliche Hemmnisse für die Anwendbarkeit der Technologien

Voraussetzungen:

- ▶ Langfristige und standortnahe Verfügbarkeit der Einsatzstoffe
- ▶ Wirtschaftlichkeit von Investitionen
- ▶ Strompreise und steuerliche Bewertung der Stromerzeugung aus Abwärme
- ▶ Überschüssige verfügbare Wärmemengen auf direkt nutzbarem Temperaturniveau
- ▶ Stromerzeugung aus Abwärme: Verfügbare Wärmemengen auf ausreichendem Temperaturniveau
- ▶ Externe Abgabe von Wärme: Industrielle Abnehmer bzw. die Existenz standortnaher Nah- bzw. Fernwärmenetze
- ▶ Rechtliche Vorgaben wie Umweltrecht, Bau- und Betriebsgenehmigungen, etc.
- ▶ Nah- und Fernwärme: Geeigneter Standort hinsichtlich nötiger Infrastruktur
- ▶ Nah- und Fernwärme: Konkurrenzfähigkeit der Abwärmeverstromung gegenüber den Kosten für elektrische Energie, Materialanforderungen an Wärmeübertrager zur Stromerzeugung
- ▶ Externe Trocknung und Aufbereitung von Brenn- und Rohstoffen: Wärmeüberangebot von Ofenanlage erforderlich; Energieerhöhung/-aufwertung, -niveau, -konstanz

Mögliche Hemmnisse

- ▶ Erhöhung Ofenkapazität: Hohe Investitionskosten, Marktpotential
- ▶ Zusätzliche Zyklonstufe für Vorwärmer: Statik des Vorwärmerturms, Investitionskosten
- ▶ Kühlertechnologie: Investitionskosten
- ▶ Stromerzeugung aus Abwärme: Hohe Investitionskosten für Abhitzekeessel, Turbine und Stromgenerator, mangelnde Wirtschaftlichkeit
- ▶ Kalina-Prozess (Stromerzeugung): Keine praktische Erfahrung mit der Umsetzung des Verfahrens in Deutschland; derzeit keine Anwendung in der deutschen Zementindustrie
- ▶ Externe Wärmenutzung: Transfer-, Anschlusskosten, zeitliche Verfügbarkeit
- ▶ Interne Wärmenutzung: Technologie steht im Wettbewerb mit der optimalen Energienutzung für Vorwärmung und Trocknung im Prozess, z.B. Zubau einer zusätzlichen Zyklonstufe, Vortrocknung von Einsatzstoffen
- ▶ Stromerzeugung, Nah- und Fernwärme: Hohe Kosten und Betriebskosten bei aktuellen Energiepreisen

- ▶ Stromerzeugung, Nah- und Fernwärme: hohe Investitionskosten, Wirtschaftlichkeit ohne Förderung nicht gegeben, sodass eine Förderung aus der Politik erforderlich ist; mögliches Hemmnis durch Energiepolitik EEG-Umlage
- ▶ Stromerzeugung, Nah- und Fernwärme: Return on Investment (ROI)
- ▶ Externe Trocknung und Aufbereitung von Brenn- und Rohstoffen: Wie erfolgt die Abluft-Behandlung/Aufbereitung bzgl. der Emissionen? ROI: 1, 5, 10 Jahre?

Synergien und Zielkonflikte mit weiteren rohstoff- und energieintensiven Industrien

- ▶ Zielkonflikt: Nutzung von Wärmeüberangebot für externe Trocknung
- ▶ Zielkonflikt: Thermische Energieeffizienz der Ofenanlage
- ▶ Zielkonflikt: Externe Trocknung und Aufbereitung: Nutzung von Wärmeüberschuss für Stromerzeugung: Wärme kann nur einmal genutzt werden
- ▶ Synergie: Externe Trocknung und Aufbereitung: Ansiedlung von Aufbereitern alternativer Brennstoffe im oder am Zementwerk
- ▶ Zielkonflikt: Externe Trocknung und Aufbereitung: Geruchsemission oder Rückführung des Abgases
- ▶ Erhöhung der Rate von alternativen Brennstoffen
- ▶ Wirtschaftliche Nachteile: geringe Einsatzmenge an alternativen Brennstoffen mit Zusatzlager
- ▶ Zielkonflikt: Wettbewerb um aufbereitete Industrie- und Gewerbeabfälle mit Ersatzbrennstoff-Kraftwerken (EBS-Kraftwerken)

Projektbeispiele in Deutschland

- ▶ Abwärmenutzung für eine Trocknungsanlage für Klärschlamm, Zementwerk Karlstadt der SCHWENK Zement KG: In Deutschland erfolgt im Zementwerk in Karlstadt seit 2006 eine solche Trocknung in einem der größten einstufigen Bandtrockner weltweit (jährliche Durchsatzrate ca. 100.000 t, Wasserverdampfung 8 t/h). Durch die Nutzung der Abwärme ist zur Trocknung kein zusätzlicher Brennstoffeinsatz erforderlich. [TRE]
- ▶ Stromerzeugung mittels Wasser-Dampfkraftprozess, Südbayrisches Portland-Zementwerk Gebr. Wiesböck & Co. GmbH in Rohrdorf: In Deutschland wird im Zementwerk in Rohrdorf Strom mittels Wasser-Dampfkreislauf erzeugt. Seit 2012 wird dort ungenutzte Abwärme aus dem Klinkerbrennprozess für die Eigenverstromung des Zementwerks verwendet. Das Zementwerk nutzt dazu das Ofenabgas nach dem Wärmetauscherturm und nach der Entstaubung und Entstickung sowie die Mittenluft des Klinkerkühlers. Die hochkomplexe Anlage zur Stromerzeugung wurde in die bestehende Infrastruktur der Anlage integriert. Mit diesem Vorhaben reduziert das Zementwerk seinen Strombedarf aus dem Netz um 28 % und vermeidet somit jährlich etwa 24.800 t CO₂ -Emissionen [LEI].
- ▶ Stromerzeugung mittels ORC-Verfahren, Zementwerk Lengfurt der HeidelbergCement AG: Die erste ORC-Anlage mit Nutzung der Wärme aus der Klinkerkühlerabluft wurde in Deutschland im Zementwerk Lengfurt der HeidelbergCement AG im Jahr 1999 gebaut [LEN].
- ▶ Nutzung für Nah- und Fernwärme, Beheizung eines Schwimmbades, Zementwerk Karlstadt der SCHWENK Zement KG: Das Zementwerk in Karlstadt beheizt mit anfallender Abwärme ein benachbartes kommunales Schwimmbad.
- ▶ Betrieb von zwei SCR-Anlagen mittels Abwärme
- ▶ Umbau von sechs Satellitenkühlern zu Rostkühlern
- ▶ Waste Heat Recovery in der Schweiz: Holcim Untervaz und Jura Wildeg
- ▶ Mahltrocknung von Brennstoffen
- ▶ Projektbeispiel im Ausland: Flufftrockner: Chelm, Nowiny

- ▶ Projektbeispiel im Ausland: ATEC-Rocketmill: Mahlung/Trocknung EBS/Fluff, A.S.A Wiener Neustadt

Einschätzung der Realisierbarkeit von Technologien bzw. Maßnahmen in Deutschland gemäß der Ergebnisse aus dem Workshop

- ▶ Externe Trocknung und Aufbereitung von Brenn- und Rohstoffen: vor 2030
- ▶ Stromerzeugung, Fern- und Nahwärmenutzung: vor 2030
- ▶ Steigerung der Einsatzrate alternativer Brennstoffe auf 100 %: vor 2030
- ▶ Neue Stoffströme: nicht konkretisiert
- ▶ Klärschlamm Potential, HTC: vor 2030

Förderliche Aspekte:

- ▶ Technologieentwicklung bis zur Marktreife
- ▶ Investitionsanreize, z.B. BMWi-Förderprogramme zu Energie und Abwärme mit Investitionsförderung, Investitionszuschuss der KfW
- ▶ Förderberatung des Bundes (Hinweis Bernicke: Adresse zur Ergänzung in Anhang 2) und Förderdatenbank, siehe Anhang 2
- ▶ Hochtemperatur Filtration ermöglicht höhere Effizienz bei Abwärmenutzung (Waste-Heat-Recovery)

Hinderliche Aspekte:

- ▶ Unpassende wirtschaftliche Rahmenbedingungen
- ▶ Wettbewerb der Baustoffe macht die Umlage zusätzliche Kosten und Investitionen schwierig
- ▶ Investitionszeiträume liegen deutlich über 10 Jahre
- ▶ Beihilferecht
- ▶ Rahmenbedingungen in Europa und international z.T. sehr ungleich
- ▶ Langfristige Investitionssicherheit fehlt z.B. sehr unsichere Entwicklung des CO₂-Preises
- ▶ Tatsächliche ökonomische Benachteiligung der Abwärmenutzung zur Erzeugung elektrischer Energie, insbesondere :
 1. EEG-Umlage für selbst erzeugten Strom
 2. Gefahr des Verlusts der EEG-Entlastung wegen sinkendem externem Strombezug
 3. Wärme-Kraft-Kopplung passt nicht ins Kraft-Wärme-Kopplungs-Gesetz (KWK-Gesetz)

Forschungsansätze:

- ▶ Vollständige Betrachtung der CO₂-Bilanzen
- ▶ Betrachtung aller Dimensionen der Nachhaltigkeit, d.h. auch ökonomische und soziale Aspekte

Anmerkungen:

- ▶ In Österreich existieren viele geeignete Förderansätze, insbesondere
 1. Nutzung von EU-Mitteln, z.B. 30 % Investitionsförderung
 2. Einfacherere Förderlandschaft zur Innovationsförderung
- ▶ In Deutschland werden neue Förderprogramme ab Januar 2019 aufgelegt

1.1 Moderne Anlagentechnik

1.1.1 Moderne Öfen bzw. Brenner in der Zementindustrie

Grundsätzlich zu unterscheiden sind Drehrohröfen mit Rostvorwärmern und Drehrohröfen mit Zyklonvorwärmern, die in Hinblick auf die Nutzung der eingesetzten Energie effizienter sind. 1966 wurde die sogenannte Vorkalziniertechnik eingeführt, die die Verfahrensweise der Klinkerherstellung maßgeblich veränderte. Bei der Vorkalziniertechnik ist der Kalzinator zwischen dem Zyklonvorwärmer und dem Drehofen angeordnet, in dem Ofengas und Brenngut im Gleichstrom geführt werden, sich vermischen und intensiv miteinander reagieren. Das Ofengas kühlt sich schlagartig auf die Entsäuerungstemperatur von 830 °C ab [VDZ08]. Der Vorentsäuerungsgrad erhöht sich auf 90 %, wodurch der Drehofen kleiner ausgelegt werden kann, verglichen mit herkömmlichen Drehofenanlagen.

Durch die Erhöhung des Vorentsäuerungsgrades kann der Drehofen bei gleicher Dimension mit höherer Leistung betrieben werden [VDZ08]. Aufgrund der Entsäuerungstemperatur können im Kalzinator heizwertarme, ballaststoffreiche Brennstoffe (z.B. alternative Brennstoffe) aufgegeben werden. Heute werden in Deutschland neue Zementwerke mit Öfen mit Zyklonvorwärmer und Vorkalziniertechnik gebaut, da diese derzeit die höchste Energieeffizienz erzielen (Anzahl und Kapazität der Öfen s. Tabelle 1). Eine Umrüstung von Öfen mit Rostvorwärmer auf Öfen mit Zyklonvorwärmer ist mit sehr hohen Investitionen verbunden und oft nicht wirtschaftlich durchführbar [VDZ08]. In Deutschland werden etwa 1/3 der Öfen mit Kalzinator betrieben. Der Energiebedarf der Drehofenanlagen hängt von der lokal gegebenen Feuchte des Rohmaterials (s. hierzu Kapitel 1.1.3 Vorwärmer), der Produktionskapazität der Anlage, der Zusammensetzung des Rohmaterials und der angestrebten Klinkerqualität, den Eigenschaften der Brennstoffe (insbesondere Heizwert und Feuchtegehalt) und deren Anteile am Energieeintrag sowie auch vom Einsatz eines Bypasses zur Unterstützung eines störungsfreien Anlagenbetriebs ab [KLE].

Tabelle 1: Anzahl und Kapazität der Öfen mit Betriebsgenehmigung in Deutschland (Stand 2016) [VDZ16a]

Beschreibung	Anzahl	Kapazität t/d	Kapazität %
Ofen mit Zyklonvorwärmer	39	100.760	93,8
Ofen mit Rostvorwärmer	6	5.500	5,1
Schachtofen	8	1.200	1,1
Summe	53	107.460	100

Moderne Brenner in deutschen Zementwerken sind als Mehrkanalbrenner konzipiert, die den Einsatz unterschiedlicher Brennstoffe ermöglichen. Während ein großer Teil der Verbrennungsluft in der Drehofenfeuerung aus sogenannter Sekundärluft besteht, die im Klinkerkühler vorgewärmt wird, erfordert der Brennerbetrieb die sog. Primärluft, die aus Transportluftströmen für die Brennstoffe sowie Luftströmen zur Flammgestaltung besteht. Letztere können aus technischen Gründen nicht vorgewärmt werden, da sie auch der Kühlung und damit dem Schutz des Brenners vor Überhitzung dienen.

Eine Verminderung des Primärluftstroms bedeutet, dass mehr vorgewärmte Sekundärluft verwendet und so in geringem Maße thermische Energie eingespart werden kann. Sehr niedrige Primärluftmengen wurden Ende der 90-er Jahre eingeführt, da dies zur Minderung der NO_x-Entstehung im Drehofen führt. Der heute übliche hohe Einsatz alternativer Brennstoffe erfordert dagegen höhere Brennerimpulse und damit höhere Primärluftmengen. Die Einführung sekundärer NO_x-Minderungsverfahren in

der Industrie ermöglicht heute die Installation von Brennern, die ausreichend hohe Impulse für eine optimierte Verbrennung aufweisen.

1.1.2 Erhöhung der Ofenkapazität

Der spezifische thermische Energiebedarf der Drehöfen hängt unter anderem wesentlich von der Ofenkapazität ab. Da die Wärmeverluste der Öfen mit steigender Ofenleistung - bezogen auf die Tonne Klinker - abnehmen, ermöglichen große Öfen einen geringeren spezifischen Energiebedarf als kleinere Öfen. Drehöfen mit hoher Leistung verfügen - bezogen auf die Tonne Klinker - über geringere spezifische Oberflächen und entsprechend geringere Wandwärmeverluste [ROH]. Die mittlere Ofenkapazität in Deutschland betrug im Jahre 2015 2.361 t/d (Stand 01.01.2016) [VDZ16a]. Die größten Ofenanlagen in Deutschland verfügen über eine Ofenleistung von bis zu 6.000 t/d. Sie wurden im Wesentlichen in den 90-er Jahren gebaut, als vor allem in den neuen Bundesländern bestehende Kapazitäten mehrerer kleiner Öfen durch einzelne große Öfen ersetzt wurden.

Zum einen begrenzen die mit dem Ofenneubau verbundenen sehr hohen Investitionskosten das Potential die Ofenkapazität in Deutschland zukünftig weiter zu erhöhen. Zum anderen ist das Ersetzen mehrerer kleinerer Öfen durch einzelne große Öfen ein limitierender Faktor. Die Zementwerke verfügen heute überwiegend nur noch über einen Ofen, sodass das Potential, kleinere Kapazitäten zusammenzulegen, größtenteils ausgeschöpft ist.

1.1.3 Vorwärmer

Die deutschen Zementwerke mit Öfen mit Zyklonvorwärmern verfügen über drei bis sechs Zyklonstufen. Die Anzahl der Zyklonstufen ist entscheidend für die Abgastemperatur und wird maßgeblich durch die Feuchte der Rohmaterialien im Steinbruch, und dem damit verbundenem Wärmebedarf in der Rohmühle, in der das Rohmaterial getrocknet wird, bedingt.

Mit steigender Anzahl der Zyklonstufen sinkt die Rohgastemperatur im Vorwärmer. Es gelten folgende Anhaltswerte für die Wärmetauscher (WT) [KLE]:

- ▶ 3 Stufen: > 12 Masse-% Feuchte, Rohgastemperatur nach WT > 500 °C
- ▶ 4 Stufen: 8 bis 12 Masse-% Feuchte, Rohgastemperatur nach WT ca. 350 °C
- ▶ 5 Stufen: 6 bis 8 Masse-% Feuchte, Rohgastemperatur nach WT ca. 310 °C
- ▶ 6 Stufen: < 6 Masse-% Feuchte, Rohgastemperatur nach WT ca. 280 °C

Die Feuchte des Rohmaterials bestimmt demnach die geeignete Stufenanzahl des Zyklonvorwärmers. Beispielsweise wäre der Einbau einer sechsten Zyklonstufe wärmetechnisch kontraproduktiv, wenn die Rohmaterialfeuchte mehr als 6 % beträgt [KLE]. Der Wärmegehalt des Abgases reicht dann i.d.R. nicht mehr für die Trocknung der Materialien in der Rohmühle aus.

Die Abgastemperatur vieler Ofenanlagen ist in den vergangenen Jahren u.a. auch infolge des erhöhten Einsatzes alternativer Brennstoffe angestiegen. Unter Umständen können diese Abwärmeverluste durch den Einbau einer zusätzlichen Zyklonstufe verringert werden. Ein wesentlicher limitierender Faktor hierfür ist meist die Statik des bestehenden Vorwärmergebäudes. Weiterhin steigt der Druckverlust des Vorwärmers mit der Anzahl der installierten Zyklonstufen an. Hierdurch steigt der elektrische Energiebedarf des Abgasgebläses. Dem kann durch die Verwendung von strömungsoptimierten Zyklonen entgegengewirkt werden, da diese einen geringeren Druckverlust als herkömmliche Zykclone aufweisen. Je niedriger der Druckverlust ist, desto geringer ist der Bedarf an elektrischer Energie [ECRA].

1.1.4 Klinkerkühler

In den deutschen Zementwerken sind überwiegend Rostkühler installiert. Rostkühler erfordern mehr Kühlluft als z.B. Satellitenkühler oder Rohrkühler und bewirken so eine bessere Kühlung des Klinkers. Satelliten- und Rohrkühler können nur so viel Kühlluft verwenden, wie zur Verbrennung im Drehofen

erforderlich ist. Die Vorwärmung der Verbrennungsluft ist mit modernen Rostkühlern deutlich effizienter als bei den anderen Kühlertypen.

In den vergangenen Jahren haben Weiterentwicklungen vor allem der Hersteller von Klinkerkühlern dazu geführt, dass die Rekuperation der Wärme im Kühler wesentlich effizienter geworden ist. In Deutschland wurden von insgesamt acht Satellitenkühler sechs zu Rostkühlern umgebaut. Moderne Rostkühler verfügen über Kühlerwirkungsgrade von über 75 % [ECRA]. Die höhere Kühlluftmenge bei Rostkühlern führt dazu, dass ein Teil der Kühlluft als Kühlerabluft anfällt. Diese kann für Trocknungszwecke oder auch für andere Arten der Wärmenutzung verwendet werden.

1.1.5 Wirbelschichttechnologie

In den 1990- und 2000-er Jahren wurden in Japan Versuche durchgeführt, einen Wirbelschichtofen zum Brennen von Zementklinker zu entwickeln. Ein wesentliches Ziel dabei war, die NO_x - und CO_2 -Emissionen sowie den thermischen Energiebedarf der Klinkerherstellung im Vergleich zu Drehöfen mit Zyklonvorwärmern zu reduzieren. Die Ofenkapazität der Pilotanlagen betrug lediglich 200 und 1000 t Kli/d [IND, WAT]. Aus technischen Gründen wurden diese Untersuchungen jedoch wieder eingestellt. Eine Untersuchung in Pilotanlagen mit einer Ofenkapazität von etwa 3000 t Kli/d für eine mögliche Anwendung der Wirbelschichttechnologie in der Zementindustrie wurde bislang weltweit nicht durchgeführt. Weltweit sind keine Anlagen mit dieser Technologie in Betrieb [ROH].

1.2 Wärmenutzung

Im Klinkerbrennprozess besteht aufgrund der erforderlichen hohen Temperatur (1450 °C) und seiner Energieintensität seit jeher das Bestreben die eingesetzte Energie und dadurch erzeugte Wärme möglichst effizient zu nutzen. Dies erfolgt prozessintern bei der Trocknung und Vorwärmung der Rohstoffe und Brennstoffe für die Klinkerproduktion. Die hierfür benötigte Wärmemenge ist insbesondere vom Feuchtegehalt des Kalksteins und somit standortbedingt vom genutzten geologischen Kalksteinvorkommen abhängig. In einigen Fällen wird Wärme aus dem Prozess erneut bei der Abgasreinigung eingesetzt, z.B. bei der katalytischen NO_x -Reduktion mit SCR. Weiterhin wird Wärme zur Vortrocknung von Brennstoffen und Trocknung von Einsatzstoffen für die Zementproduktion direkt am Standort genutzt. Eine anderweitige Nutzungen kommt dann in Frage, wenn über diese Nutzungen mit besonders hohem energetischen Wirkungsgrad hinaus weitere Wärmemengen aus dem Klinkerbrennprozess gewonnen werden können und diese zusätzliche Abwärme noch ausreichend effizient und ökonomisch sinnvoll genutzt werden kann (Waste heat recovery, WHR). Neben der direkten Wärmenutzung zu Heizzwecken in nahegelegenen Gebäuden ist unter bestimmten Voraussetzungen eine Stromerzeugung möglich. Die hierbei erreichten energetischen Wirkungsgrade liegen deutlich unter denen der zuvor beschriebenen Trocknungsprozesse und denen von modernen Dampfkraftwerken. Sie sind insbesondere vom Temperaturniveau und der verfügbaren Wärmemenge abhängig.

1.2.1 Prozessinterne Wärmenutzung

Aufgrund des Gegenstromprinzips des Klinkerbrennprozesses wird Abwärme aus dem Drehofen und ggf. dem Kalzinator direkt zur Trocknung und Vorkalziniierung des Rohmehls genutzt. Der gebrannte Klinker fällt mit einer Temperatur zwischen 1200 und 1400 °C in den Klinkerkühler, in dem die Wärme des Klinkers zur Vorwärmung der Verbrennungsluft genutzt wird. Die heißen Ofenabgase verlassen den Drehofen mit einer Temperatur zwischen 950 und 1100 °C bzw. den Kalzinator mit einer Temperatur von 850 bis 900 °C. Diese Wärme wird im Vorwärmer für die Vorwärmung des Rohmaterials bzw. Brennguts auf eine Temperatur von ca. 830 °C genutzt. Da beim Trockenverfahren das Rohmaterial vorgetrocknet dem Vorwärmer aufgegeben wird, hat das Vorwärmerabgas (Rohgas) eine höhere Temperatur, als beim Halbtrockenverfahren, bei dem das Rohmaterial mithilfe von Wasser granuliert dem Rostvorwärmer aufgegeben wird. Eine weitere Art der prozessinternen Wärmenutzung

tritt auf, wenn (meist alternative) Brennstoffe ohne Vortrocknung dem Brennprozess aufgegeben werden. In diesem Fall wird die mit der Sekundärluft bzw. Tertiärluft (dem Kalzinator) zugeführte Wärmeenthalpie zur Trocknung der in den Brennstoffen enthaltenen Feuchte genutzt.

1.2.2 Trocknung von Rohmaterial

Zur Trocknung des Rohmaterials kommen Mahltrocknungsanlagen zum Einsatz, in denen die Energie der heißen Ofenabgase genutzt wird. Abhängig von der Rohmaterialfeuchte werden bis zu 100 % der Wärme des Ofenabgases genutzt. Fällt mehr Wärme an, als in der Rohmühle benötigt wird, kann diese entweder anderweitig genutzt werden oder das Ofenabgas wird in einem Verdampfungskühler entsprechend konditioniert.

Im sogenannten Verbundbetrieb wird das heiße Rohgas durch die Rohmühle geleitet, in der das Rohmaterial getrocknet wird. Der Verdampfungskühler ist bei diesem Betriebszustand außer Funktion. Der spezifische Durchsatz der Rohmühle und des Drehofens bestimmen den Betriebsstundenanteil des Verbund- bzw. Direktbetriebs.

Beim Direktbetrieb wird das Rohgas direkt in den Filter geleitet, ohne vorher die Rohmühle zu passieren. Das Rohgas wird in den Verdampfungskühler geleitet, dort gekühlt und konditioniert, bevor es der Entstaubungsanlage zugeführt wird.

Die Feuchte des Rohmaterials wird grundsätzlich bei der Auslegung des Vorwärmers (Zahl der Zyklonstufen) berücksichtigt. Je trockener das Rohmaterial ist, desto weniger Wärme wird für dessen Trocknung benötigt und der Vorwärmer wird mit einer höheren Zahl an Zyklonstufen ausgelegt (s. Kapitel 1.1.3).

1.2.3 Trocknung von Hüttensand

Hüttensand fällt bei der Roheisenherstellung in der Stahlindustrie mit einer durchschnittlichen Feuchte von etwa 10 % an. Der Hüttensand muss vor der Mahlung des Zements getrocknet werden. In Zementwerken mit einer Anlage zur Hüttensandtrocknung wird hierfür entweder Ofenabgas oder Kühlerabluft verwendet.

Steht keine Abwärme zur Verfügung, wie z.B. in Zementmahlwerken, wird der Hüttensand mithilfe eines Heißgaserzeugers getrocknet, bevor er mit anderen Komponenten zu Zement vermahlen wird. Im Jahr 2015 betrug der Einsatz von Hüttensand in Deutschland etwa 4,6 Mio. Tonnen in insgesamt 44 Zementwerken.

1.2.4 Trocknung von Brennstoffen

Die Trocknung von Steinkohle sowie zum Teil auch Petrolkoks erfolgt in Zementwerken seit der Umstellung von Öl auf Kohle fast ausschließlich mit Ofenabgasen sowie zum Teil auch mit Kühlerabluft. Braunkohle wird vorgetrocknet in die Zementwerke geliefert, da deren hoher Flüchtigengehalt besondere Sicherheitsvorkehrungen erfordert. Die Kohle wird auf ein Feuchtegehalt < 1 % vorgetrocknet und gleichzeitig gemahlen. Für die Kohlemahltrocknung kommen Kugelmühlen und Walzenschüsselmühlen zum Einsatz.

Noch relativ neu und z.T. noch in Entwicklung befindlich ist die Vortrocknung von alternativen Brennstoffen mithilfe von Ofenabgasen. Dies betrifft insbesondere aufbereitete Industrie- und Gewerbeabfälle, die in der Regel mit einer Feuchte von 10 bis 25 % im Zementwerk angeliefert werden. Weiterhin betrifft dies Klärschlamm, der in der Regel mechanisch vorgetrocknet wird und mit Zementwerksabgasen bis auf ein Feuchtegehalt von max. 10 % getrocknet werden kann. Im Jahr 2015 wurde in zehn Werken getrockneter und in vier Werken mechanisch entwässerter Klärschlamm als Brennstoff für den Klinkerbrennprozess genutzt. Wird der Klärschlamm nicht getrocknet angeliefert, kann die Trocknung vor Einsatz im Ofen oder prozessintegriert erfolgen. Zur externen Trocknung muss die Abwärme

ein ausreichendes Temperaturniveau besitzen. Die ausgekoppelte Abwärme kann direkt oder z.B. mittels Thermoölsystem in den Trockner transportiert werden. Das Thermoöl dient als Energiespeichermittel und hat den Vorteil, dass die Energie über lange Distanzen transportiert werden kann. Die Thermoöl/Luft-Wärmetauscher im Trockner dienen zur Erwärmung der Trocknungsluft.

Mit der Auskopplung der Kühlerabluft entfällt der Einsatz von Primärenergie zur Trocknung des Klärschlammes.

1.2.5 Stromerzeugung mittels Wasser-Dampfkreislauf

Der Wasser-Dampfkreislauf ist ein thermodynamischer Kreisprozess, bei dem dampfbetriebene Wärmekraftmaschinen elektrische Energie erzeugen. Als Arbeitsmedium wird aufgrund seiner guten thermodynamischen Eigenschaften sowie der niedrigen Kosten Wasser verwendet. Der Dampf wird genutzt, um eine Turbine anzutreiben, die wiederum einen Generator zur Stromerzeugung antreibt. Wasser-Dampfkreisläufe können für Wärmequellen von $> 300\text{ °C}$ eingesetzt werden. In modernen Kraftwerken mit Einsatz fossiler Brennstoffe und Wasser-Dampfkreislauf kann der elektrische Wirkungsgrad bis zu 46 % betragen. Im Gegensatz dazu wird in einem Zementwerk für die Stromerzeugung aus Abwärme mit Wasser-Dampfkreislauf aufgrund der geringeren Temperatur der Abwärme ein Wirkungsgrad von maximal 20 bis 25 % erreicht. Auch wenn der Dampfkreislauf gut bewährt ist, ist zu beachten, dass bei abnehmendem Temperaturniveau der Wärmequelle und niedrigen Betriebsdrücken die Größe des Verdampfers zunimmt, was einen Anstieg der Investitionskosten zur Folge hat. Des Weiteren ist eine Verschmutzung der Wärmetauscherflächen durch Rohgas- oder Zementklinerstaub zu berücksichtigen. In einem Zementwerk mit einem Wasser-Dampfkreislauf können abhängig vom Prozess und der Ofentechnik zwischen 8 und 22 kWh/t Klinker - ohne Änderung des Ofenbetriebs - erzeugt werden [ECRA]. Eine technische Voraussetzung für die Stromerzeugung mittels Wasser-Dampfkreislauf in Zementwerken ist die Verfügbarkeit einer ausreichenden Menge an Abwärme mit einer Temperatur von $> 300\text{ °C}$ nach der Trocknung der Rohmaterialien.

Anlagen zur Stromerzeugung aus Abwärme mittels Wasser-Dampfkreislauf wurden in Japan entwickelt und mittlerweile häufig in China, Indien und anderen asiatischen Ländern installiert. Eine wesentliche Motivation besteht hierbei auch darin, Ausfällen der Stromversorgung durch die Möglichkeit zur Eigenerzeugung entgegenzuwirken.

Vor dem Hintergrund einer stabilen Stromversorgung und aufgrund eines relativ hohen Grades der Wärmenutzung z.B. für die benötigte Rohmaterialtrocknung sowie der hohen Investitionskosten wird eine Stromerzeugung aus Abwärme mittels Wasser-Dampfkreislauf nur in wenigen europäischen Zementwerken eingesetzt [ECRA].

1.2.6 Stromerzeugung mittels ORC-Verfahren

Das ORC-Verfahren (Organic Rankine Cycle) ist ein thermodynamischer Kreisprozess, mit dem niedrig temperierte Abwärme aus dem Klinkerbrennprozess zurückgewonnen und zur Stromerzeugung genutzt werden kann. Die ORC-Technologie basiert auf dem Clausius-Rankine-Prozess. Anders als bei einem (Wasser-)Dampfkraftwerk, wird bei der ORC-Technologie als Arbeitsmedium ein organisches Kältemittel eingesetzt. Beispielsweise können N-Pentan oder Toluol verwendet werden, die im Vergleich zu Wasserdampf bei deutlich niedrigen Temperaturen verdampfen. Aufgrund deren niedriger Siedepunkte sind Niedertemperaturwärmequellen, wie die Kühlerabluft, deren Temperaturniveau üblicherweise 200 bis 350 °C beträgt, für den ORC-Prozess geeignet. Elektrische Energie kann somit auf einem niedrigen Temperaturniveau erzeugt werden, bei dem Dampfturbinen nicht effizient arbeiten. Zudem benötigt ein ORC-System keinen Überhitzer im Vergleich zu (Wasser-) Dampfkreisläufen, so dass die Anlagenkosten für ein ORC-System insgesamt niedriger sind [ECRA].

Abhängig von der Temperatur beträgt der Wirkungsgrad eines ORC-Systems zwischen 10 und 20 %. In einem Zementwerk mit ORC-Verfahren können - ohne Änderung des Ofenbetriebs - zwischen 10 und 20 kWh/t Klinker erzeugt werden. Wesentliche Hindernisse ergeben sich aus der niedrigen Effizienz

der Energienutzung und den hohen spezifischen Kosten dieser Technologie [ECRA]. In einem Zementwerk in Deutschland wird eine ORC-Anlage betrieben.

1.2.7 Stromerzeugung mittels Kalina-Verfahren

Das Kalina-Verfahren ist ein thermodynamischer Kreisprozess und wurde für die Wärmerückgewinnung bei Niedrigtemperaturwärmequellen entwickelt. Er wird in industriellen Abwärmenutzungs-Anlagen, zur geothermischen Energiegewinnung und zur Nutzung von Solarenergie eingesetzt. Als Arbeitsmedium dient ein anorganisches Gemisch mit zwei unterschiedlichen Siedepunkten. Üblicherweise wird ein Gemisch aus Ammoniak und Wasser verwendet. Da Ammoniak bei niedrigen Temperaturen verdampft, kann elektrische Energie bei einem niedrigen Temperaturniveau erzeugt werden, bei dem Dampfturbinen nicht effizient arbeiten. Die Verdampfung findet bei steigenden Temperaturen statt, wodurch der Exergieverlust bei der Wärmezufuhr reduziert wird. Bei einem bestimmten Verhältnis zwischen Wasser und Ammoniak, kann der Siedepunkt des Gemisches auf unterschiedliche Temperaturen eingestellt werden. [ECRA]

Der Kalina-Prozess wird derzeit nicht in der Zementindustrie in Deutschland oder Europa sondern lediglich in ersten Anlagenrealisierungen in Pakistan und in den Vereinigten Arabischen Emiraten angewendet. In einem Zementwerk mit einem Kalina-Prozess können abhängig vom Prozess und der Ofentechnik zwischen 10 und 20 kWh/t Klinker - ohne Änderung des Ofenbetriebs - erzeugt werden. Mit dem Kalina-Verfahren werden elektrische Wirkungsgrade von 20 bis 25 % erreicht. [ECRA]

1.2.8 Nutzung für Gebäudeheizungen auf dem Werksgelände

Eine weitere Möglichkeit zur Nutzung der im Zementherstellungsprozess anfallenden Abwärme bietet die Heizung bzw. Heizungsunterstützung von Gebäuden. Die Abwärme kann zur Beheizung von Produktionsgebäuden, Büro- oder Verwaltungsgebäuden auf dem Werksgelände oder auch zur Bereitstellung von Warmwasser eingesetzt werden. Steht die Abwärme in geeignetem Temperaturniveau zur Verfügung und ist ein Wärmetransport über Dampf oder Thermoöl vorhanden, kann diese direkt in die zu beheizenden Gebäude transportiert werden. Ist dies nicht der Fall, muss die Abwärme zur Beheizung von Gebäuden vorher über Wärmetauscher geleitet und auf ein geeignetes Temperaturniveau gebracht werden. Der Wärmebedarf für diese Zwecke ist in Zementwerken in Europa allerdings sehr gering im Vergleich zur anfallenden Abwärme.

1.2.9 Nutzung für Nah- und Fernwärme

Wird überschüssige Energie als Niedertemperaturwärme aus dem Zementherstellungsprozess nicht selbst auf dem Werksgelände eines Zementwerks verwendet, kann diese in ein Nah- oder Fernwärmenetz eingespeist werden. Fernwärme ist thermische Energie, die über längere Distanzen vom Erzeuger zum Verbraucher durch Rohrleitungen transportiert wird und z.B. Städte versorgt. Nahwärme ist thermische Energie, die zur Versorgung von einzelnen Gebäuden in direkter Umgebung genutzt wird. Beispielsweise wird in Deutschland an einzelnen Standorten mit geeigneten Bedingungen Abwärme des Zementwerks in direkt angrenzenden werkseigenen Wohnungen und neuen privaten Wohnbauten in unmittelbarer Umgebung zur Beheizung genutzt.

Ein wesentliches Hindernis für die Nutzung für Fernwärme besteht häufig in den Investitionskosten für das Fernwärmenetz bzw. den Anschluss daran. Insofern ist i.d.R. nur der Anschluss an ein in der näheren Umgebung bestehendes Fernwärmenetz wirtschaftlich.

Mit größer werdender Distanz nehmen auch die Verluste im Rohrleitungssystem zu. Auch bei Nutzung der Abwärme zur Einspeisung in ein Nah- oder Fernwärmenetz muss die Abwärme auf einem geeigneten Temperaturniveau zur Verfügung stehen.

1.2.10 Betrieb einer SCR-Anlage mittels Abwärme

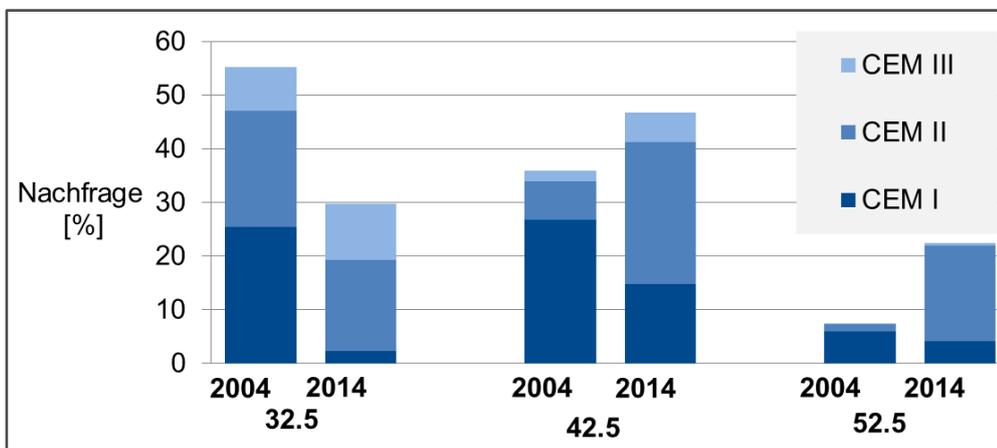
Seit 2010 sind in einigen deutschen Zementwerken SCR-Anlagen zur weitergehenden Minderung der NO_x-Emissionen installiert worden. Bei Einbau einer sogenannten Tail-End-SCR-Anlage (Low-Dust-Schaltung) wird der SCR-Katalysator nach dem Abgasfilter installiert.

Hierbei muss das Abgas von der Filtertemperatur (ca. 100 bis 150 °C, Low-Dust-Schaltung) auf Katalysatortemperatur (250 bis 400 °C) aufgewärmt werden. Hierzu kann - soweit verfügbar - Abwärme aus der Kühlerabluft oder dem Rohgas verwendet werden. Für den Wärmetransport wird üblicherweise ein Thermoölsystem genutzt. Dazu wird jeweils ein Thermoöl-/Gaswärmetauscher in die Kühlerabluft oder das Rohgas sowie in den Abgasweg nach Filter eingebaut. Bei einer High-Dust-Schaltung (Katalysator vor der Rohmühle und Entstaubungsanlage) ist eine Aufheizung des Gases nicht notwendig, da die Gastemperatur nach dem Wärmetauscher etwa 300 bis 400 °C beträgt. Ein Nachteil dieser Schaltung ist z.B. die Beanspruchung des Katalysators durch hohe Staubkonzentrationen [LEI]. Im Jahr 2015 waren zwei SCR-Anlagen zur Verminderung von NO_x-Emissionen in deutschen Zementwerken in Betrieb. Seitdem wurden in weiteren Zementwerken in Deutschland SCR-Anlagen installiert.

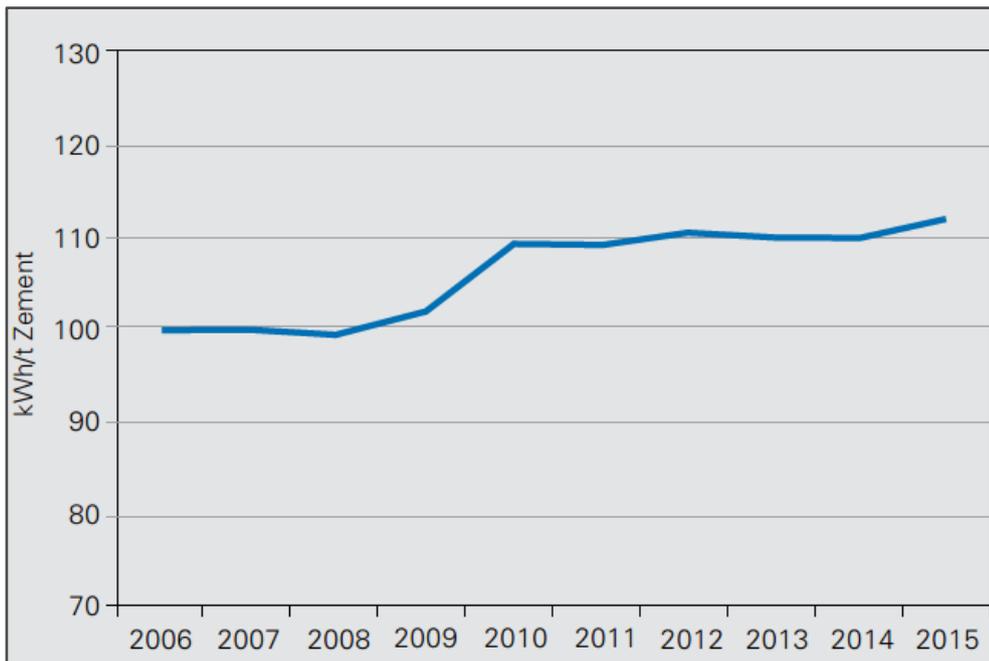
2 Elektrische Energieeffizienz

In der Zementindustrie wird elektrische Energie für Prozesse zur Zerkleinerung in Mühlen eingesetzt insbesondere für die Zementmahlung (ca. 46 %) und für die Rohmaterialaufbereitung (ca. 25 %) [FLE]. Ca. 24 % des elektrischen Energieeinsatzes entfällt auf die Prozesse zum Brennen und Kühlen des Klinkers [FLE]. Vor diesem Hintergrund kommt der Weiterentwicklung von effizienteren Mühlen und der Optimierung der Mahlprozesse eine große Bedeutung zu. Steigende Anforderungen an die Qualität der Produkte, insbesondere eine Nachfrage nach Zementen mit höherer Leistungsfähigkeit und Produktfeinheit (s. Abbildung 4) sowie der Einsatz von weiteren Bestandteilen neben Klinker in der Zementherstellung führen gleichzeitig zu einem steigenden elektrischen Energiebedarf. Weiterhin tragen erhöhte Umweltauflagen zur Erhöhung des elektrischen Energiebedarfs durch zusätzlich Anlagen bei. So erfordert die SCR-Technik zur NO_x-Minderung ca. 5 kWh/t Klinker zusätzlich. Von 2010 bis 2014 hat sich ein elektrische Energiebedarf von etwa 110 kWh/t Zement ergeben (s. Abbildung 5) [VDZ15].

Abbildung 4: Steigende Nachfrage nach den Produkten höherer Festigkeitsklassen 52.5 und 42.5 im Vergleich zur Festigkeitsklasse 32.5



Quelle: VDZ, eigene Darstellung, [VDZ16a]

Abbildung 5: Elektrischer Energiebedarf (vorläufiger Wert für 2015)

Quelle: VDZ, eigene Darstellung, [VDZ16]

Hinsichtlich des Einsatzes elektrischer Energie muss zwischen Energiebedarf und Energieeffizienz unterschieden werden. So hat die Herstellung eines feineren Zements zwar einen höheren Strombedarf, jedoch ohne dass die Effizienz der Energieausnutzung der Mühle darunter leidet. Weiterhin ist zu beachten, dass Technologien, die zur Verbesserung der thermischen Energieeffizienz beitragen, oft mit einer Erhöhung des elektrischen Energiebedarfs verbunden sind (z.B. Einbau einer zusätzlichen Vorwärmerstufe, Austausch eines Satelliten- oder Rohrkühlers gegen einen Rostkühler).

Zur Steigerung der elektrischen Energieeffizienz werden sowohl Weiterentwicklungen im Bereich der Zementmahlung und Rohmaterialaufbereitung in Betracht gezogen als auch Maßnahmen zur effizienten Energieversorgung und -nutzung.

Möglichkeiten zur effizienten Energienutzung:

- ▶ Optimierung des Betriebs von Mühlen
- ▶ Optimierung von Sichern in Mahlanlagen
- ▶ Einsatz von Vertikal- und Rollenmühle
- ▶ Weitergehende Nutzung effizienter Motoren
- ▶ Austausch weniger effizienter Mühlen durch effizientere Mühltypen
- ▶ Weitergehende Steuerung mit Frequenzumrichtern (FU) für Antriebe
- ▶ Automatisierung
- ▶ Effiziente Beleuchtung
- ▶ Energieeinsparung bei Optimierung der Querschnittstechnologien (Pumpen, Motoren, Kompressoren) mit begrenzten Potenzialen zur Effizienzsteigerung
- ▶ Getrenntmahlung: Reduzierung des Energieverbrauchs durch getrennte Mahlung. Der Energieverbrauch kann optimiert werden, wenn feines Material separat gemahlen wird, da höherer Energiebedarf für die Mahlung von feinem Material entsteht. Im Gemisch muss u.U. weniger anspruchsvolles Material länger als nötig gemahlen werden.
- ▶ Lastenmanagement: Netzstabilisierung: Betriebszeiten von Anlagen können in einem bestimmten Rahmen an das Stromangebot im Netz angepasst werden; durch angebotsorientierte Abnahme von Strom, z.B. in Zeiten von Überangeboten, ggf. Beitrag zur Netzstabilität.

Die höhere Effizienz der Energienutzung entsteht dabei im Energiesystem insgesamt, während im Zementwerk selbst, u.U. mit Effizienzeinbußen gerechnet werden muss. Erneuerbare Energien können besser genutzt werden; so müssten beispielsweise Windräder nicht ausgebremst werden.

Möglichkeiten zur Ressourcenschonung

Allgemein:

- ▶ Nutzung von Strom aus erneuerbaren Energiequellen
- ▶ Beeinflussung der Produkteigenschaften durch getrennte Mahlung und Mischung der Zementhauptbestandteile

Getrenntmahlung:

- ▶ Die Mahlung für verschiedene Materialien mit unterschiedlichen Mahlbarkeiten kann getrennt erfolgen. Dabei können spezifische Eigenschaften der Materialien besser berücksichtigt werden, als bei einer gemeinsamen Vermahlung. Übermahlung oder zu grob gemahlenes Material kann bei der Getrenntmahlung vermieden werden.
- ▶ Es können neue, bisher nicht verwendete Einsatzstoffe genutzt werden, die aufgrund der Mahlbarkeit nicht zusammen mit anderen Materialien gemahlen werden können.
- ▶ Sortenvielfalt (Zemente): Mit der Getrenntmahlung können ggf. zukünftig mehr Sorten an Zement hergestellt werden. Höhere Variabilität bei den Zusammensetzungen.
- ▶ Kombination verschiedener Mühlentechnologien: Für bestimmte Bestandteile können optimale Mahltechniken eingesetzt werden.

Voraussetzungen, unterstützende Faktoren und mögliche Hemmnisse in der Anwendbarkeit der Technologien

Allgemein:

- ▶ Weitere Entwicklung der Zerkleinerungstechnik (Grundlagenforschung)
- ▶ Investitionskosten abhängig von Technologien
- ▶ Marktanforderungen an die Zementqualität
- ▶ Flexibilität bei der Zementmahlung (Herstellung unterschiedlicher Zementsorten auf einer Mahlanlage)
- ▶ Mangelnde Verfügbarkeit erneuerbarer Energie für den Bedarf in allen Industriesektoren

Getrenntmahlung

- ▶ Mögliches Hemmnis: Ein ggf. hoher Investitionsaufwand für neue Mühlen und ein höherer Wartungsaufwand könnten ein Hemmnis in der Umsetzung und Anwendbarkeit darstellen.
- ▶ Mögliches Hemmnis: Die Getrenntmahlung ist standortabhängig und somit kein allgemein anwendbares Konzept für alle Werke; keine 1:1-Partizipation an positiven Erfahrungen anderer möglich.
- ▶ Unterstützende Faktoren: Angebot an Schulungen. Für eine neue Technologie, wie die Getrenntmahlung besteht Schulungsbedarf in den Zementwerken.
- ▶ Voraussetzung: Durch die getrennte Mahlung sind ggf. Anpassungen der Lagerkapazitäten nötig, z.B mehr oder größere Silos.
- ▶ Voraussetzung: Die richtige Kornbandverteilung hinsichtlich der Eigenschaften von Zementen
- ▶ Mögliches Hemmnis: Wird ein etablierter Kundenstamm durch Veränderungen durcheinander gebracht?

- ▶ Mögliches Hemmnis: Mühlenoptimierung vs. Lieferfähigkeit, angepasste Produktqualitäten und veränderte Lagerkapazitäten dürfen Lieferfähigkeit nicht beeinträchtigen
- ▶ Mögliches Hemmnis: Durch die zunehmende technische Vernetzung wird die Steuerung komplexer und der Betreuungsbedarf steigt ggf.

Querschnittstechnologien

- ▶ Unterstützende Faktoren: Angebot an Schulungen, Bewusstseinsbildung bei allen Beteiligten
- ▶ Unterstützender Faktor: komfortabler Strompreis
- ▶ Voraussetzung: Investitionen notwendig
- ▶ Mögliches Hemmnis: "Never change a winning team", Vertrauen in bewährte Techniken ist größer als der Mut zum Risiko
- ▶ Automatisierung wirkt unterstützend bei der Umsetzung von Effizienzmaßnahmen
- ▶ Verstärkte Realisierung von Verbesserungsmaßnahmen bei verbesserten Förderanreizen
- ▶ Mögliches Hemmnis: Erfolg von Maßnahmen im Vorhinein schwer abschätzbar auch hinsichtlich Wirtschaftlichkeit

Lastenmanagement

- ▶ Voraussetzung: Informationsaustausch zur Regelung des Netzwerkes aus dezentralen Versorgern und Verbrauchern
- ▶ Voraussetzung: Der Mehraufwand muss kompensiert werden: Anreize Markt
- ▶ Voraussetzung: Die Lieferfähigkeit muss gesichert sein
- ▶ Voraussetzung: Technischer Netzausbau am Standort
- ▶ Mögliches Hemmnis: Das Gesamtsystem ist komplexer, das Risiko des Einzelnen könnte steigen.
- ▶ Lagerkapazitäten müssen ggf. angepasst werden

Verbesserte / neue Mahltechnik

- ▶ Unterstützender Faktor: Verstärkter Technologie- und Wissenstransfer zwischen Wissenschaft und Industrie
- ▶ Unterstützender Faktor: Bewusstseinsbildung bei allen Beteiligten
- ▶ Voraussetzung: Geeignete Mahlhilfen für Vertikal-Rollenmühle (VRM)
- ▶ Mögliches Hemmnis: Risiko, dass Qualitätskriterien nicht eingehalten werden
- ▶ Mögliches Hemmnis: Fehlende Marktakzeptanz für veränderte Produkte
- ▶ Voraussetzung: Know-how-Aufbau für VRM und HPGR (Hochdruckrollenpresse), z.B. durch Schulungen
- ▶ Mögliches Hemmnis: Never change a winning team: Vertrauen in bewährte Techniken ist größer als der Mut zum Risiko
- ▶ Mögliches Hemmnis: keine 1:1 Übertragung von bestehenden Anlagen möglich; keine Erfolgsgarantie für Wirtschaftlichkeit und neue Produkte

Ideen für die Unterstützung der großtechnischen Umsetzung neuer Mahltechniken:

- ▶ Risikoverteilung auf mehrere Schultern (Joint-Venture zwischen Mühlenhersteller und Betreiber)
- ▶ Verbundprojekt mit Pilotanlage
- ▶ Testmahlungen in bestehenden Anlagen
- ▶ Runder Tisch zu Referenzanlagen für die deutsche Zementindustrie und Vernetzung zwischen Zementhersteller, Anwender und Nutzer

Synergien und Zielkonflikte mit weiteren rohstoff- und energieintensiven Industrien

Allgemein:

- ▶ Synergie: Optimierte Technologien für Mahlprozesse auch in anderen Industrien einsetzbar, insbesondere im Bereich Steine und Erden, und andersherum Mahltechnik aus anderen Bereichen ggf. auch in der Zementindustrie nutzbar: Übertragung von Technologieentwicklungen
- ▶ Verbesserte Hochleistungszement vs. hoher Zementbedarf im Beton, z.B. Indien
- ▶ Lastenmanagement: Kein direkter Effizienzgewinn im Zementwerk; größere Komplexität des Netzes steigert das Risiko des Ausfalls; Das Netz erfordert wettbewerbsübergreifende Zusammenarbeit
- ▶ Querschnittstechnologien: Lange Nutzungsdauer (bereits implementierter Anlagenteile) vs. Energieeinsparung

Getrenntmahlung:

- ▶ Beitrag zur Netzstabilität: Betriebszeiten der Mühlen können in einem bestimmten Rahmen an das Stromangebot im Netz angepasst werden; durch angebotsorientierte Abnahme von Strom, z.B. in Zeiten von Überangeboten, ggf. Beitrag zur Netzstabilität
- ▶ Das Lastenmanagement könnte bei einer Getrenntmahlung ggf. einfacher möglich werden
- ▶ Zement könnte als Energiespeicher genutzt werden, (Überschuss-)Strom für energieintensive Produkte nutzen
- ▶ Qualitätsanforderungen an die herzustellenden Produkten müssen eingehalten werden

Projektbeispiele in Deutschland

- ▶ Rohmaterialaufbereitung 50 % Kugelmühlen und 50 % Vertikalwälmühlen in Deutschland
- ▶ SCR-Technologie: zwei Anlagen (Jahr 2015)
- ▶ In Deutschland verfügt jedes Zementwerk über ein zertifiziertes Energiemanagementsystem
- ▶ Getrenntmahlung: Im Zementwerk Lübeck wird Hüttensand und Klinker getrennt vermahlen und anschließend zusammengemischt
- ▶ Querschnittstechnologien: Anwendung von anderen Technologien für pneumatische Förderung
- ▶ Lastenmanagement: SynEnergie Forschungsprojekt VDZ + AK Zerkleinerung: Synchronisierte und energieadaptive Produktionstechnik zur flexiblen Ausrichtung von Industrieprozessen auf eine fluktuierende Energieversorgung: Bewertung des flexiblen Energieeinsatzes in der Zementindustrie entlang der gesamten Prozesskette
- ▶ Lastenmanagement: F&E-Projekt: Polysius
Verbesserte / neue Mahltechniken: ECRA Roundtable/Projekt New Grinding Technology

Einschätzung der Realisierbarkeit von Technologien bzw. Maßnahmen in Deutschland gemäß der Ergebnisse aus dem Workshop

- ▶ Getrenntmahlung: vor 2030
- ▶ Querschnittstechnologien (Pumpen, Motoren, Kompressoren): vor 2030
- ▶ Lastenmanagement: vor 2030
- ▶ verbesserte / neue Mahltechnik: vor bzw. auch nach 2030

Forschungsansätze:

- ▶ Wie viel erneuerbare elektrische Energie steht zukünftig wirklich zur Verfügung? Hierzu liegen sehr unterschiedliche Studien mit z.T. unrealisierbaren Maximalszenarien bezüglich der Bereitstellung und Nutzung vor

- ▶ Berücksichtigung der realistischen Skalierbarkeit von Technologien und der Flächennutzung bei der Bewertung der Nachhaltigkeit

2.1 Optimierung der Rohmaterialaufbereitung und der Zementmahlung

2.1.1 Rohmaterialaufbereitung

Für die Rohmahlung der Rohstoffe werden etwa 20 % der elektrischen Energie eingesetzt [FLE]. „Bei der Zerkleinerung in der Kugelmühle oder in der Vertikalwälmühle wird das Mahlgut mit Heißgas getrocknet, das durch die Mahlanlage gesaugt wird. Im Allgemeinen wird hierfür der Wärmeinhalt der Gase des Ofensystems genutzt. Bei höherem Feuchtegehalt des Aufgabematerials wird zusätzlich ein Teil der Kühlerabluft verwendet oder eine zusätzliche Feuerung zur Heißgaserzeugung eingesetzt. Sehr feuchtes Rohmaterial wird z. T. vor der Mahlung in einem Trommeltrockner vorgetrocknet. Anstelle von Kugelmühlen, in denen das Gut durch eine umlaufende Stahlkugelfüllung gemahlen wird, werden heute zunehmend Vertikalwälmühlen zur Rohmaterialmahlung verwendet. Bei diesem Mühlentyp zerkleinern feststehende Walzen das Gut auf einem sich drehenden Mahlteller. Diese Mühlen haben im Vergleich zu Kugelmühlen einen niedrigeren spezifischen Energiebedarf, außerdem kann das Aufgabematerial deutlich höhere Wassergehalte haben als bei der Zerkleinerung in Kugelmühlen. Bei stark abrasiven Materialien sind ihre Einsatzmöglichkeiten durch hohen Verschleiß an den Mahlwerkzeugen aber begrenzt. Große Vertikalwälmühlen nach dem Stand der Technik ermahlen heute das Rohmehl, in Abhängigkeit der Mahlbarkeit des eingesetzten Rohmaterials, bei einem spezifischen Energiebedarf von etwa 10 bis 16 kWh/t Rohmehl“ [VÖZ]. Der spezifische Energiebedarf von Kugelmühlen beträgt ca. 20 bis 25 kWh/t Rohmehl. Für die Mahlung der Rohstoffe werden in Deutschland etwa 50 % Kugelmühlen und etwa 50 % Vertikalwälmühlen eingesetzt.

2.1.2 Zementmahlung

Etwa 46 % der elektrischen Energie werden bei der Zementherstellung für die Zementmahlung aufgewendet [FLE]. „Somit stellen die Energiekosten für die Zementmahlung einen erheblichen Anteil der Herstellungskosten dar. Geringe Minderungen des Strombedarfes führen so zu erheblichen Einsparungen bei den gesamten Produktionskosten. Für die Zementmahlung werden heute weltweit Kugelmühlen, Vertikalwälmühlen und Rollenpressen eingesetzt. Kugelmühlen zeichnen sich durch hohe Zuverlässigkeit aus. Die Zemente aus der Kugelmühlenmahlung weisen üblicherweise eine breite Kornverteilung auf und haben damit sehr günstige Verarbeitungseigenschaften. Der spezifische Energiebedarf der Mahlung in Kugelmühlen ist jedoch relativ hoch im Vergleich zu Vertikalwälmühlen und Rollenpressen. Allerdings sind die Kornverteilungen von Zementen, die auf diesen Mühlentypen gemahlen werden, üblicherweise meist enger, sodass in der Regel eine Nachmahlung in einer Kugelmühle erforderlich ist. Dadurch kann das Einsparpotenzial der genannten effizienten Mühlentypen nicht vollständig genutzt werden. Die Einsparpotenziale durch Nachrüstung/Vorschaltung einer Rollenpresse bzw. Vertikalwälmühle lassen sich nicht ohne weitere detaillierte Untersuchungen der Mahlbarkeit und der erforderlichen Korngrößenverteilung quantifizieren.“ [VÖZ]

2.1.3 Potenziale durch Ersatz bzw. Ergänzung der Kugelmühlen durch effiziente Mahlsysteme

„Eine Möglichkeit zur besseren Energieausnutzung bei den Mahlprozessen im Rahmen der Zementherstellung besteht durch die Vorschaltung eines weiteren Zerkleinerungsaggregats vor die bestehende Kugelmühlen-Mahlanlage, wenn auch zu betriebswirtschaftlich auf der Basis von Einsparungen selten vertretbaren Investitionskosten. Mit einer derartigen Anlagenmodifikation ist es möglich, insbesondere die Mahlung in der Kugelmühle auf die Feinerzkleinerung hin zu optimieren.

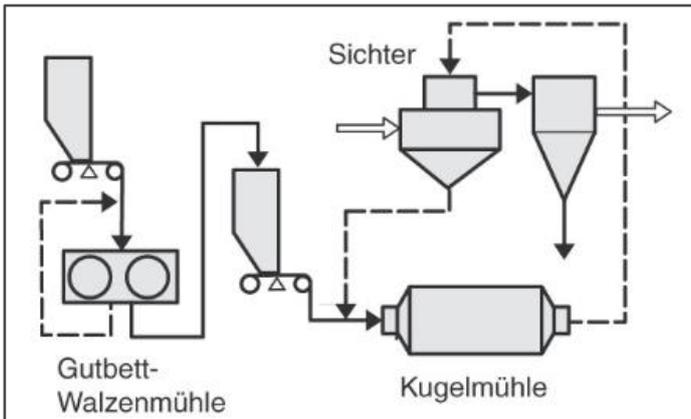
Die Vorzerkleinerung grober Partikel erfolgt dann weitgehend in dem vorgeschalteten Zerkleinerungsaggregat. Im Idealfall kann die erste Mahlkammer der Kugelmühle sogar entfallen. Als weiteres Zerkleinerungsaggregat kommt üblicherweise eine Rollenpresse zum Einsatz.

Je nach Anordnung der zusätzlichen Mühle in der bestehenden Mahlanlage werden folgende Betriebsarten der Gesamt-Mahlanlage unterschieden.“ [VÖZ]

Vormahlung

Das Aufgabematerial wird der Gutbettwalzenmühle (Rollenpresse) aufgegeben und anschließend in die Kugelmühle geführt; diese wird als herkömmlicher geschlossener Mahl-Klassier-Kreislauf betrieben. In Abbildung 6 ist eine Gutbettwalzenmühle dargestellt, die der Kugelmühle zur Vormahlung des Rohmaterials vorgeschaltet ist.

Abbildung 6: Vormahlung

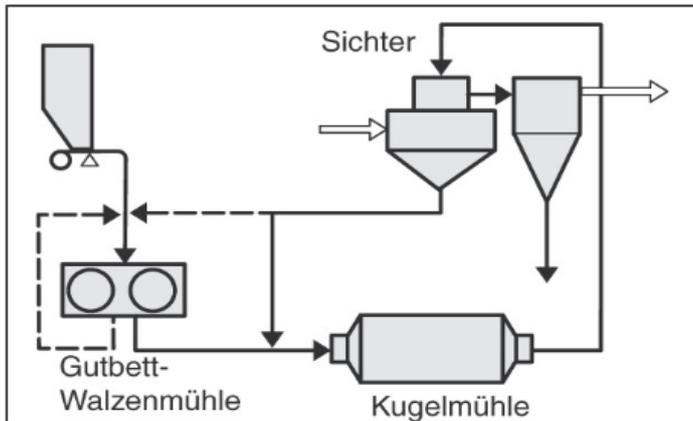


Quelle: VDZ, eigene Darstellung aus VDZ-Lernplattform

Hybridmahlung

„In diesem Fall wird das Frischgut zusammen mit einem Teilstrom der Sichtergrieße des Mahl-Klassier-Kreislaufs der Kugelmühle auf die Gutbett-Walzenmühle aufgegeben, sodass ein Teil der Fertigmahlung von der Gutbett-Walzenmühle übernommen wird“ (s. Abbildung 7) [VÖZ].

Abbildung 7: Hybridmahlung



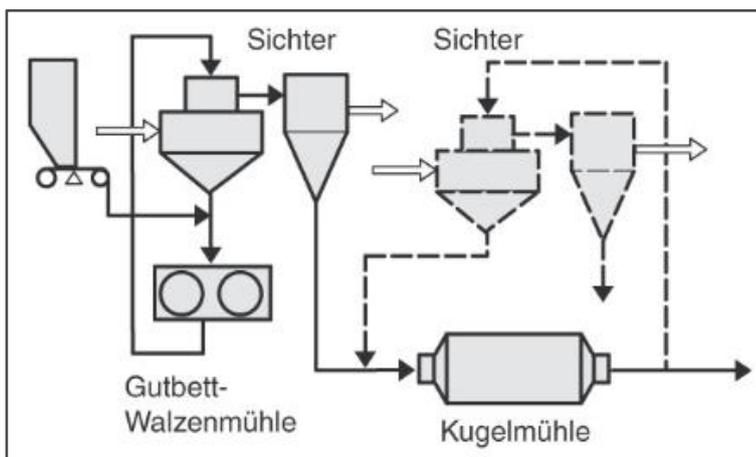
Quelle: VDZ, eigene Darstellung aus VDZ-Lernplattform

Teilfertigmahlung/Kombimahlung

„Das Frischgut wird der Rollenpresse aufgegeben; nach Zerkleinerung in diesem Aggregat wird der im ersten Zerkleinerungsschritt entstandene Feingutanteil über den Sichter der Rollenpresse abgetrennt. Dieses „teilstufige“ Produkt aus dem Primär- Mahlkreislauf wird dann der Kugelmühle zugeführt, die als geschlossener Mahl-Klassier- Kreislauf oder als Durchlaufmühle betrieben werden kann.“

Durch diese Sekundär-Mahlung wird das Zwischenprodukt aus der Rollenpresse dann auf die gewünschte Produktfeinheit fertig gemahlen. Das Sichtergrubgut des Primär-Kreislaufes wird zusammen mit dem Frischgut erneut der Rollenpresse aufgegeben“ (s. Abbildung 8).

Abbildung 8: Teilfertigmahlung



Quelle: VDZ, eigene Darstellung aus VDZ-Lernplattform

„Bei der Installation einer Rollenpresse zusätzlich zu einer bestehenden Mahlanlage mit Kugelmühle kann der höhere Wirkungsgrad dieses modernen Zerkleinerungsaggregates genutzt werden. Für das gleiche Zerkleinerungsergebnis wie die Kugelmühle benötigt die Rollenpresse nur etwa 50 bis 60 %

der Energie. Dabei muss aber unbedingt berücksichtigt werden, dass die Materialeigenschaften von Zementen aus der Zerkleinerung mit der Rollenpresse deutlich anders als die von Zementen aus einer Kugelmühlen-Mahlung sein können. In der Regel haben Zemente, die aus der Zerkleinerung mit der Rollenpresse stammen, deutlich andere Korngrößenverteilungen als Zemente aus der Mahlung in Kugelmühlen.

Zum Erreichen der gewünschten (breiten) Korngrößenverteilung ist deshalb die Nachmahlung in der Kugelmühle erforderlich; die Zerkleinerung ausschließlich in der Rollenpresse reicht in den meisten Fällen nicht aus.

Herausragender Vorteil der Kombimahlung ist jedoch die hohe Leistungssteigerung bereits bestehender Mahlanlagen durch einfaches Vorschalten der Rollenpressen-Mahlanlage.

Je größer der mit der Gutbett-Walzenmühle erzeugte Feingutanteil ist, umso größer ist die Energieeinsparung. Erfahrungen zeigen, dass die Fein- und Feinstmahlung spröder Stoffe mit diesem Anlagenkonzept bei gleicher elektrischer Leistungsaufnahme eine Steigerung der Durchsatzleistung um bis zu 100 % und eine Energieeinsparung gegenüber Anlagen mit Kugelmühlen im Einzelfall um mehr als 50 % ergeben. Für die Zementmahlung wird daher angestrebt, die gesamte Feinzerkleinerung in der Gutbett-Walzenmühle durchzuführen. Außerdem haben Gutbett-Walzenmühlen einen deutlich geringeren Raumbedarf als Kugelmühlen.“ [VÖZ]

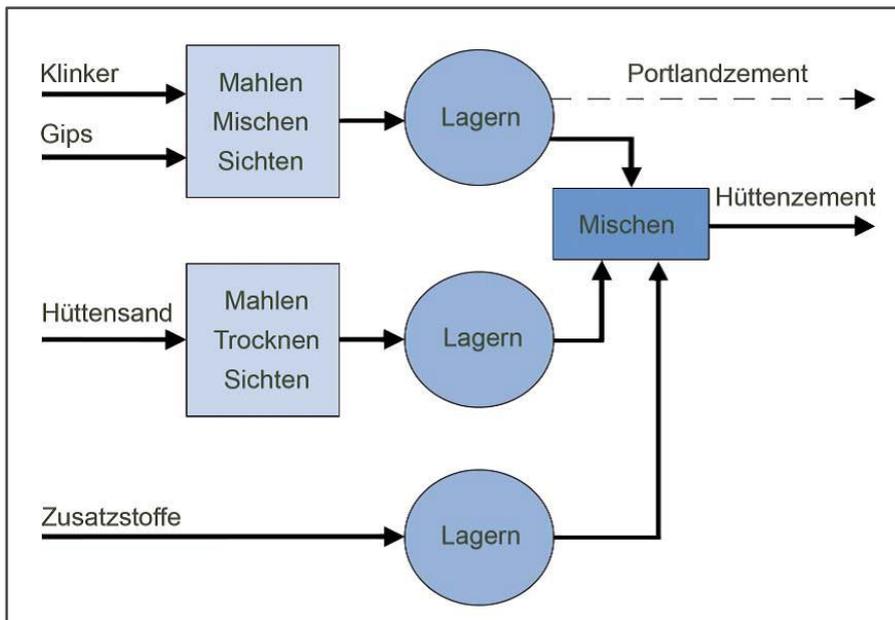
Getrennte Mahlung

„Eine weitere Möglichkeit zur Steigerung der Energieeffizienz von Zerkleinerungsprozessen in der Zementproduktion besteht in der getrennten Vermahlung von Zementbestandteilen. Wird ein derartiges Konzept angewendet, können die spezifischen Eigenschaften verschiedener Zementbestandteile deutlich besser berücksichtigt werden. So ist z. B. die gemeinsame Vermahlung der Bestandteile von CEM-III-Zementen wegen der unterschiedlichen Mahlbarkeit von Zementklinker und Hüttensand immer problematisch. Der leichter mahlbare Klinker wird feiner aufgemahlen als der Hüttensand; damit reicht häufig die Reaktivität der Hüttensandkomponente nicht aus, um die gewünschten Zementeigenschaften zu erreichen. Wird dann noch feiner aufgemahlen, um die Zielfeinheit der Hüttensandkomponente zu erreichen, kann es zur Übermahlung der Klinkerkomponente kommen. Abhilfe schafft hier die getrennte Vermahlung der Zementkomponenten mit anschließender Mischung.

Dabei besteht dann auch die Möglichkeit, zur Vermahlung jeweils die für bestimmte Zementbestandteile optimale Zerkleinerungstechnologie einzusetzen. So ist z. B. die Vertikalwälmühle besonders geeignet für die Hüttensandzerkleinerung; die spezifische Leistungsaufnahme beträgt für das gleiche Zerkleinerungsergebnis wie in der Kugelmühle üblicherweise nur ca. 40 bis 50 %.

Da die Vertikalwälmühle weiterhin besonders gut für die Mahltrocknung von Stoffen mit hoher Aufgabefeuchte geeignet ist, kann sich die Installation einer derartigen Mühle insbesondere lohnen, wenn größere Mengen Schlacke verarbeitet werden. Eine Quantifizierung möglicher Einsparpotenziale ist jedoch nur möglich, wenn genaue Angaben bezüglich der Mahlbarkeit aller Einsatzstoffe vorliegen.“ (Abbildung 9)[VÖZ]

Abbildung 9: Getrennte Mahlung am Beispiel der Hüttenzementherstellung



Quelle: VDZ, eigene Darstellung, [VDZ08]

2.1.4 Mahltechnik im Stadium der Forschung und Entwicklung

Derzeit wird ein internationales Forschungsprojekt¹ zur effizienten Mahlung in der Zementindustrie durchgeführt, da eine optimale Energieausnutzung mit der herkömmlichen Mahltechnik nicht erreicht scheint und noch ein großes Potential in der Optimierung von Mahlprozessen gesehen wird. In einer Studie zu dem Forschungsprojekt sind die neuesten Ansätze beschrieben. Die Ansätze oder Technologien zur Mahlung befinden sich allerdings noch im Stadium der Forschung und Entwicklung und wurden noch nicht in der Praxis untersucht. Aus diesem Grund können derzeit keine Aussage über die konkreten Potentiale zur Steigerung der Energieeffizienz oder über die CO₂- und Kosteneinsparungen getätigt werden.

Die Optimierungen in der Mahltechnik basieren beispielsweise auf dem Einsatz von Rührwerkskugelmöhlen und kleinen und beweglichen Mühlenanlagen, Ultraschall-Zerkleinerung, Ultrafeinmahlung sowie Tieftemperaturzerkleinerung [ECRA].

2.2 Moderne Anlagentechnik

2.2.1 Elektrische Antriebe

„Elektrische Motoren werden in der Industrie zum Antrieb von Ventilatoren, Gebläsen, Kompressoren und Pumpen verwendet. Eine Optimierung der elektrischen Antriebe erfordert eine Betrachtung des Gesamtsystems, z. B. elektrischer Wirkungsgrad, Laufzeit, Antrieb, hydraulischer Wirkungsgrad, Regelung usw.“ [VÖZ]

2.2.2 Anlagenautomatisierung

Nicht optimierte Prozessleitsysteme können zu Wärmeverlusten oder instabilen Prozessbedingungen, bis hin zu Betriebsstops führen. Daraus resultiert ein erhöhter Brennstoffbedarf zur Wiederaufheizung

¹ ECRA Future Grinding Technologies Project [ECRAa]

der Sinterzone. Maßnahmen zur Optimierung des Verbrennungsprozesses und Verbrennungsbedingungen können automatisierte computergesteuerte Steuerungssysteme darstellen. Heutzutage sind Drehofenanlagen in Deutschland in der Regel mit solchen Systemen ausgestattet.

Neben der Automatisierung der Wäge- und Mischprozesse können zur Optimierung des Ofenbetriebs auch andere Parameter wie Luftstrom-, Massenstrom- und Temperaturverteilung mit automatisierten Systemen gesteuert werden. Die Verwendung von Online-Analysatoren ermöglicht bei Bedarf eine sofortige Änderung in der Zusammensetzung und Mischverhältnis der Materialien. Grundsätzlich können mit einer optimierten Anlagenautomatisierung elektrische und thermische Energieeffizienz gesteigert sowie die Produktqualität verbessert werden. Eine unter Umständen durch Optimierung mögliche Einsparung von elektrischer und thermischer Energie beim Einsatz einer Anlagenautomatisierung kann zwischen 50 bis 200 MJ/t Klinker und 0 bis 2,5 kWh/t Zement liegen. [ECRA]

2.2.3 Variable Drehzahlantriebe

Eine weitere Möglichkeit den elektrischen Energiebedarf zu reduzieren, ist der Einsatz von variablen Drehzahlantrieben. Allerdings beschränkt sich diese Möglichkeit auf Antriebe, die häufig mit variabler oder Teilleistung betrieben werden. Beispielsweise sind Motoren, wie die Antriebe von großen Gebläsen oder Ventilatoren (ID-Gebläse, Kühlergebläse, Ofenabluftgebläse) häufig mit variablen Drehzahlantrieben ausgestattet. Der gesamte Prozess kann durch Verwendung solcher Antriebe effizienter geregelt und Gebläsevibrationen reduziert werden. Wartungskosten der Anlage können ebenfalls verringert werden. Auf der anderen Seite sollte berücksichtigt werden, dass Energieeinsparungen begrenzt sind, wenn der Ofen oder Mahlanlagen mit ihrer maximalen Kapazität betrieben werden. So werden die elektrischen Antriebe, die Hauptstromverbraucher in einem Zementwerk darstellen, überwiegend auf eine vollständige Leistungsnutzung ausgelegt und dementsprechend mit konstanter Motorenleistung effizient betrieben. [ECRA]

2.2.4 Druckluftherzeugung und -nutzung

„Druckluft ist ein universell nutzbarer, jedoch auch kostenintensiver Energieträger. Im Durchschnitt kann von Druckluftkosten zwischen 1,5 und 3 Cent pro m³ erzeugter Druckluft ausgegangen werden. In der Zementindustrie wird Druckluft hauptsächlich für Transport-, Misch-, Reinigungs- und Steuerungszwecke verwendet. Moderne Druckluftherzeugungsanlagen wandeln 20 % der zugeführten Energie in mechanische Energie um. 80 % der zugeführten Energie werden als Abwärme wieder abgegeben. Mangelhafte Wartung, Druckluftaufbereitung und Leckagen können die nutzbare Energie auf unter 5 % der zugeführten Energie reduzieren. Der erste Schritt zur Reduktion der Druckluftkosten ist ein sparsamer Umgang mit der Druckluft selbst. Der zweite Schritt zur Reduktion des Druckluftenergieverbrauchs ist die Erhöhung der Energieeffizienz im Bereich der Druckluftherzeugung, Druckluftverteilung und der Druckluftverbraucher.“

In einer Studie zur Energieeffizienz in der österreichischen Zementindustrie [VÖZ] wurden Zementwerke hinsichtlich des technischen Optimierungspotenzials im Bereich der Druckluftherzeugung untersucht und analysiert.

Die Ergebnisse zeigten, dass eine Reduktion des Energiebedarfs für die Druckluftherzeugung in den untersuchten Zementwerken i.d.R. jeweils zwischen 30 und 500 MWh/a möglich wäre.

2.2.5 Beleuchtung

„In den Zementwerken wird häufig eine hohe Anzahl an Leuchten eingesetzt. Durch den Ersatz herkömmlicher Leuchtmittel durch energieeffiziente Leuchtmittel mit modernen Vorschaltgeräten kann der jährliche Beleuchtungsenergiebedarf reduziert werden.“ Gemäß der österreichischen Studie [VÖZ] könnte der jährliche Bedarf an Energie für die Beleuchtung in den untersuchten Zementwerken jeweils um etwa 30 bis 100 MWh/a reduziert werden. [VÖZ]

2.3 Energieversorgung und Nutzung

2.3.1 Energiemanagement

Energiemanagementsysteme sind ein wichtiges Werkzeug, um in einem kontinuierlichen Verbesserungsprozess die Energieeffizienz von Unternehmen durch technische Optimierungen und Maßnahmen bei der Energienutzung zu optimieren. Die Einführung eines Managementsystems allein führt nicht zu Energieeinsparungen. Mit einem Energiemanagement werden alle relevanten Prozesse und Technologien hinsichtlich ihrer Verbesserungsmöglichkeiten systematisch überwacht. Durch die Nutzung des Managementsystems werden mögliche Einsparpotentiale aufgezeigt analysiert und geeignete Maßnahmen initiiert. Die Energieeinsparung erfolgt dann durch die Umsetzung von wirksamen Maßnahmen und Anwendung geeigneter Technologien. Auch technische Audits und Reviews sind wichtige Maßnahmen für die Ermittlung von Potentialen zur Steigerung der Energieeffizienz. In Deutschland verfügt jedes Zementwerk über ein zertifiziertes Energiemanagementsystem.

2.3.2 Nutzung erneuerbarer Energien

Weltweit investieren einige Zementhersteller in Windparks oder Solaranlagen, um direkt erneuerbare Energien für die Zementherstellung zu nutzen. Außerhalb Europas ist eine wesentliche Motivation hierfür der Ausgleich einer unsicheren Energieversorgung am Standort. In Europa bzw. Deutschland können bei entsprechenden Randbedingungen und Vertragsgestaltung z.B. die Netzkosten entfallen. Allerdings sind dem direkten Einsatz von erneuerbaren Energien in Zementwerken vor dem Hintergrund ihrer fluktuierenden Verfügbarkeit und dem kontinuierlichen Klinkerbrennprozess Grenzen gesetzt. Im Rahmen der Möglichkeiten zur flexiblen Nutzung von elektrischer Energie koordinieren die Zementhersteller die elektrischen energieintensiven Prozesse i.d.R. mit lokalen Netzbetreibern hinsichtlich der Betriebszeiten und -dauer. Oft führt dies dazu, dass die Roh- und Zementmühlen nur periodisch (z. B. 14 von 24 h) und vorwiegend nachts betrieben werden, wenn der Energiebedarf und die Preise niedriger sind als tagsüber. Mit Blick auf die Zementherstellung könnte die flexible Nutzung von überschüssiger erneuerbarer Energie für Mahlprozesse in der Zementherstellung bei geeigneten ökonomischen und technischen Voraussetzungen weiter optimiert werden [RUP]. Den Effizienzgewinnen im gesamten Energiesystem stehen dabei in der Regel gewisse Effizienzverluste durch die flexiblere Anlagenfahrweise gegenüber. Dies betrifft sowohl den elektrischen Energieaufwand (Anfahrprozesse), die produktspezifische Effizienz (ggf. Produktionsausschuss durch zunehmende „Mahlschwänze“) als auch ggf. den Personaleinsatz (flexible Schichten). Insgesamt sind die vertraglichen Voraussetzungen für eine bessere Nutzung von erneuerbaren Energien in Deutschland oft noch zu ungünstig, um den aufwendigeren flexiblen Betrieb von Mahlanlagen insgesamt ausreichend vorteilhaft zu gestalten. Weitere Ansätze, z.B. die Optimierung von ökonomischen, vertraglichen und technischen Voraussetzungen, wären für die Flexibilisierung des Betriebs von Zementwerken zur Nutzung weitergehenden regenerativer Energien im Zementherstellungsprozess notwendig [ECRA].

2.3.3 Energiebedarf für Umweltschutzmaßnahmen

Durch gesetzlich vorgeschriebene Emissionsgrenzwerte sind die Zementhersteller aufgefordert, mit technologischen Maßnahmen Emissionen zu begrenzen. Dies gilt beispielsweise für NO_x -, SO_2 -, Quecksilber- und Staubemissionen sowie auch für Schallemissionen. Die Umsetzung von Umweltschutzmaßnahmen und die damit verbundene Installation zusätzlicher Technologien ist häufig mit einem steigenden elektrischen Energieeinsatz verbunden.

So hat die Absenkung des Emissionsgrenzwertes für Staub in den vergangenen Jahren von 30 auf 10 mg/m^3 dazu geführt, dass der Betrieb der installierten Elektrofilter auf die niedrigere Staubemission angepasst werden musste. Dies führte zu einer Erhöhung des Energiebedarfes in der Größenordnung einer 1 kWh/t Klinker. In mehreren Zementwerken wurden Elektrofilter, die am Ende ihrer Lebenszeit angekommen waren, durch Gewebefilter ersetzt.

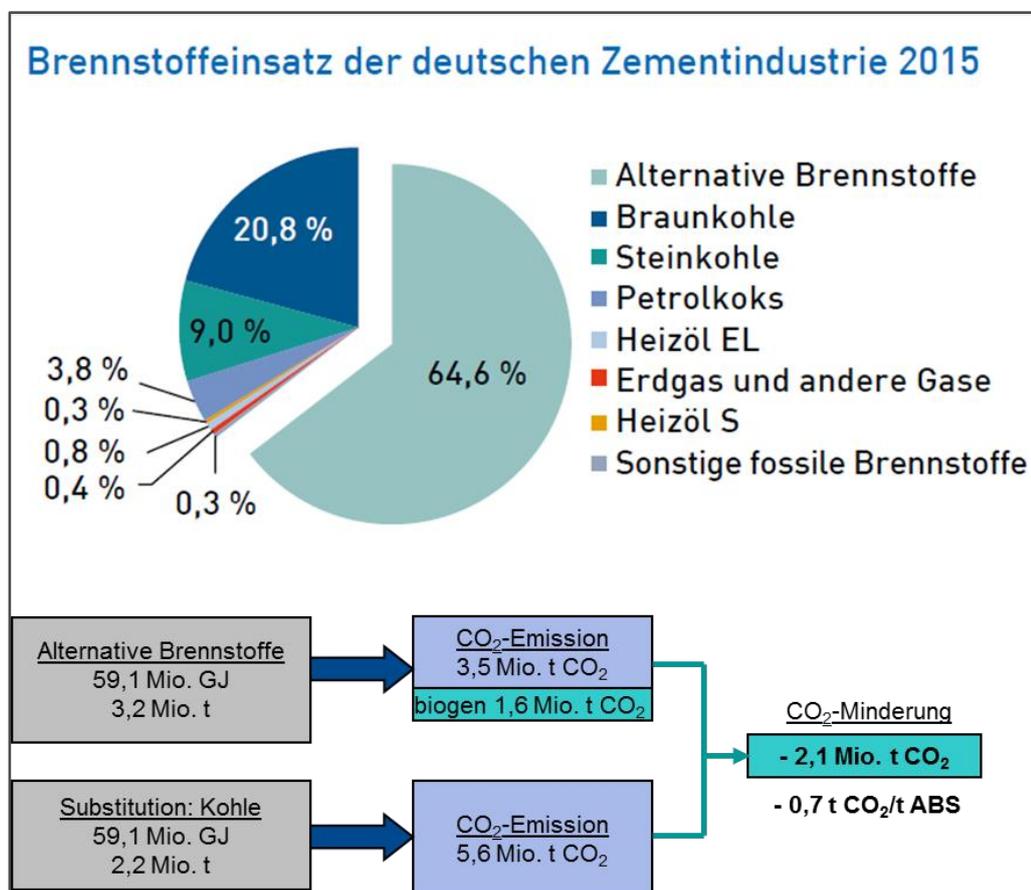
Dies ist zwar mit hohen Investitionskosten verbunden, allerdings kann der niedrigere Staubgrenzwert damit mit vergleichbarem Energiebedarf erreicht werden, wie mit dem Elektrofilter. Zwar wird der Energiebedarf für die Hochspannung eingespart, andererseits erhöht sich der Druckverlust des Filters deutlich.

Zur NO_x-Minderung werden derzeit in mehreren Zementwerken SCR-Anlagen installiert. Hierbei werden Katalysator-Reaktoren in den Abgasweg entweder nach Wärmetauscher (High-Dust-SCR) oder nach Abgasfilter (Tail-End-SCR) installiert. Der erhöhte Druckverlust im Abgasweg sowie die erforderliche Abreinigung bei der High-Dust-Variante bewirken einen zusätzlichen elektrischen Energiebedarf von ca. 5 kWh /t Klinker. Im Jahr 2015 waren in der deutschen Zementindustrie zur Verminderung von NO_x-Emissionen zehn Anlagen mit gestufter Verbrennung, 38 Anlagen mit dem SNCR-Verfahren und zwei Anlagen mit der SCR-Technologie in Betrieb [VDZ16a]. Auch weitergehende Abgasreinigungstechnologien, wie die derzeit in einem deutschen Zementwerk in Demonstration befindliche DECONOX-Technologie, bewirken u.a. einen höheren Druckverlust im Abgasweg und damit einen erhöhten elektrischen Energiebedarf. Die DECONOX-Technologie hat einen zusätzlichen thermischen Energiebedarf. Unter Umständen kann dieser durch Nutzung von im Klinkerbrennprozess anfallender Abwärme zur Wiederaufheizung der Abgase auf Reaktortemperatur gedeckt werden.

3 Einsatz alternativer Brennstoffe

In der deutschen Zementindustrie werden seit den 1990-er Jahren alternative Brennstoffe verwendet. Ihr Einsatz wurde in den 2000-er Jahren erheblich gesteigert. Damit leistet die Zementindustrie einen wichtigen Beitrag zur Ressourcenschonung und Minderung von CO₂-Emissionen aus dem Klinkerbrennprozess. Im Jahr 2015 wurde der Brennstoffenergiebedarf zu 64,6 % durch alternative Brennstoffe gedeckt (Abbildung 10). Sie ersetzen somit eine große Menge an fossilen Brennstoffen, wie vor allem Braun- und Steinkohle [VDZ16]. Auch aufgrund ihrer von der Kohle abweichenden Zusammensetzung (biogene Kohlenstoffanteile, geringeres C/H-Verhältnis) tragen alternative Brennstoffe zur Minderung klimarelevanter CO₂-Emissionen bei. In einem Beispiel zum Einsatz von alternativen Brennstoffen in deutschen Zementwerken anstelle von Kohle zeigt sich, dass pro Tonne eingesetztem alternativen Brennstoff bis zu 0,7 t fossile CO₂-Emissionen vermieden werden können.

Abbildung 10: Brennstoffeinsatz in der deutschen Zementindustrie 2015 und Beispiel zur Vermeidung fossiler CO₂-Emissionen anhand von Daten zum Einsatz von alternativen Brennstoffen im Jahr 2016



Quelle: VDZ, eigene Darstellung, [VDZ16b], Beispielrechnung

Typische alternative Brennstoffe sind beispielsweise aufbereitete Industrie- und Gewerbeabfälle (Fluff), Altreifen, Tiermehl, Kunststoffabfälle oder Klärschlamm.

Tabelle 2 zeigt den Einsatz und die durchschnittlichen Heizwerte alternativer Brennstoffe im Jahr 2015.

Tabelle 2: Einsatz und durchschnittliche Heizwerte alternativer Brennstoffe in 2015 [VDZ16a]

Fraktionen	Einsatz in 1.000 t/a	Heizwert in MJ/kg
Altreifen	221	28
Altöl	24	31
Fraktionen aus Industrie-/Gewerbeabfällen		
- Zellstoff, Papier und Pappe	93	4
- Kunststoff	654	22
- Sonstige	1.127	21
Tiermehle und -fette	149	18
Aufbereitete Fraktionen aus Siedlungsabfällen	317	16
Lösungsmittel	145	24
Klärschlamm	382	3
Sonstige, wie Ölschlamm, Organische Destillationsrückstände	65	11

Die Brennstoffe müssen entsprechend aufbereitet sein, um die hohen Anforderungen hinsichtlich Qualität, Eigenschaften und Materialzusammensetzung für die Klinkerproduktion zu erfüllen, im Zementwerk mitverbrannt werden zu dürfen und die Umweltverträglichkeit von Prozess und Produkt nicht zu beeinträchtigen.

Die eingesetzten Brennstoffe werden im Klinkerbrennprozess sowohl energetisch als auch stofflich verwertet [OER]. Die mineralischen Bestandteile der Brennstoffe werden zum Bestandteil des Zementklinkers.

Die folgenden Parameter beeinflussen den Prozess (Ofenbetrieb und Umweltverträglichkeit) und die Qualität des Produkts:

- ▶ Heizwert: Wesentlicher Parameter für die Energie, die dem Prozess bereitgestellt wird
- ▶ Feuchtegehalt: Der Feuchtegehalt kann die Produktionsrate und die energetische Leistung beeinflussen sowie den Energiebedarf erhöhen
- ▶ Aschegehalt: Die chemische Zusammensetzung der Asche muss überwacht werden, um zu gewährleisten, dass die Zusammensetzung der Rohmaterialmischung den erforderlichen Anforderungen an die Klinker-/Zementherstellung entspricht
- ▶ Stabilität des Betriebs (Dauer und Häufigkeit ungeplanter Stillstände)
- ▶ Zustand (fest, flüssig), Aufbereitung (zerkleinert, gemahlen) und Homogenität der Brennstoffe
- ▶ Alkali-, Schwefel- und Chlorgehalt: Überhöhte Einträge der Komponenten können zu einer Anhäufung und Verstopfung im Ofensystem führen. Ein Bypasssystem kann erforderlich sein, um überschüssige Verbindungen aus dem Vorwärmer/der Vorkalzinerung zu entfernen, die nicht in den Klinker eingebunden werden können
- ▶ Auswirkungen der Emissionen auf die Luft/Umgebung

Einige Werke in Deutschland haben den Einsatz von alternativen Brennstoffen, wie Fluff (flugfähige Fraktionen: Brennbare Reststoffe aus Industrie- und Gewerbeabfällen, wie Kunststoffe, Papier, Pappe, Textilien, etc.) bereits auf annähernd 100 % erhöht. Etwa 20 Werke (Tendenz steigend) haben die Einsatzrate von 100 % solcher Brennstoffe genehmigt. Hierbei bleibt der Einsatz von Primärbrennstoffen für das An- und Abfahren der Ofenanlagen und die Sicherung eines stabilen Ofenbetriebs in begrenzten Zeiträumen notwendig. Dies bedeutet, dass bereits heute überwiegend Ersatzbrennstoffe zur Deckung der Brennstoffenergie im Klinkerbrennprozess verwendet werden können.

Energetische und stoffliche Verwertung von Abfällen

Die VDI-Richtlinie 2094 (Emissionsminderung - Zementwerke) führt wesentliche verfahrenstechnische Merkmale auf und besagt, dass der Klinkerbrennprozess grundsätzlich ein geeignetes Verfahren zur umweltverträglichen energetischen und stofflichen Verwertung von Abfällen ist:

- ▶ „Maximale Gastemperaturen im Drehofen (Primärfeuerung) von 2000 °C
- ▶ Verweilzeiten der Gase im Drehofen von etwa 8 s bei Temperaturen oberhalb von 1.200 °C
- ▶ Brennguttemperaturen von etwa 1.450 °C
- ▶ oxidierende Gasatmosphäre im Drehofen
- ▶ Verweilzeiten der Gase in der Zweitfeuerung von mehr als 2 s bei Temperaturen über 850 °C; in Kalzinatoren liegen entsprechend längere Verweilzeiten vor
- ▶ Brennguttemperaturen in der Zweitfeuerung bzw. Kalzinator von 850 °C
- ▶ auch bei Lastschwankungen gleichmäßige Ausbrandbedingungen auf Grund der hohen Wärmekapazität des Drehofens
- ▶ Zerstörung organischer Schadstoffe durch hohe Temperaturen bei ausreichend langen Verweilzeiten
- ▶ Sorption gasförmiger Komponenten wie HF, HCl, SO₂ an alkalischen Reaktionspartnern
- ▶ Hohes Rückhaltevermögen für partikelgebundene Schwermetalle
- ▶ Kurze Verweilzeit der Abgase im Temperaturbereich der Neubildung (De-novo-Synthese) von Dioxinen und Furanen
- ▶ Vollständige Nutzung der Brennstoffaschen als Bestandteile des Klinkers, daher gleichzeitige stoffliche und energetische Verwertung unabhängig vom Heizwert
- ▶ Chemisch-mineralogische Einbindung von Spurenelementen in den Klinker“

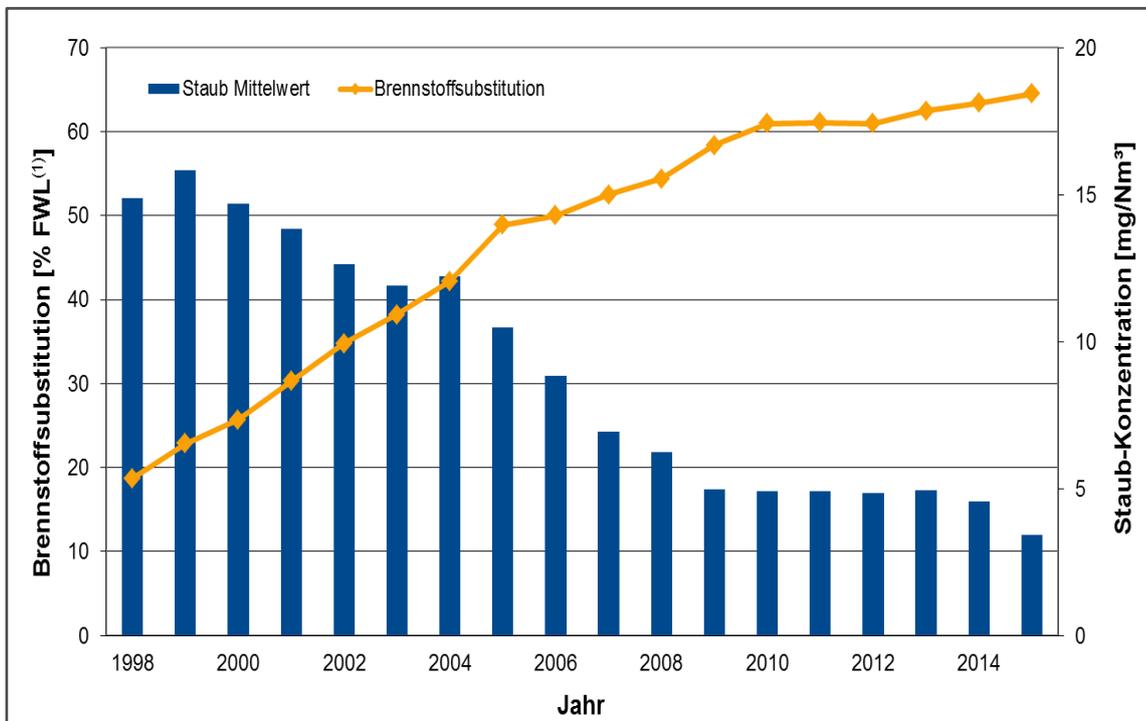
Die europäische Abfallrahmenrichtlinie (Richtlinie 2008/98/EC) definiert die fünfstellige Abfallhierarchie, in der grundsätzlich eine stoffliche Nutzung höherwertig eingestuft wird als eine energetische Nutzung der Brennstoffe, z.B. zur Klinkerherstellung. Im Rahmen der Umsetzung der europäischen Richtlinie hat der deutsche Verordnungsgeber zusätzlich einen Artikel ergänzt, in dem die stoffliche und energetische Verwertung für Materialien mit einem Heizwert oberhalb von 11 MJ/kg gleichrangig betrachtet werden kann. Dadurch konnten zusätzliche Nachweispflichten und ein erhöhter bürokratischer Aufwand bei energetischer Nutzung hochkalorischer Materialien vermieden werden. Allerdings soll diese Textpassage, aufgrund eines Mahnschreibens der EU-Kommission im Jahr 2017 wieder gestrichen werden. Diese Streichung könnte Auswirkungen auf den Nachweis einer Gleichrangigkeit zwischen energetischer und stofflicher Verwertung haben [OER]. In § 6 Absatz 2 KrWG sind die Kriterien für eine solche Gleichrangigkeitsbetrachtung aufgeführt, anhand derer die Abfallverwertung in der Veröffentlichung „Hochwertige Verwertung von Abfällen – Der Beitrag der Zementindustrie zu einer modernen Kreislaufwirtschaft [OER]“ bewertet wird.

Die Bewertung zeigt, dass der Einsatz alternativer Stoffe bei der Klinker- bzw. Zementherstellung insgesamt zu einer Verbesserung der Situation führen würde, so dass

- ▶ Emissionen gemindert
- ▶ natürlichen Ressourcen geschont
- ▶ eingesetzte Energie effizient genutzt und
- ▶ Schadstoffe zerstört (Organik) bzw. sicher eingebunden werden.

Ein erhöhter Einsatz alternativer Brennstoffe geht einher mit dem kontinuierlichen Absinken von z.B. Staub- oder NO_x-Emissionen, s. Abbildung 11 und Abbildung 12. Dies ist zum einen mit den für Mitverbrennungsanlagen ab Ende 2016 (NO_x Ende 2018) geltenden schärferen Emissionsgrenzwerten zu begründen. Zum anderen verändert der Einsatz alternativer Brennstoffe beim Klinkerbrennprozess die Betriebsbedingungen so, dass weniger thermisches NO_x gebildet wird und die NO_x-Emission dadurch positiv beeinflusst wird.

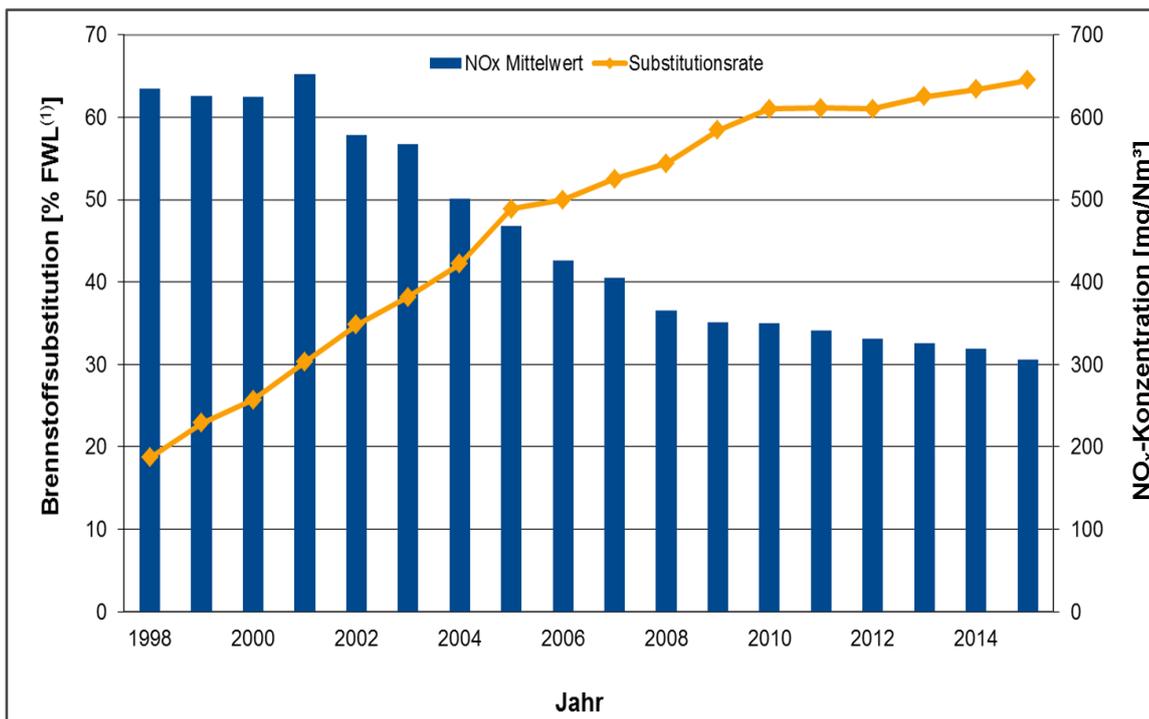
Abbildung 11: Entwicklung der Staubemissionen (Jahresmittelwerte) und Substitutionsraten



⁽¹⁾ Feuerungswärmeleistung

Quelle: VDZ, eigene Darstellung, [VDZ16a]

Abbildung 12: Entwicklung der NO_x-Emissionen (Jahresmittelwerte) und Substitutionsraten



⁽¹⁾ Feuerungswärmeleistung

Quelle: VDZ, eigene Darstellung, [OER]

Möglichkeiten zur effizienten Energienutzung und Minderung der CO₂-Emissionen

- ▶ Hochwertige Energienutzung infolge der hohen energetischen Effizienz des Klinkerbrennprozesses
- ▶ Minderung von CO₂-Emissionen aufgrund niedrigerer Emissionsfaktoren (bezogen auf den Energieinhalt)
- ▶ Zusätzliche Minderung der fossilen CO₂-Emissionen durch Nutzung biogener Bestandteile der Abfallstoffe
- ▶ Derzeit durchschnittliche Einsatzrate alternativer Brennstoffe: ca. 65 %
- ▶ Genehmigung zur Erhöhung der Einsatzrate auf 100 % alternativer Brennstoffe: ca. 20 Werke

Möglichkeiten zur Ressourcenschonung

- ▶ Einsparung fossiler Brennstoffe
- ▶ Verwertung organischer Dämmmaterialien
- ▶ Vollständige Nutzung der mineralischen Bestandteile („Brennstoffaschen“)
- ▶ Nutzung von Abfällen/Nebenprodukten aus anderen Industrieprozessen
- ▶ Reduzierung der Aufbereitungstiefe von alternativen Brennstoffen (ABS) und Hoch-kalorische Fraktionen durch geeignete Ofenanlagentechnik: Calcinator, PREPOL SC-Brennkammer, Vorbrennkammer, Hot-Disk
- ▶ Geeignete Abfälle für ABS: Rangfolge nach Aufwand
- ▶ Einsatz neuer zukünftiger Stoffströme nach POP-Verordnung (Persistente Organische Schadstoffe)
- ▶ Nutzen von mineralischen Fraktionen mit Organik (nicht ablagerungsfähig)
- ▶ Verwertung von Wärmedämmverbundsystem: Hexabromcyclododecan (HBCD) + Putz

Hydrothormaler Karbonisierung (HTC)

- ▶ Weitergehende Aufbereitung von Abfällen, wie z.B. mittels Vortrocknung oder Anwendung von HTC-Technologie, z.B. bei Klärschlamm
- ▶ HTC von Klärschlamm zur externen Trocknung mit Phosphorrückgewinnung
- ▶ Zementwerke als Alternative zu Klärschlamm-Monoverbrennung
- ▶ Potential Klärschlamm: Phosphorrückgewinnung, Markt derzeit nicht abschätzbar
HTC als externe Trocknung: geringer Energiebedarf, wenig Brüden

Voraussetzungen, unterstützende Faktoren und mögliche Hemmnisse in der Anwendbarkeit der Technologien

Unterstützende Faktoren

- ▶ Effizienzorientierte Rahmenbedingungen für verschiedene Verwertungsmöglichkeiten von Stoffströmen
- ▶ Beschreibung/Spezifikationen von Heizwert, Feuchte, Größe, Flugfähigkeit, Ausbrand
- ▶ Anerkennung der stofflichen Nutzung als Recycling
- ▶ Internationale Märkte

Voraussetzungen

- ▶ Ausreichende Verfügbarkeit von geeigneten Stoffen in angemessener Qualität
- ▶ Voraussetzung: Qualitätssicherung fester ABS, Fluff; weitere Spezialisierung der Brennstoffqualität
- ▶ Sorgfältige stoffliche und anlagenspezifische technische Vorabprüfung sowie Kenntnis über das Emissions- und Eintragsverhalten von organischen Komponenten und metallischen Spurenelementen beim Klinkerbrennprozess
- ▶ Optimierung des Brennstoffmix, Erhöhung ABS-Qualität
- ▶ Anerkennung der Hochwertigkeit stofflicher und thermischer Verwertung notwendig
- ▶ Gewährleistung der Kontrolle des stofflichen Eintrags sowie der Emissionen aus der Anlage im Dauerbetrieb
- ▶ Sicherstellung einer gleichbleibenden Qualität des Zementklinkers
- ▶ Weitergehende Verbesserung der Sammlung und Erfassung von Abfällen
- ▶ Weitere Entwicklung der Aufbereitungstechnik alternativer Brennstoffe (Flugfähigkeit, Feuchte)

Mögliche Hemmnisse

- ▶ Markt (global) vs. Abfallhierarchie; Realität vs. Recyclingquote
- ▶ Aufbereitung, bzgl. Flugfähigkeit und Feuchte
- ▶ Stoffstromsteuerung/Logistik
- ▶ Homogenisierung ABS
- ▶ Heizwertgrenze ABS
- ▶ Gasmengen, Schadstoffe, Korrosion, aufwändige Anlagentechnik vs. Aufwand zu Nutzung
- ▶ Umgang mit Restfeuchte Klärschlamm?, Einsatz von trockenem oder entwässertem Klärschlamm?
- ▶ HTC als neue Technologie: Referenzanlage fehlt für die Zementindustrie
- ▶ Lagersituation von Klärschlamm vor Ort
- ▶ Verfügbarkeit von C-haltigen Brennstoffen nach 2030 unklar
- ▶ Einstufung von Abfällen/Nachweispflicht
- ▶ Anlagenlayout
- ▶ Investment ROI

Synergien und Zielkonflikte mit weiteren rohstoff- und energieintensiven Industrien

Synergien:

- ▶ Umweltverträgliche Verwertung von als Abfall oder Nebenprodukt anfallenden Stoffen aus anderen Industrien
- ▶ Reduzierung von erforderlichem Deponieraum
- ▶ Ersatz braunkohlebasierter Primärbrennstoffe
- ▶ Mittelfristiger Ausstieg aus der Braunkohlemitverbrennung

Zielkonflikte:

- ▶ Erhöhter Energiebedarf zur Trocknung von alternativen Brennstoffen
- ▶ Regionale Verfügbarkeit von geeigneten Abfällen
- ▶ Klärschlamm Potential und verfügbare Mengen sind unklar
- ▶ Vorbehandlungsgebot für Gewerbeabfälle
- ▶ Wettbewerb um hochkalorische Abfälle mit Kraftwerken
- ▶ Vorgegebene hohe Recyclingquote
- ▶ Festgeschriebene Recyclingquote vs. Markt von Möglichkeiten des Recyclings
- ▶ Konkurrenz zu MVA (Müllverbrennungsanlagen, Monoverbrennung)
- ▶ Entsorgungsnotstand von Windradrotoren: Einsatz von Karbonfaserverstärkten Kunststoffen (CFK) in herkömmlichen Müllverbrennungsanlagen kaum möglich (Mangel an Zerkleinerungswerkzeugen, hoher Materialverschleiß, ggf. Verstopfung der Filter)

Projektbeispiele in Deutschland

- ▶ Möglicher Einsatz von CFK: UFOPLAN Vorhaben FKZ 3716 34 318 0: „Untersuchungen zu Möglichkeiten und Grenzen der Entsorgung Carbonfaserverstärkter Kunststoffabfälle in thermischen Prozessen unter Berücksichtigung möglicher Risiken im Umgang mit den prozessspezifischen Reststoffen“ (RWTH Aachen, KIT, TU Dresden, TH Nürnberg, VDZ)
- ▶ Zajons Logistik und Entsorgungsgesellschaft mbH: Testanlage zur Zerkleinerung von Windradrotorblättern
- ▶ Möglicher Einsatz von Windradrotorblättern: Testweiser Einsatz von aufbereiteten Rotorblätter als Brennstoff zur Klinkerherstellung zur Verwertung im Zementwerk Lägerdorf der Holcim (Deutschland) GmbH
- ▶ Vergasung von alternativen Brennstoffen, Zementwerk CEMEX Rüdersdorf: Das Zementwerk Rüdersdorf besitzt als einzige Anlage in Deutschland eine zirkulierende Wirbelschicht, in der die Vergasung von alternativen Brennstoffen erfolgt. Das erzeugte Synthesegas wird unmittelbar in den Kalzinator geführt und dient dort als Brennstoff. Zusätzlich zu den alternativen Brennstoffen werden mineralische Reststoffe in den Vergasungsreaktor aufgegeben. Die ausgebrannte Asche der zugeführten Brenn-/Reststoffe wird ausgetragen und als Rohstoffkomponente in die Rohmühle transportiert. [RUE]
- ▶ Einsatz von Bandtrockner mit Kühlerabluft zur Vortrocknung von Klärschlamm und Fluff: Zwei Bandtrockner in Betrieb
- ▶ Holcim Lägerdorf: PREPOL-SC (Precalciner POLYSIUS Step Combuster), mit Stufen ausgerüstete Brennkammer, Weitere Projektbeispiele
- ▶ Einsatzrate 100 % ABS im Ausland: Leube, Wopfung, Mannesdorf, Wietersdorf
- ▶ Projektbeispiel im Ausland: Rohoznik, Slowakei: Hot-Disc Technology for Co-Incineration of Coarse Substitute Fuels
- ▶ Umsetzung EU-Deponierichtlinie in Osteuropa

Einschätzung der Realisierbarkeit von Technologien bzw. Maßnahmen in Deutschland gemäß der Ergebnisse aus dem Workshop

- ▶ Stromerzeugung, Fern- und Nahwärmenutzung: vor 2030
- ▶ Externe Trocknung + Aufbereitung von Brenn- und Rohstoffen: vor 2030
- ▶ Steigerung der Einsatzrate alternativer Brennstoffe auf 100 %: vor 2030
- ▶ Neue Stoffströme: nicht konkretisiert
- ▶ Klärschlamm Potential, HTC: vor 2030

Förderliche Aspekte:

- ▶ Entfrachtung von Brennstoffen beim Hersteller alternativer Brennstoffe
- ▶ Getrennterfassung von Abfällen, z.B. Mischkunststoffe, Abfälle mit Elektronikanteil
- ▶ Anerkennung der stofflichen Nutzung hinsichtlich der Recyclingquoten, z.B. in Frankreich, Irland und Portugal: Insbesondere Berechnung der Ascheanteile von alternativen Brennstoffen und der mineralischen Materialmenge in Tonnen auf Basis der standardisierten Methode gemäß DIN EN 15403 "Solid recovered fuels. Determination of ash content" [DIN EN 15403]
- ▶ 2018: Kurzfristig (1 bis 2 Jahre) fehlende Abnahme von Kunststoffen durch China
- ▶ Derzeit: Nutzung von Materialien aus Frankreich, Italien wegen unvollständiger Umsetzung von Abfallrichtlinien

Hinderliche Aspekte:

- ▶ Unrealistische politische Einschätzung der zukünftigen Entwicklung in der Abfallwirtschaft
- ▶ Heterogene Qualität von alternativen Brennstoffen machen deren Einsatz schwieriger
- ▶ Störstoffe wie kleine elektronische Teile, z.B. Elektronik zur Kennzeichnung in Verpackungen
- ▶ Langfristig: Reduzierung von ausländischen Mengen für alternative Brennstoffe
- ▶ Hoher zusätzlicher Aufwand bezüglich Genehmigungen und Überwachung aus Anforderungen der Chemikalienrichtlinien (HBCD-Gehalt) und BREF Nachweis der Zerstörungseffizienz POP-Abfällen
- ▶ Sehr hoher Aufwand der Überwachung alternativer Brennstoffe, z.T. überproportionaler Probenahmeaufwand und Analysenhäufigkeit bezogen auf den Einsatz fossiler Brennstoffe und die meist dreifache Überwachung alternativer Brennstoffe: 1. bei der Materialherstellung und im Zementwerk sowohl 2. im Materialinput als auch 3. im Gasoutput
- ▶ Vermischungsverbot
- ▶ Ungleichbehandlung von Stromeinsatz zur Aufbereitung im EEG (ABS vs. Kohleherstellung) Stromsteuerbegünstigung nur einseitig
- ▶ Politische Risiken hinsichtlich Genehmigungspraxis

Forschungsansätze:

- ▶ Wie kann man Verbundmaterialien und Wärmeverbundmaterialien trennen?
- ▶ Praxisorientierte Studien zu Zerstörungseffizienz im Zementwerk bezogen auf Einsatz im Kalzinator: Zum Beispiel Forschungsprojekt Lägerdorf, Polychlorierte-Biphenyle-(PCB)-haltige Öle veröffentlicht Anfang 1990er Jahre
- ▶ Was passiert mit Quecksilber langfristig: Entwicklung angemessener Abscheidetechnologien in der Aufbereitung und im Zementwerk
- ▶ Änderungen der Qualität restlicher Abfälle u.a. durch Auflagen für Plastik-Recycling und hiernach möglicherweise erforderliche zusätzliche Aufbereitung alternativer Brennstoffe

Anmerkungen:

- ▶ Weiterführender Ausstieg aus der Abfalldeponierung in Europa wird den Einsatz alternativer Brennstoffe in Zementwerken erfordern

3.1 Einsatzstoffe

3.1.1 Einsatz von Industrie-/Gewerbeabfall und Siedlungsabfall

In Deutschland werden heute in fast allen Zementwerken aufbereitete Fraktionen aus Industrie- und Gewerbeabfällen als alternative Brennstoffe eingesetzt, im Jahr 2015 insgesamt etwa 1.874.000 t [VDZ15]. Unter die Bezeichnung Industrie-/Gewerbeabfall fallen z.B. Zellstoff, Papier, Kunststoffe, Verpackungen oder Abfälle aus der Textilindustrie oder sonstige Abfälle. Aufbereitete Fraktionen aus Industrie- und Gewerbemüll werden auch als Fluff (flugfähige Fraktionen) bezeichnet (s. Abbildung 13). Neben Industrie- und Gewerbeabfall wird auch Siedlungsabfall als alternativer Brennstoff im Klinkerbrennprozess genutzt. Etwa 317.000 t aufbereitete Fraktionen aus Siedlungsabfällen wurden in Deutschland im Jahr 2015 eingesetzt (durchschnittlicher Heizwert 16 MJ/kg) [VDZ15].

Abbildung 13: Fluff

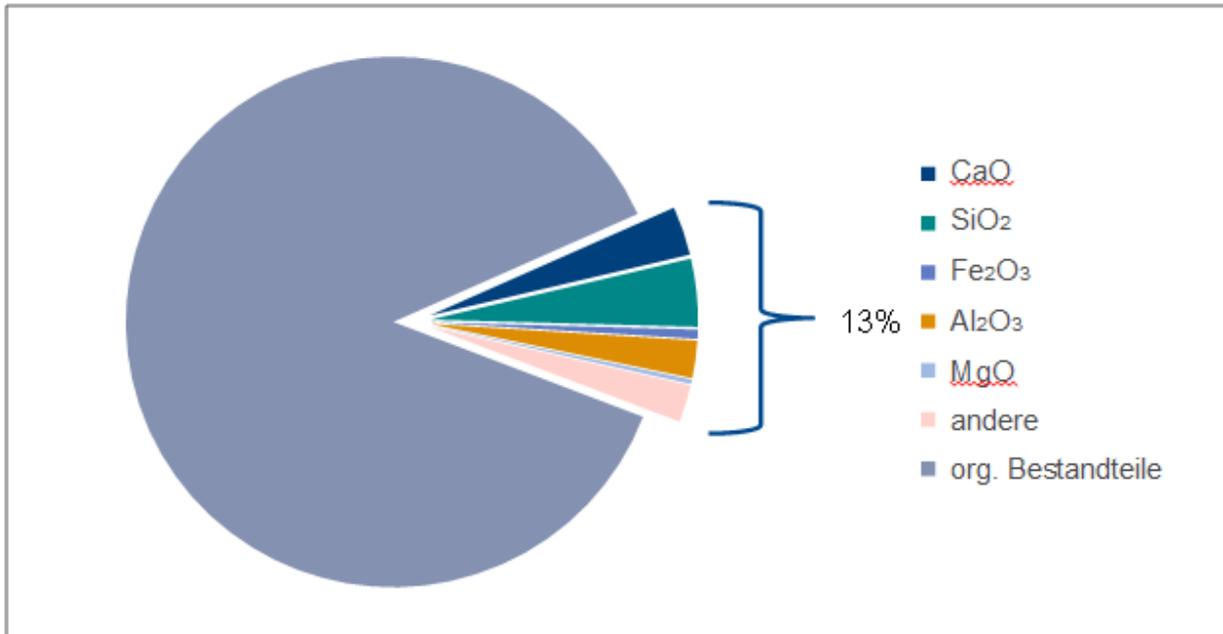


Quelle: VDZ, eigene Darstellung

Voraussetzung für den Einsatz im Klinkerbrennprozess ist eine geeignete Zusammensetzung der Abfälle, die vor Einsatz dementsprechend aufbereitet werden müssen, sowie ein definierter Heizwert und eine geeignete Partikelgröße. Die Brennstoffpartikel müssen flugfähig sein, um über die Verbrennungsluft und den Gasstrom transportiert werden zu können. Die Zusammensetzung der Abfälle wird üblicherweise an die jeweiligen Feuerungsstellen (z.B. grobe in den Kalzinator oder Ofeneinlauf, feinere in der Drehofenfeuerung) angepasst. Darüber hinaus dürfen die Abfallbestandteile (z.B. Chlor, Alkalien, Schwefel) den Prozess sowie die Produkteigenschaften nicht negativ beeinflussen. Die Einträge von Spurenelementen müssen in Bezug auf die Klinkerqualität und den Umweltaspekt überwacht und begrenzt werden. Insbesondere müssen die Chlorideinträge in das Ofensystem überwacht werden, da diese zu einer erhöhten Ansatzbildung im Ofensystem beitragen können. Eine Ansatzbildung kann sich negativ auf den Ofenbetrieb auswirken und den stabilen Ofenbetrieb beeinträchtigen. Es dürfen nur alternative Brennstoffe mit genehmigten Abfallschlüsseln eingesetzt werden. Die Abfallschlüssel sind in der Verordnung über das Europäische Abfallverzeichnis (Abfallverzeichnis-Verordnung) festgelegt. Bei der Verbrennung von Fluff im Klinkerbrennprozess entstehen etwa 13 % nicht-brennbare Bestandteile, die als Asche anfallen - bestehend aus Calcium-, Silizium-, Eisen-, Aluminium-, Magnesium- und andere Oxide - und für die Klinkererzeugung genutzt und in den Klinker eingebunden

werden (s. Abbildung 14). Durch die Nutzung der Aschen im Produkt werden beim Einsatz von Industrie- und Gewerbeabfall somit sowohl fossile Brennstoffe eingespart als auch primäre Ressourcen geschont.

Abbildung 14: Chemische Zusammensetzung von Fluff

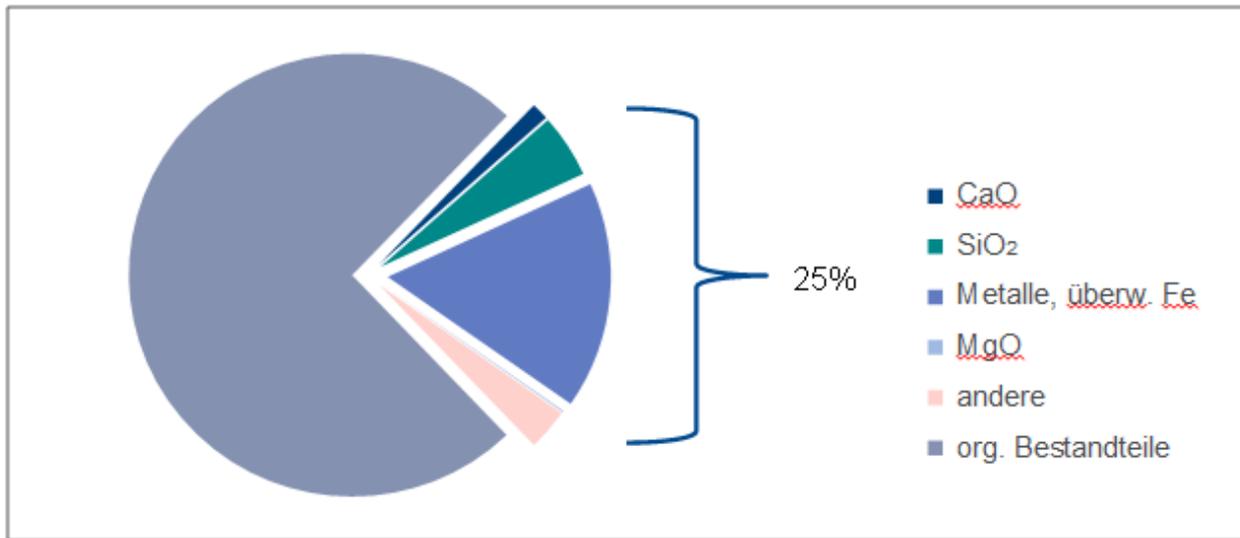


Quelle: VDZ, eigene Darstellung anhand von VDZ-Analysen

3.1.2 Einsatz von Altreifen

Zementöfen sind in der Lage, entweder ganze oder zerkleinerte Reifen als alternative Brennstoffe im Klinkerbrennprozess einzusetzen. Die einzelnen Reifenkomponenten werden im Klinkerbrennprozess gleichzeitig energetisch und stofflich verwertet. Altreifen werden in Deutschland bereits seit Beginn der 90-er Jahre als alternative Brennstoffe bei der Klinkerproduktion eingesetzt. Sie bestehen zu etwa 75 % aus brennbaren Anteilen und 25 % aus nichtbrennbaren Anteilen (s. Abbildung 15). Die brennbaren Anteile bestehen im Wesentlichen aus Gummi und natürlichem Kautschuk. Der Anteil an natürlichem Kautschuk bedingt, dass die aus der Verbrennung von Altreifen hervorgehenden CO₂-Emissionen zu etwa 27 % biogenen Ursprungs sind. Der nichtbrennbare Anteil besteht vor allem aus Eisen bzw. Stahl, der als Eisenkomponente für die Klinkerherstellung genutzt und damit stofflich verwertet wird.

Abbildung 15: Chemische Zusammensetzung von Altreifen

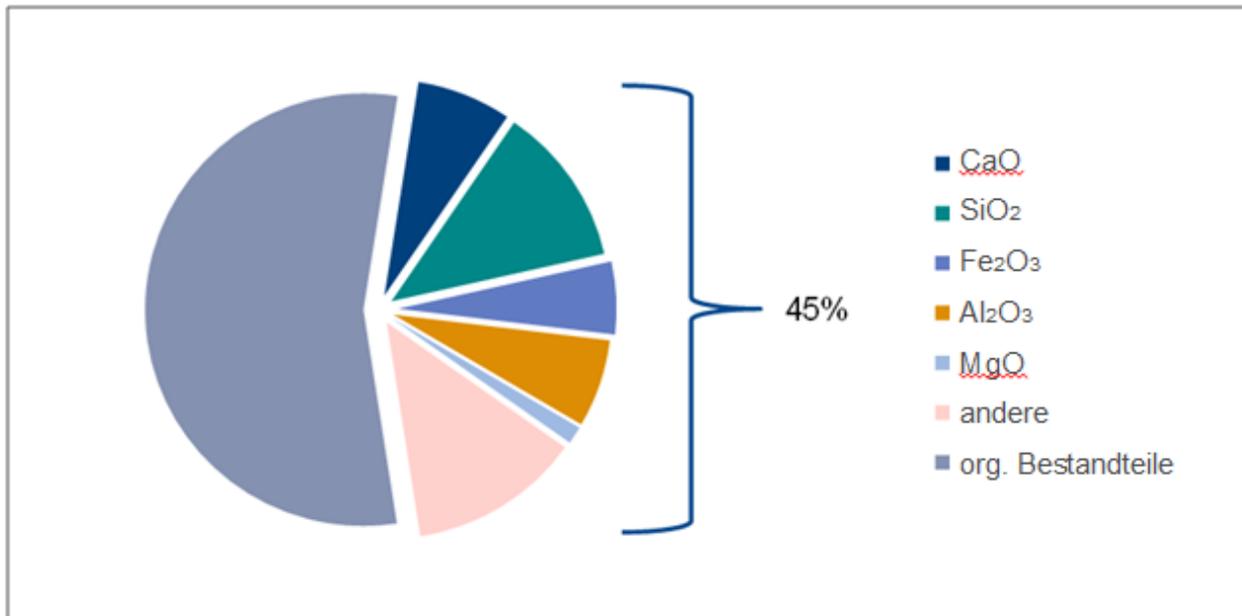


Quelle: VDZ, eigene Darstellung anhand von VDZ-Analysen und [ETR]

3.1.3 Einsatz von Klärschlamm

Klärschlamm wird in Zementwerken seit 2002 als alternativer Brennstoff zur thermischen Energieerzeugung im Klinkerbrennprozess eingesetzt. Dazu wird der Klärschlamm entwässert, thermisch getrocknet (Klärschlammgranulat) oder mechanisch entwässert. In den deutschen Zementwerken wurden im Jahr 2015 rund 382.000 t Klärschlamm bei der Klinkerherstellung eingesetzt [VDZ15]. Der inerte Anteil des Klärschlammes wird dabei vollständig stofflich genutzt. Die Qualität des Klärschlammes wird u.a. durch den Herkunftsort (Haushalte, Gewerbe- oder Industriebetriebe), Art der Abwasserreinigung sowie Menge und Art der Oberflächenabschwemmungen bestimmt [SCA]. Die Beschaffenheit und der Heizwert hängen vom Wassergehalt des Klärschlammes ab. Klärschlamm mit einem Feuchtegehalt von etwa 10 % besitzt in der Regel einen Heizwert von etwa 11 MJ/kg [SCA]. In den letzten Jahren konnten europaweit durch strengere gesetzliche Regelungen und auch durch ein besseres Verständnis der Abwassererursacher die Schwermetallgehalte reduziert und somit die Qualität des Klärschlammes deutlich verbessert werden. Insbesondere ist die Minderung der Quecksilbergehalte im Klärschlamm für den Einsatz in der Zementindustrie von wesentlicher Bedeutung [SCA]. Abbildung 16 zeigt die chemische Zusammensetzung von getrocknetem Klärschlamm. Im Klinkerbrennprozess fallen etwa 45 % nichtbrennbare Bestandteile an (Calcium-, Silizium-, Eisen-, Aluminium-, Magnesium- und andere Oxide), die für die Klinkererzeugung genutzt und in den Klinker eingebunden werden.

Abbildung 16: Chemische Zusammensetzung von getrocknetem Klärschlamm



Quelle: VDZ, eigene Darstellung anhand von VDZ-Analysen

Üblicherweise wird thermisch getrockneter Klärschlamm (Klärschlammgranulat, Trockensubstanz ca. > 85 %) als Brennstoff eingesetzt, der oft im trockenen Zustand angeliefert und im Brennprozess energetisch verwertet wird (s. Abbildung 17). In wenigen Zementwerken wird mechanisch entwässerter Klärschlamm angeliefert [HOEa]. Im Jahr 2015 wurde in Deutschland in zehn Zementwerke getrockneter und in vier Werken mechanisch entwässerter Klärschlamm angeliefert. Mechanisch entwässerter Klärschlamm kann einerseits direkt eingesetzt und dabei prozessintern getrocknet werden. Andererseits kann, wenn Abwärme aus dem Klinkerbrennprozess zur Verfügung steht, der mechanisch entwässerte Klärschlamm vor Einsatz getrocknet werden. Dadurch wird der Heizwert des Klärschlammes erhöht und die Verbrennung begünstigt (s. auch Kapitel 1.2.4).

Abbildung 17: Klärschlamm, links getrocknete Klärschlamm pellets (Trockensubstanz > 85 %); rechts feuchter Klärschlamm (Trockensubstanz < 30 %)



Quelle: VDZ, eigene Darstellung

3.1.4 Zukünftige Pflicht zur Phosphorrückgewinnung aus Klärschlämmen

Die am 18.01.2017 beschlossene Verordnung zur Neuordnung der Klärschlammverwertung (Neufassung der Klärschlammverordnung - AbfKlärV) enthält umfassende Vorgaben zur Rückgewinnung von Phosphor aus Klärschlämmen und Klärschlammverbrennungsaschen. Diese Vorgaben müssen Betreiber von Abwasserbehandlungs- oder Klärschlammverbrennungsanlagen nach einer bestimmten Übergangsfrist berücksichtigen.

Bestimmte Technologien zur Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm sind in der Verordnung nicht genannt. Durch die zukünftige Pflicht der Phosphorrückgewinnung soll der Phosphor umfassender als bislang in den Wirtschaftskreislauf zurückgeführt werden. Gleichzeitig sollen die Schadstoffe aus dem Kreislauf entfernt und damit eine Verringerung des Schadstoffeintrags in den Boden erreicht werden. Da derzeit Phosphor fast ausschließlich aus endlichen Phosphor-Lagerstätten gewonnen und der weltweite Phosphorbedarf vermutlich ansteigen wird, werden Technologien zur Phosphorgewinnung diskutiert und untersucht. Ein entscheidendes Hindernis ist hierbei die Wirtschaftlichkeit. Die Neufassung der Klärschlammverordnung könnte Auswirkungen auf die thermische Verwertung von Klärschlamm in Zementwerken haben, da der in der Asche enthaltene Phosphor des Klärschlammes bei der Klinkerherstellung fest in den Klinker eingebunden wird und somit nach dem Klinkerbrennprozess nicht mehr zurückgewonnen werden kann. Eine Phosphorkonzentration im Klinker von bis zu 1,5 Masse-% fördert die Klinkerbildung während des Brennprozesses.

3.1.5 Anwendung von Hydrothormaler Karbonisierung bei Klärschlamm

Eine Möglichkeit zur Phosphorrückgewinnung stellt die Hydrothermale Karbonisierung (HTC-Technologie) dar, bei der der Klärschlamm bis zu 90 % in brennbare Biokohle umgewandelt und anschließend Phosphor zurückgewonnen werden kann. Die Biokohle, die weitgehend CO₂-neutral, lager- und transportfähig ist, kann mit einem Heizwert von etwa 12 bis maximal 24 MJ/kg als alternativer Brennstoff in Zementwerken eingesetzt werden [KLA, ECRA]. Bei der HTC wird der Klärschlamm im nassen Zustand einem Prozess unter Druck und erhöhter Temperatur zugeführt. Die hierfür benötigte Energie kann zu einem großen Teil aus dem Klärschlamm selbst bereitgestellt werden. Ein Vorteil ergibt sich aus dem deutlich erhöhten Heizwert der sogenannten HTC-Kohle. Allerdings ist für deren Entwässerung und Trocknung zunächst ein zusätzlicher Energieaufwand erforderlich. Der HTC-Prozess könnte zukünftig zusätzlich eine Phosphor-Rückgewinnung von über 80 % aus der im Prozess erzeugten HTC-Kohle mit Hilfe von Säuren ermöglichen. Prinzipiell könnte der Phosphor anschließend zu Dünger verarbeitet werden [KLA]. Die Technologien zur Phosphorrückgewinnung durch Anwendung der HTC-Technologien befinden sich noch in der Entwicklung und sind aus heutiger Sicht noch weit von einem ökonomischen praktikablen Ansatz zur Phosphor-Rückgewinnung entfernt.

Durch den Einsatz von HTC-Kohle mit erhöhtem Heizwert könnten in Zementwerken weitere fossile Brennstoffe im Klinkerbrennprozess eingespart und somit Ressourcen geschont werden. Der anorganische Gehalt der HTC-Kohle trägt zur Zusammensetzung des Klinkers bei. Allerdings ist eine mögliche Zunahme des Chlor- oder Schwefeleintrags in den Klinkerbrennprozess zu beachten. Derzeit begrenzen die hohen Kosten des HTC-Prozesses seine wirtschaftliche Anwendung. Zukünftige Weiterentwicklungen und Optimierungen der hydrothermalen Karbonisierung könnten die Kosten senken. Eine erste Pilotanlage wurde in Deutschland in Betrieb genommen. Neben Klärschlamm sind möglicherweise auch weitere nasse Biomassen für die hydrothermale Karbonisierung geeignet.

3.1.6 Potentiell neuer alternativer Einsatzstoff: Carbonfaserverstärkte Kunststoffe

Carbonfaserverstärkte Kunststoffe (CFK) werden überwiegend in der Luft- und Raumfahrttechnik oder im Fahrzeugbau als Metallsatz eingesetzt. Die Herstellung dieser Kunststoffe ist sehr energie- und kostenintensiv. Für die Entsorgung des CFK-Abfalls und insbesondere für die Aufbereitung der Fasern zur Wiederverwertung ohne Qualitätsverlust der Fasern existiert bislang kein technisches Verfahren. Derzeit wird in Deutschland ein Forschungsprojekt² durchgeführt (voraussichtlicher Abschluss in 2019), in dem potentielle Verwertungs- bzw. Entsorgungswege untersucht werden.

Im Rahmen dieses Projekts werden Versuche zur Verbrennung von CFK in großtechnischen Anlagen - Hausmüllverbrennung, Sonderabfallverbrennung und in einem Zementdrehrohrofen zur Klinkerproduktion - durchgeführt und ausgewertet [CFK].

3.1.7 Potentiell neuer alternativer Einsatzstoff: Windradrotorblätter

Rotorblätter bestehen aus Verbundstoffen, die hauptsächlich Glasfasern und Kunststoff enthalten. Das Recycling oder Verbrennen in herkömmlichen Müllverbrennungsanlagen ist kaum möglich, da es einen Mangel an Zerkleinerungswerkzeugen gibt und mit einem hohen Materialverschleiß zu rechnen ist [HOL]. Ebenso könnte das Material die Filter der Anlagen verstopfen. Bei der Verwertung der aufbereiteten Rotorblätter ersetzt eine Tonne Rotorblattmaterial etwa 600 kg Kohle. Die Harze, die die Rotorblätter enthalten, werden dabei als Brennstoff genutzt. Die anfallende Asche wird im Klinkerbrennprozess vollständig stofflich genutzt und zum Bestandteil des Klinkers. Das Silizium aus der Glasfaser ersetzt hierbei den üblicherweise eingesetzten natürlichen Sand als Korrekturstoff in der Rohmaterialmischung [HOL].

3.2 Technologien zur Verbesserung des Einsatzes alternativer Brennstoffe

3.2.1 Sauerstoffeindüsung bei Drehofenanlagen

Neben dem Einsatz von alternativen Brennstoffen wurden Untersuchungen durchgeführt, die Verbrennungsluft (Primärluft) gezielt mit Sauerstoff anzureichern. Die gezielte Anreicherung der Verbrennungsluft mit Sauerstoff in der Drehofenfeuerung stellt grundsätzlich eine technische Möglichkeit dar, den Alternativbrennstoffeinsatz zu optimieren, die Prozessstabilität zu verbessern und negative Auswirkungen auf die Produktqualität zu vermeiden [HOEb]. Einige Zementwerke haben diese Technologie über mehrere Jahre genutzt. Allerdings ist die Wirtschaftlichkeit nur unter gewissen Umständen gegeben (z.B. Sauerstoffpreis). Außerdem hat sich das Know-How vieler Werke soweit weiterentwickelt, dass der O₂-Einsatz z.T. nicht mehr erforderlich ist. Anzumerken ist, dass die O₂-Herstellung mittels Luftzerlegung ein sehr energieintensiver Prozess ist.

² UFOPLAN Vorhaben: FKZ 3716 34 318 0; „Untersuchungen zu Möglichkeiten und Grenzen der Entsorgung Carbonfaser-verstärkter Kunststoffabfälle in thermischen Prozessen unter Berücksichtigung möglicher Risiken im Umgang mit den prozessspezifischen Reststoffen“

3.2.2 Vorbehandlung von Brennstoffen

Brennstoffe müssen je nach Eigenschaft und Aufgabeort (Kalzinator, Ofeneinlauf, Ofenhauptbrenner) getrocknet und gemahlen werden, bevor sie dem Klinkerbrennprozess zugeführt werden. Zur Vortrocknung von Klärschlamm oder Fluff werden in Deutschland Bandtrockner verwendet, die mit Klinkerkühlerabluft betrieben werden. Ein Vorteil dieser Vortrocknung ist, dass die Feuchte der Brennstoffe vor der Verbrennung und somit das benötigte Ofenabgasvolumen reduziert werden kann. Dies führt insgesamt zu einem geringeren Energiebedarf für das Hauptgebläse im Ofen. Für die gleichzeitige Trocknung und Mahlung von Brennstoffen werden derzeit weltweit Mühlentypen entwickelt, die mit Abgasen aus dem Klinkerbrennprozess (z.B. Ofenabwärme, Kühlerabluft) betrieben werden können. Bislang existiert in einem deutschen Zementwerk eine Schneidmühle mit integrierter Trocknung für den Brennstoff Fluff.

3.2.3 Vorverbrennung oder Vergasung von alternativen Brennstoffen

Mit der Vorverbrennung oder Vergasung von alternativen Brennstoffen können zur Klinkererzeugung Brennstoffe genutzt werden, die normalerweise aufgrund ihrer Eigenschaften (Homogenität, Heizwert, Feuchtegehalt, Schadstoffgehalte) für den Klinkerbrennprozess nicht geeignet sind. Die beiden Verfahren finden in Deutschland bisher in insgesamt zwei Zementwerken Anwendung.

Bei der Vorverbrennung werden alternative Brennstoffe mit Sauerstoffüberschuss (ca. 21 % Sauerstoff) und hohen Temperaturen (ca. 1.200 °C) in einer Brennkammer verbrannt. Die dabei entstehende Energie kann anschließend im Kalzinator zur Verbrennung weiterer alternativer Brennstoffe genutzt werden.

Bei der Vergasung werden alternative Brennstoffe in einer Brennkammer, die dem Kalzinator vorgeschaltet ist, in einer sauerstoffarmen Atmosphäre verbrannt um Synthesegas zu erhalten.

Das Synthesegas enthält CO, H₂ und CH₄ und wird im Kalzinator als Brennstoff genutzt. Bei der Vergasung können Brennstoffe mit einem Heizwert von z.B. 4,5 bis 6,0 MJ/kg ohne Vorbehandlung eingesetzt werden, vorausgesetzt sie weisen einen geringen Feinkornanteil auf, lassen sich gut dosieren und enthalten keine metallischen Partikel [ECRA].

4 Einsatz alternativer Rohstoffe in der Klinkererzeugung

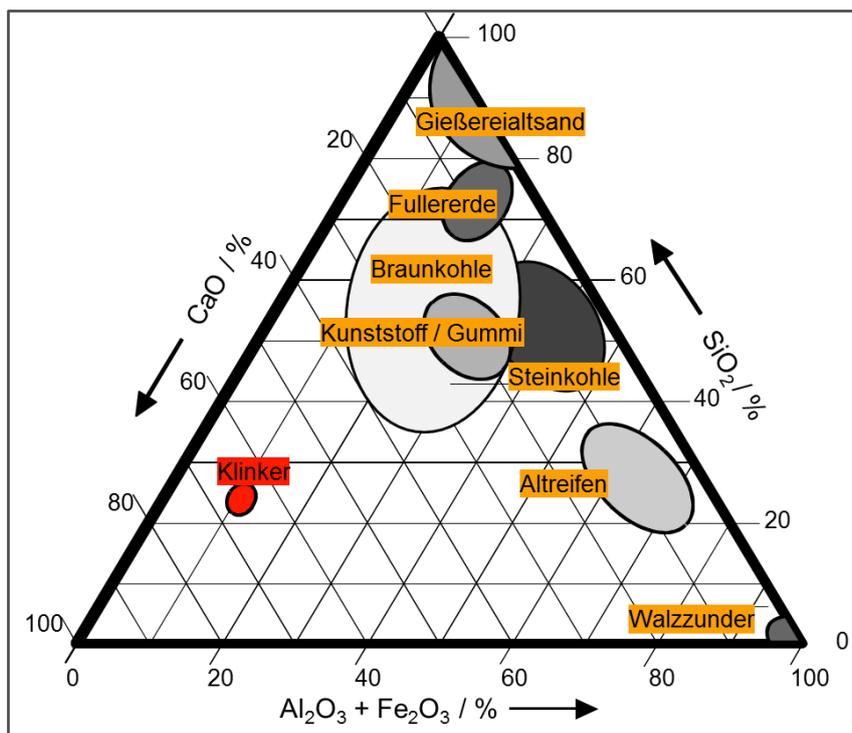
Zur Klinkererzeugung eignen sich neben natürlichen Rohstoffen auch verschiedene alternative Rohstoffe. Die wichtigsten natürlichen Rohstoffe sind Kalkstein oder Kreide und Ton bzw. Mergel, die sich aus Kalkstein und Tonen zusammensetzen. Abhängig von der Rohstoffsituation am jeweiligen Standort müssen dem Rohmaterial Korrekturstoffe zugegeben werden, um die erforderliche Rohmaterialzusammensetzung zu erzielen und fehlende Bestandteile auszugleichen [UBT]. Ein Teil der Rohmaterialmischung kann dabei durch alternative Rohstoffe ersetzt werden. Mit dem Einsatz von alternativen Rohstoffen, die kalziumhaltig und bereits entsäuert sind, ist eine Reduzierung von CO₂-Emissionen möglich. Der Einsatz alternativer Rohstoffe darf dabei die Leistungsfähigkeit des Produktes Klinker nicht beeinträchtigen oder seine geforderte Qualität gefährden.

Für eine sichere, umweltverträgliche und ressourcenschonende Verwertung alternativer Rohstoffe, sind stoffliche und anlagenspezifische Vorprüfungen, die Kenntnis über das Emissionsverhalten von organischen und metallischen Bestandteilen und insbesondere die Gewährleistung einer gleichbleibenden Klinkerqualität notwendig. Ein geeigneter Einsatz alternativer Rohstoffe erfordert grundsätzlich:

- ▶ Informationen zu Herkunft, Art und Menge
- ▶ Prüfung der Stoffe auf umweltrelevante Inhaltsstoffe
- ▶ Lagerung, Aufbereitung und Vorbehandlung
- ▶ Wahl des geeigneten Aufgaborte
- ▶ Probetrieb
- ▶ Qualitätskontrolle im Probe- und Dauerbetrieb
- ▶ Überwachung der Emissionen

In Abbildung 18 sind die chemische Zusammensetzung des Klinkers sowie die Aschezusammensetzung ausgewählter Brennstoffe und alternativer Rohstoffe in einem Dreistoffdiagramm dargestellt.

Abbildung 18: Chemische Zusammensetzung des Klinkers sowie Aschezusammensetzung ausgewählter Brennstoffe und alternativer Rohstoffe



Quelle: VDZ, eigene Darstellung, [UBT]

Die alternativen Rohstoffe können hinsichtlich ihrer chemischen Zusammensetzung in verschiedene Gruppen unterteilt werden. Die Gruppen sind nach dem chemischen Element bezeichnet, das der alternative Rohstoff überwiegend erhält und das in der Zusammensetzung der Rohmaterialmischung mengenmäßig überwiegt. In einer Studie³ [UBT] ist die folgende Einteilung und Beschreibung der Rohstoffe vorgenommen worden:

Ca-Gruppe: z.B. Industriekalk, Kalkschlämme, Karbidschlamm, Trinkwasserschlämme

In der Ca-Gruppe werden verschiedene Kalkschlämme und Industriekalke zusammengefasst. Kalkschlämme können aus der Produktion und Verarbeitung von Kalk sowie aus der Abgasreinigung oder Wasseraufbereitung stammen. Bei Kalkschlämmen aus der Trinkwasseraufbereitung zur Nahrungsmittelindustrie kann der Feuchtigkeitsgehalt im Anlieferungszustand von 20 bis 50 Massen-% betragen, was dem Material eine pumpfähige Konsistenz verleiht. Je höher der Wassergehalt ist, desto mehr Energie muss aufgewendet werden, um das Material in der Ofenanlage zu trocknen.

Si-Gruppe: z.B. Gießereialtsande, Chromsand, Mikrosilica, Kieselsäure- und Quarzabfälle, Sandfangrückstände

In der Si-Gruppe spielen Gießerei-Altsande eine wichtige Rolle. Bei der Eisengussproduktion und auch NE-Metallgussproduktion werden Sandformen verwendet, die nach dem Abguss zerstört werden. Obwohl rund 90 % der verwendeten Form- und Kernsande im Kreislauf geführt werden, fallen bei diesen Produktionen große Mengen Gießerei-Altsande als Reststoffe an. Diese Altsande werden z.B. im Straßen- oder Wegebau, als Verfüllmaterial in Schachtanlagen oder auch als alternativer Rohstoff in der Zementindustrie eingesetzt. Im Klinkerbrennprozess können sie als SiO₂-Träger den Rohstoff Quarzsand ersetzen. Darüber hinaus sind aber auch Reste bzw. Abbauprodukte der Formbindermaterialien (z.B. Betonit, Kunstharze), Gießereihilfsstoffe und auch Spuren der abgegossenen Metalle enthalten. Ein weiterer alternativer Rohstoff in der Si-Gruppe ist Mikrosilica. Es handelt sich um ein Nebenprodukt der Silizium- und Ferrosiliziumherstellung, das zu 80 bis 99 % aus SiO₂ besteht. Darüber hinaus können noch Al₂O₃ (0,5 bis 3 %), Fe₂O₃ (0,1 bis 5 %) und CaO (0,7 bis 2,5 %) enthalten sein.

Fe-Gruppe: z.B. Kiesabbrand, Hämatit, Rotschlamm, Zinnschlacke, Konverterschlacke, Walzzunder

Die in der Fe-Gruppe aufgeführten alternativen Stoffe stammen überwiegend aus Röstprozessen, aus der Metallurgie oder aus dem Hochofenprozess der Stahlindustrie. Der Fe₂O₃-Gehalt liegt oft im Bereich von 70 bis 90 %. Bestimmte Schlacken oder Schlämme weisen z.T. Gehalte zwischen 40 und 60 % auf und enthalten dann auch SiO₂, Al₂O₃ und Alkalien. Aufgrund ihrer Herkunft aus unterschiedlichen metallurgischen Prozessen können Stoffe der Fe-Gruppe Schwermetalle enthalten, die über den Gehalten der natürlichen Einsatzstoffe liegen.

Si-Al-Ca-Gruppe: z.B. Flugaschen, Wirbelschichtasche, Schlacken, Brechsande, Reststoffe aus der Natursteinaufbereitung, Bleicherde, verunreinigte Böden, Aluminiumoxidschlämme

In der Si-Al-Ca-Gruppe sind insbesondere Steinkohlenflugaschen und Schlacken von besonderer Bedeutung. Steinkohlenflugaschen fallen bei der Entstaubung der Rauchgase von Steinkohlekraftwerken an. Die Flugaschen werden überwiegend als Zusatzstoff im Beton verwendet, doch geringere Mengen werden auch in der Klinker- und Zementherstellung eingesetzt (ca. 10 %). Dabei kann die Steinkohlenflugasche als Hauptbestandteil in Flugaschezementen oder auch als alternative Rohstoffkomponente im Klinkerbrennprozess dienen.

³ Einsatz alternativer Rohstoffe im Zementherstellungsprozess – Hintergrundwissen, technische Möglichkeiten und Handlungsempfehlungen (VDZ, VÖZ) [UBT]

S-Gruppe: z.B. REA-Gips, Chemiegips

In der S-Gruppe sind vor allem Gipsprodukte von Bedeutung, nämlich der REA-Gips aus Rauchgasentschwefelungsanlagen (REA) im Kraftwerksbereich und Chemiegips, der in der chemischen Industrie anfällt. REA-Gips fällt bei der Entschwefelung (SO₂-Minderung) der Abgase von Kraftwerken oder in anderen industriellen Anlagen an. Dabei werden calciumhaltige Stoffe wie gemahlener Kalkstein, Kalkhydrat oder Kalkmilch in den Abgasstrom eingedüst. Das im Abgas enthaltene SO₂ reagiert mit der Ca-Verbindung und bildet den REA-Gips, der hauptsächlich in der Gipsindustrie weiterverwendet wird, aber auch als Sulfatträger in der Zementindustrie eingesetzt wird. Chemiegipse fallen z.B. bei Produktionsprozessen in der chemischen Industrie als Koppel- oder Nebenprodukt an, z.B. bei der Herstellung von Phosphorsäure oder Flußsäure. REA-Gips wird häufig anstelle von Anhydrit oder Natursgips in der Zementherstellung eingesetzt. Bei der Klinkerherstellung wird die Schwefelzufuhr auf den Input der Alkalien eingestellt, um diese als Alkalisulfate in den Klinker einzubinden.

F-Gruppe: z.B. CaF₂-Filterschlämme

In der F-Gruppe sind Calciumfluorid-haltige Stoffe angesiedelt, die z.B. in der Glasindustrie oder bei der Verbrennung fluoridhaltiger Stoffe in den dort installierten Abgasreinigungseinrichtungen anfallen können. In einzelnen Zementwerken werden solche CaF₂-haltigen Stoffe als Alternative zu natürlich vorkommendem Flussspat als Mineralisator und Flussmittel eingesetzt, um die Sinterung des Brennguts zu verbessern und die Viskosität der Schmelze zu vermindern. Dadurch wird die erforderliche Brenntemperatur vermindert und als Nebeneffekt die Bildung von NO_x verringert. Bei Fluoridgehalten von bis zu 1 Massen-% F⁻ in der Ofenaufgabe wird die Sintertemperatur um ca. 150 °C abgesenkt [ECRA].

Verfügbarkeit industrieller Nebenprodukte zum Einsatz in den Zementherstellungsprozess

Die langfristige zukünftige und regionale Verfügbarkeit von industriellen Nebenprodukten, insbesondere aus Kraftwerken und Hochofenprozessen, die als Rohstoffkomponente eingesetzt werden können, ist begrenzt. Der Bundesverband Baustoff - Steine und Erden e.V. veröffentlichte im Jahr 2016 eine Studie, in der die Verfügbarkeit von natürlichen Rohstoffen und industriellen Nebenprodukten bis 2035 prognostiziert wurden [KRB]. Im Folgenden sind die prognostizierten Verfügbarkeiten von industriellen Nebenprodukten aus der Studie zusammengestellt:

Hochofenschlacke: In den Jahren 2000 bis 2013 lag die produzierte Menge an Hochofenschlacke bei etwa 7,4 Mio. t. Bis 2035 wird das Aufkommen auf 6,7 Mio. t bis 8,9 Mio. t prognostiziert. Im Klinkerbrennprozess wurden im Jahr 2015 etwa 4,6 Mio. t granuliert Hochofenschlacke (Hüttensand) eingesetzt. Die Entwicklung der Roheisenproduktion in Deutschland ist maßgebend.

Stahlwerksschlacke (LD-Schlacke und Elektroofenschlacke): Das Aufkommen von Stahlwerksschlacke lag in den Jahren 2000 bis 2013 bei durchschnittlich etwa 6,0 Mio. t. Für ab 2030 bzw. 2035 wird ein Aufkommen von 4,9 Mio. t bis 6,6 Mio. t prognostiziert.

Steinkohlenflugasche: Im Jahr 2013 fielen 3,2 Mio. t Aschen aus der Steinkohlenfeuerung an. Auf Basis von Daten aus der BMWi-Energierferenzprognose wird sich die Verfügbarkeit schrittweise verringern. So werden voraussichtlich im Jahr 2020 noch 2,8 Mio. t Flugasche entstehen, im Jahr 2035 lediglich noch 2,2 Mio. t. Die Entwicklung der verfügbaren Menge an Steinkohlenflugasche wird maßgeblich durch die deutsche Energiepolitik („Energiewende“) bestimmt.

Sonstige Aschen aus der Müllverbrennung und der Verfeuerung von Ersatzbrennstoffen: Im Jahr 2013 belief sich die Menge dieser Aschen auf ca. 5,6 Mio. t. Das Aufkommen der Asche bis zum Jahr 2035 kann nur schwer abgeschätzt werden. Es hängt wesentlich von der zukünftigen Abfallpolitik ab. Es wird geschätzt, dass das Gesamtaufkommen in 2035 noch etwa 5 Mio. t betragen könnte.

REA-Gips: In den Jahren 2001 bis 2013 wurden durchschnittlich etwa 7,1 Mio. t REA-Gips pro Jahr produziert. Aufgrund des zukünftigen zu erwartenden Rückgangs der Stromerzeugung in Braun- und Steinkohlenkraftwerken, muss auch mit einem Rückgang von REA-Gips gerechnet werden. Bis 2030 sinkt das Aufkommen auf 6,3 Mio. t. Für die nachfolgenden Jahre wird ein REA-Gips-Aufkommen von etwa 3,3 bis 5,3 Mio. t abgeschätzt.

Gießereialtsande: In den Jahren 2000 bis 2013 wurden zwischen 1,2 Mio. t und 2,2 Mio. t Gießereialtsande produziert. Bis 2035 wird das Aufkommen auf 1,7 Mio. t bis 2,3 Mio. t prognostiziert.

Voraussetzung zur Nutzung industrieller Nebenprodukte hinsichtlich Emissionen und Umweltschutz

Grundlegende Anforderungen an den Betrieb von Anlagen zur Herstellung von Klinker und Zement in Deutschland regelt die Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft (TA Luft). Die Emissionen von Zementwerken, die Abfälle mitverbrennen, werden darüber hinaus durch die 17. BImSchV geregelt. Alternative Rohstoffe, die im Zementherstellungsprozess eingesetzt werden, wie z.B. Abfälle mit relevanten organischen Verbindungen, sollen gemäß der TA Luft dem Prozess über den Ofeneinlauf oder den Kalzinator zugeführt werden. Die Emissionen organischer Komponenten (Gesamtgehalt an organischem Kohlenstoff, total organic carbon, TOC) sind in der Zementindustrie aufgrund des großen Massenstroms hauptsächlich rohmaterialbedingt. Alternative Rohstoffe können in Abhängigkeit ihrer Herkunft höhere Gehalte an organischen Bestandteilen im Vergleich zu natürlichen Rohstoffen aufweisen. Bei Aufheizung der alternativen Rohstoffe werden die darin enthaltenen organischen Stoffe im Vorwärmer freigesetzt und können somit - aufgrund eines nicht ausreichenden Temperaturniveaus - (teilweise) in das Abgas und in die Emissionen der Anlage gelangen. Daher ist jeweils zu prüfen, inwieweit der alternative Rohstoff leicht flüchtige oder toxische organische Bestandteile enthält, um ggf. den Aufgabebereich festlegen zu können, an dem die Verbrennung von organischen Verbindungen im Klinkerbrennprozess sichergestellt werden kann [UBT].

Grundsätzlich können alternative Rohstoffe im Brecher, Rohmühle, Vorwärmer, Kalzinator, Ofeneinlauf und im Ofenkopf aufgegeben werden. Sie können auch direkt dem Rohmaterialgemisch vor der Rohmühle bzw. direkt der Mühle zugeführt werden, vorausgesetzt ihr Gehalt an leichtflüchtigen oder organischen Verbindungen sind unkritisch. Die alternativen Rohstoffe sollten kontinuierlich und gleichmäßig zugeführt werden, um einen stabilen Betrieb des Klinkerbrennprozesses und eine gleichbleibende Produktqualität zu gewährleisten sowie Umwelteinwirkungen zu minimieren. Werden die alternativen Rohstoffe direkt dem Ofeneinlauf oder Kalzinator (Heißbereich) zugegeben, können organische Emissionen vermieden werden.

Möglichkeiten zur effizienten Energienutzung

- ▶ Kohlenstoffanteile in alternativen Rohmaterialien können gleichzeitig energetisch genutzt werden
- ▶ Einsatz Müllverbrennungsasche: ggf. Einsparung von Mahlergie

Möglichkeiten zur Ressourcenschonung

- ▶ Einsparung natürlicher Rohstoffe
- ▶ Sinnvolle Nutzung von in anderen Industrieprozessen erzeugten Nebenprodukten oder anfallenden Abfällen
- ▶ Optimierung der Wirtschaftlichkeit des Herstellungsprozesses
- ▶ Gezielte Förderung der Qualität und Leistungsfähigkeit des Produkts für effizienten Produkteinsatz
- ▶ Positiver Beitrag zur Kreislaufwirtschaft
- ▶ Einsatz von Müllverbrennungsaschen: gute Rohstoffverfügbarkeit, dadurch Rohstoffersparnis

- ▶ Müllverbrennungsaschen: Hauptbestandteile der verbleibenden mineralischen Restfraktion der MVA-Aschen könnten, ggf. teilweise, die Tonkomponente bei der Klinkererzeugung ersetzen

Voraussetzungen, unterstützende Faktoren und mögliche Hemmnisse in der Anwendbarkeit der Technologien

Voraussetzungen:

- ▶ Untersuchung und Weiterentwicklung möglicher neuer Materialien
- ▶ Entwicklung von Technologien zur Entfrachtung von Abfallströmen
- ▶ Konstante Qualität und Mengen sowie regionale Verfügbarkeit erforderlich
- ▶ Klärung der Anforderungen an Schlacke (z.B. aus der Müllverbrennung) für den Einsatz in der Klinkererzeugung
- ▶ Definition der technischen und chemischen Rahmenbedingungen beim Einsatz von Glasfaserhaltigen Kunststoffen (GFK) wie Produktionsabfälle oder Windradrotorblätter
- ▶ Gewährleistung des Arbeitsschutzes

Mögliche Hemmnisse:

- ▶ Verfügbarkeit geeigneter Stoffe: Alternativer Rohstoff muss zum standortspezifischen Rohmaterial passen
- ▶ Verfügbarkeit der Menge mancher alternativer Rohstoffe langfristig und regional (mit Blick auf den Transportaufwand) begrenzt
- ▶ Nicht verträgliche Inhaltsstoffe (z.B. Schwermetallgehalt)
- ▶ Intensive Aufbereitungstechnik bei Schlacke-Aufbereitung: Körnung der Schlacke?
- ▶ Schwermetalle oder Alkalien müssen aus den Aschen oder aus der Feinfraktion abgetrennt werden, ggf. durch Waschung möglich
- ▶ Kombination der Aschen mit weiteren Rohstoffen oder Einsatzstoffen
- ▶ GFK-Einsatz in herkömmlichen Müllverbrennungsanlagen kaum möglich (Mangel an Zerkleinerungswerkzeugen, hoher Materialverschleiß, ggf. Verstopfung der Filter)

Synergien und Zielkonflikte mit weiteren rohstoff- und energieintensiven Industrien

- ▶ Zielkonflikt: Verfügbarkeit mancher alternativer Rohstoffe langfristig und regional begrenzt
- ▶ Zielkonflikt: Alkalien sind in SiO_2 (Glas) gebunden – Haben diese eine negative Auswirkung auf MVA-Asche und auf den Einsatz von MVA-Asche in der Klinkererzeugung?
- ▶ Beitrag zur Behebung eines Entsorgungsnotstands von Windradrotoren

Projektbeispiele in Deutschland

- ▶ Möglicher Einsatz von Müllverbrennungsaschen: Laufende Forschungsarbeiten „Entwicklung eines Verfahrens zur Verwertung von MVA-Schlacke als Rohstoffkomponente bei der Zementherstellung“, VDZ und Universität Duisburg-Essen

Weitere Projektbeispiele

- ▶ MVA-Aschen als Ersatzrohstoff in italienischen Zementwerken

Einschätzung der Realisierbarkeit von Technologien bzw. Maßnahmen in Deutschland gemäß der Ergebnisse aus dem Workshop

- ▶ Einsatz von Müllverbrennungsaschen: vor 2030
- ▶ Einsatz von GFK: vor 2030
- ▶ Einsatz von LD-Schlacke: vor 2030

- Einsatz von Ziegelsplitt: vor 2030

4.1 Klärschlamm

Wie bereits in Kapitel 3.1.3 erläutert, kann Klärschlamm hinsichtlich seines inerten Anteils auch alternativer Rohstoffkomponente im Rohmaterial zur Klinkererzeugung eingesetzt bzw. betrachtet werden.

4.2 Kalziumhaltige und bereits entsäuerte alternative Rohstoffe

Zu den alternativen Rohstoffen, die kalziumhaltig und bereits entsäuert sind, gehören beispielsweise Hochofenschlacke, Betonbrechsand, Karbidschlamm, Porenbetonmehl oder Kalkrückstände aus der Zuckerindustrie. Diese können ebenfalls Siliziumdioxid, Aluminiumdioxid und Eisenoxid als Hauptbestandteile enthalten. Beispielsweise können Stahlwerksschlacken, Kalkstein oder Silikatträger in der Rohmaterialmischung substituieren und die Einhaltung der vorgegebenen Klinkerzusammensetzung gewährleisten. Aufgrund ihres niedrigeren Schmelzpunktes erleichtern sie die Sinterung des Klinkers. Allerdings ist die Verfügbarkeit dieser Rohstoffe oft langfristig und regional in Hinblick auf den Transportaufwand begrenzt. Bedarf es einer Aufbereitung der Rohstoffe um die Qualität zu verbessern, müssen die damit verbundenen Kosten und der ggf. zusätzliche Energiebedarf berücksichtigt werden.

4.3 Steinkohle- und Braunkohleflugaschen als alternativer Rohstoff in der Klinkererzeugung

Stein- und Braunkohleflugasche fällt als Rückstand bei der Verbrennung in Kohlekraftwerken an. Unbrennbare Rückstände aus der Befeuerung mit pulverisierter Kohle im Kraftwerksprozess werden im Rauchgas als staubförmige Partikel mitgeführt. Diese Partikel werden elektrostatisch oder mechanisch abgeschieden und als Flugasche bezeichnet. Die chemische Zusammensetzung entspricht dem anorganischen Anteil, der in der Kohle enthalten ist [LOC]. Stein- und Braunkohle enthalten Siliziumdioxid, Aluminiumoxid, Eisenoxid und Kalziumoxid, weshalb beide Flugaschensorten in der Klinkererzeugung eingesetzt werden können. Im Jahr 2015 wurden in Deutschland etwa 250.765 t Steinflugasche in der Klinkerproduktion und 90.221,2 t Steinkohlenflugasche in der Zementmahlung eingesetzt [VDZ16a]. Bezogen auf den Gesamteinsatz der Flugasche in der deutschen Zementherstellung werden somit etwa 2/3 der Flugasche in der Klinkerproduktion eingesetzt. Demgegenüber werden etwa 2,8 Mio. t bei der Betonherstellung vermarktet [VGB].

4.4 Potentiell neuer Einsatzstoff: Müllverbrennungs-Aschen (MVA-Aschen)

In Deutschland fallen in Müllverbrennungsanlagen pro Jahr etwa 4,8 Mio. t Müllverbrennungsasche als Abfallprodukt an, die zum überwiegenden Teil im Deponiebau verwendet werden. Eine Verwertung der Aschen in der Zementherstellung als Rohstoffkomponente findet bislang nicht statt. Derzeit laufen Untersuchungen zur geeigneten Aufbereitung und Entfrachtung von MVA-Asche mit dem Ziel, die Metalle zurück zu gewinnen und mineralische Bestandteile als Rohstoffkomponente zu verwenden. Für den Einsatz in der Zementherstellung muss die Umwandlung der mineralischen Restfraktion zu einem verwertbaren Rohstoff mit niedrigem Gehalt an störenden Komponenten erfolgen, was eine anspruchsvolle Aufgabe darstellt. Dazu müssen die Schwermetalle aus den Aschen oder aus der Feinfraktion abgetrennt werden. Derzeit gibt es keinen großtechnischen Prozess, mit dem die Metalle, insbesondere aus der Feinfraktion (< 2 mm) umfassend zurückgewonnen werden können, um gleichzeitig die restliche mineralische Fraktion mit einer sicheren Gewährleistung zu verwerten. Durch die Entfrachtung von Schwermetallen aus der mineralischen Restfraktion, wird diese in ein Produkt umgewandelt, das als alternativer Rohstoff in der Zementindustrie eingesetzt werden kann. Bisher durchgeführte Untersuchungen zeigten, dass die verbleibende mineralische Restfraktion der Asche überwiegend Hauptbestandteile enthält, die zur Zementherstellung genutzt werden. Diese könnten zukünftig in geringen Mengen in der Klinkerproduktion eingesetzt werden und die Tonkomponente (ggf. teilweise) ersetzen. Aus diesem Grund ist eine stoffliche Verwertung in der Zementindustrie naheliegend.

Ein weiterer Vorteil besteht darin, dass bei der Restentsäuerung der MVA-Aschen im Brennprozess weniger CO₂-Emissionen emittiert und dadurch weitere CO₂-Emissionen eingespart werden können. [MVA]

4.5 Potentiell neuer Einsatzstoff: Aluminiumschlacke und Rotschlamm

Aluminiumschlacken fallen als Nebenprodukt in Aluminiumschmelzöfen an. Im Jahr 2017 wurden geringe Mengen an Aluminiumschlacke analysiert, um den potentiellen Einsatz als Rohstoff in der Zementklinkerproduktion zu untersuchen. Die Analysen ergaben, dass die Verwendung wegen des relativ hohen TOC-Gehalts nicht in der Rohmühle eines Zementwerks aufgegeben werden kann [UBT]. Eine Aufgabe im Ofeneinlauf wäre grundsätzlich möglich. Die Analyse zeigte jedoch auch relativ hohe Chlorid- und Fluoridgehalte auf, wodurch die Mengen oder die Eignung für den Einsatz im Ofeneinlauf begrenzt werden könnten. Die Schlacke könnte gegebenenfalls einen Teil an Bauxit substituieren, wenn dieses als Korrekturstoff standortspezifisch benötigt wird.

Rotschlamm entsteht bei der Gewinnung von Aluminiumoxid aus Bauxit als Nebenprodukt. Als Vorstufe zum Aluminiumherstellungsprozess wird in einem ersten Schritt Bauxit durch Zugabe von Natronlauge und unter Druck und Temperatur zu Aluminiumoxid verarbeitet. Dabei entsteht Rotschlamm - ein Reststoffgemisch, welches Eisenoxid, Silizium, Titandioxid und stark basische Natronlauge enthält [KAS]. Versuche in Deutschland in einer Pilotanlage oder im industriellen Maßstab in Hinblick auf einen Einsatz als alternative Rohmaterialkomponente bei der Klinkererzeugung wurden bisher noch nicht durchgeführt oder geplant.

4.6 Potentiell neuer Einsatzstoff: Glasfaserhaltige Kunststoffe (GFK)

Windradrotorblätter bestehen hauptsächlich aus Glasfaserhaltigen Kunststoffen. Ihre Verwertung durch den Einsatz als alternativer Brennstoff in der Zementindustrie wurde bereits getestet (siehe auch Kapitel 3.1.7). Die Windradrotorblätter sind bei einem Versuch hauptsächlich als Brennstoff eingesetzt worden. Der überwiegend silikatische Anteil der Aschen liefert darüber hinaus einen Beitrag zur Rohstoffzusammensetzung. Mit dem Einsatz dieser Kunststoffe könnte das Silizium der Glasfaser anteilig den natürlichen Sand in der Rohmaterialmischung ersetzen. Zusätzlich könnte ggf. Energie beim Mahlen des Rohmaterials eingespart werden. Allerdings stellt sich die Frage, wie wirtschaftlich das Ersetzen des natürlichen Sandes durch die geringen Mengen des Siliziums der Glasfaserhaltigen Kunststoffe tatsächlich ist. Zudem ist ein hoher Aufwand für die Zerkleinerung von Glasfaserkunststoffen zu berücksichtigen.

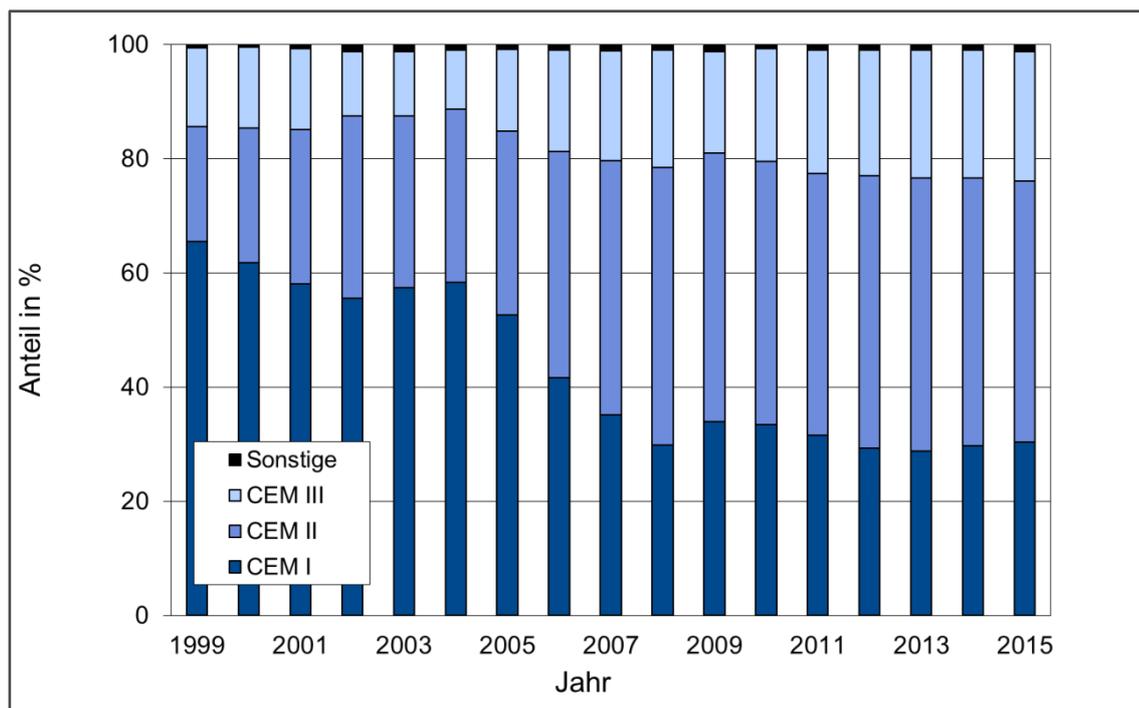
4.7 Potentiell neuer Einsatzstoff: Ziegelsplitt

Ziegelsplitt entsteht aus Ziegel-Produktionsabfällen und ist das Produkt aus dem Baustoffrecycling. Hintergrund der Diskussion, Ziegelsplitt für die Klinkererzeugung zu verwenden, ist der langjährige Einsatz von Ziegelsplitt als Ersatzrohstoff in Österreich. In Deutschland wird Ziegelsplitt häufig anderweitig zur Dachbegrünung oder Verfüllung eingesetzt. Voraussetzung ist also insbesondere eine lokale Verfügbarkeit dieses potenziellen alternativen Rohstoffs. Mit dem Einsatz von Ziegelsplitt in der Klinkererzeugung würden Rückstände aus anderen industriellen Prozessen umweltfreundlich verwertet und primäre Rohstoffe geschont. Ziegelsplitt kann teilweise die Tonkomponente in der Rohmaterialmischung ersetzen. Aus diesem Grund könnte der Einsatz von Ziegelsplitt in Regionen sinnvoll sein, in denen Ton als natürlicher Rohstoff nicht ausreichend zur Verfügung steht. Projekte zum Einsatz von Ziegelsplitt in der Klinkererzeugung in Deutschland sind bislang nicht bekannt.

5 Effizienter Einsatz von Klinker in Zement (Zemente mit mehreren Hauptbestandteilen)

Zemente mit mehreren Hauptbestandteilen reduzieren den Einsatz von Klinker im Zement. Sie weisen somit ein geringeres Klinker-Zement-Verhältnis im Vergleich zu herkömmlichem Portlandzement (CEM I) auf. Neben Klinker werden in der Zementherstellung alternative Materialien wie Hüttensand, Flugasche, natürliche Puzzolane und natürliche kalzinierte Puzzolane oder Kalksteinmehl als Hauptbestandteile eingesetzt. Der Klinker-Zement-Faktor⁴ in Deutschland betrug im Jahr 2015 etwa 74 % und ist seit 1997 von ursprünglich 85,5 % gesunken [VDZ16]. Der zunehmende Einsatz mehrerer Hauptbestandteile spiegelt sich insbesondere in der Entwicklung der eingesetzten Zementsorten in Deutschland wieder. Hierbei haben in erster Linie CEM II-Zemente (15 bis 35 % weitere Hauptbestandteile) und mit kleinerer absoluten Menge CEM III-Zemente mit Hüttensand als Bestandteil (> 35 %) deutlich an Bedeutung in der Baupraxis gewonnen, während der Versand von CEM I-Zementen entsprechend rückläufig war (Abbildung 19). Bei geringerem Anteil von Klinker im Zement, nehmen - bezogen auf die Tonne Zement - der Brennstoffverbrauch und der thermische Energiebedarf aus dem Klinkerbrennprozess ab. Entsprechend vermindern sich die mit der Klinkerproduktion verbundenen auf eine Tonne Zement bezogenen direkten CO₂-Emissionen.

Abbildung 19: Zementversand in Deutschland



Quelle: VDZ, eigene Darstellung, [VDZ16]

Die Verwendung anderer Zementhauptbestandteile neben Klinker beeinflusst maßgeblich die Zementigenschaften. Weitere wichtige Parameter sind die Eigenschaften der Stoffe selbst, der beabsichtigte Anwendungsbereich des Zements sowie relevante Normen, die Marktakzeptanz der hergestellten Zemente und die Kosten für die Materialien und deren Transport. Die Einsatzstoffe müssen bestimmte

⁴ Klinkeranteil im Zement, meist in t Klinker/t Zement angegeben

Qualitätsanforderungen erfüllen, um mögliche Schadstoffeinträge in den Zement zu vermeiden und die Qualität und Leistungsfähigkeit der Mörtel und Betone nicht zu beeinträchtigen [ECRA].

Die grundlegenden Anforderungen ergeben sich aus der Europäischen Zementnorm [DIN EN 197-1]. Ihre Einhaltung stellt die Qualität der Zemente und die Dauerhaftigkeit daraus hergestellter Betone sicher und ist somit grundlegend für die Marktakzeptanz der Zementprodukte. Die regionale Verfügbarkeit der potentiellen Einsatzstoffe als Zementhauptbestandteile ist sehr unterschiedlich und begrenzt somit die Verwendung solcher Materialien.

Ein weiteres Potential zur Reduzierung von CO₂-Emissionen in Hinblick auf den effizienten Einsatz von Zement in Beton könnte sich zukünftig aus der Kombination von klinkereffizienten Zementen und Hochleistungsbeton ergeben. Hochleistungsbeton (UHPC) ist besonders gefügedichter Beton mit einer hohen Druckfestigkeit und einem niedrigen Wasser-Zement-Gehalt [BAU]. Aus diesem Grund ist die Dauerhaftigkeit von UHPC i.d.R. hoch. Allerdings ist UHPC noch keine geregelte Bauweise, derzeit ist Bauen mit UHPC nur auf Basis einer „Zulassung im Einzelfall (ZiE)“ möglich (s. Kapitel 7.1).

Möglichkeiten zur effizienten Energienutzung

- ▶ Reduzierung des Klinkergehalts in Zement (geringes Klinker-Zement-Verhältnis): Abnahme des Brennstoffverbrauchs und des thermischen Energiebedarf aus dem Klinkerbrennprozess sowie Minderung der direkten prozessbedingten und energiebedingten CO₂-Emissionen aus der Klinkerherstellung bezogen auf eine Tonne des hergestellten Zements

Möglichkeiten zur Ressourcenschonung

- ▶ Effiziente Nutzung und effektiver Einsatz von Klinker im Zement
- ▶ Einsparung von fossilen Brennstoffen und Rohmaterialien für die Klinkerherstellung
- ▶ Sinnvolle Nutzung von in anderen Industrieprozessen erzeugten Nebenprodukten oder anfallenden Abfällen
- ▶ Förderung der Kreislaufwirtschaft
- ▶ Einsatz von metallurgischen Schlacken: Reststoffe können nach der Metallrückgewinnung weiter verwendet werden
- ▶ Stahlwerksschlacken: Teilweiser Ersatz für Klinker geeignet
- ▶ Mit dem Einsatz von metallurgischen Schlacken ist es ggf. möglich die Knappheit bzw. die abnehmende Verfügbarkeit an Flugaschen und Hüttensand zu kompensieren

Voraussetzungen, unterstützende Faktoren und mögliche Hemmnisse in der Anwendbarkeit der Technologien

- ▶ Voraussetzungen: Regionale und langfristige Verfügbarkeit sowie Qualität der Einsatzstoffe
- ▶ Hoher Forschungsbedarf und weitere Untersuchungen zur Verwendung der Einsatzstoffe im Zement
- ▶ Weitere Forschung und Prüfung der technischen Machbarkeit, praktischen Realisierbarkeit und Ökonomie erforderlich
- ▶ Untersuchungen der Eigenschaften von metallurgischen Schlacken für den Einsatz als Zementbestandteil notwendig
- ▶ Umgang mit den in der Schlacke enthaltenden Schwermetallen. Eine Abtrennung ist notwendig.
- ▶ Marktakzeptanz der hergestellten Zemente
- ▶ Anpassung von Normen und Richtlinien ggf. erforderlich
- ▶ Dauerhaftigkeit der hergestellten Betone
- ▶ Qualitätsgesicherter Materialstrom ist erforderlich: Qualitätssicherung entlang der Wertschöpfungskette und Fixierung der Qualitätssicherung in Regelwerken
- ▶ Sicherstellung einer gleichbleibenden Qualität des Zements

- ▶ Anforderungen Regelwerke DIN vs. EN (Beispiel Glühverlust Klasse Flugasche)
Grenzen der Einsatzmöglichkeiten, Kombinationen ausloten

Mögliche Hemmnisse:

- ▶ Ggf. erhöhter Energieeinsatz für die Mahlung und Trocknung (z.B. Hüttensand)
- ▶ Kosten für Einsatzstoffe und Transport/Logistik
- ▶ Mögliches Hemmnis: Carbon Leakage weltweit, Gefahr von Verlagerung der Produktionsstandorte im Fall kostenintensiver Einsatzstoffe
- ▶ (Wie) kann rückgewonnenes Metall wieder verwendet werden?
- ▶ Mögliches Hemmnis: Mahlbarkeit und schlechte Reaktivität

Synergien und Zielkonflikte mit weiteren rohstoff- und energieintensiven Industrien

Synergien:

- ▶ Nutzung der weiteren Hauptbestandteile als alternative Einsatzstoffe (z.B. Steinkohlenflugasche aus Kraftwerken und Hüttensand aus der Stahlindustrie)
- ▶ Leistungsfähigkeit der weiteren Hauptbestandteile kann in der Zementproduktion optimiert werden und durch regelmäßige Qualitätskontrollen von alternativen Einsatzstoffen und Zementprodukten optimal gesichert werden

Zielkonflikte

- ▶ In Abhängigkeit der Einsatzstoffe: Einsatz zusätzlicher elektrischer Energie zur Mahlung der Einsatzstoffe oder Einsatz zusätzlicher thermischer Energie zur Trocknung der Einsatzstoffe, sofern keine Abwärme aus dem Klinkerbrennprozess genutzt werden kann
- ▶ Einsatz von metallurgischen Schlacken: Umwandlung in Klinker technisch schwierig/energetisch nicht sinnvoll
- ▶ Verarbeitbarkeit der (zäh-) flüssigen Schlacke
- ▶ Universalzement vs. Zemente für „Definierte Anwendung“
- ▶ Zukünftig abnehmende Verfügbarkeit von Hüttensand/Flugasche wirkt sich auf die Herstellung von Klinker, Zement und Beton aus
- ▶ Mögliche Verschiebung der Preisgestaltung aufgrund veränderter Verfügbarkeit von Ausgangsstoffen und CO₂-Preisen
- ▶ Unangemessene bzw. hohe Anforderungen aus der Umweltgesetzgebung für Ausgangsstoffe
- ▶ Vorhandene Anwendungspraxis im (Transportbeton-)Werk
Klinkererzeugung im Stahlwerk

Verfügbarkeit

- ▶ Regional und langfristig ggf. begrenzte Verfügbarkeit der weiteren Hauptbestandteile
- ▶ Bei Einsatz zertifizierter Flugaschen mit hoher Qualität direkt im Beton stehen entsprechende Mengen nicht mehr für den Einsatz in der Zementproduktion zur Verfügung
- ▶ Aktuelle Energiepolitik („Energiewende“) bedingt, dass Flugaschen zukünftig nur noch eingeschränkter zur Verfügung stehen werden
- ▶ Falls sich die Rohstahlproduktion in Deutschland mittel- oder langfristig rückläufig entwickeln sollte, würde die Verfügbarkeit von Hüttensand eingeschränkt
- ▶ Abnehmende Verfügbarkeit von Steinkohlenflugasche, verfügbare Mengen werden eher für Einsatz im Beton genutzt
- ▶ Keine ausreichende Differenzierung von Flugaschen, Spannweite von Grenzwerten (z.B. Glühverlust, Sulfatgehalt) zu gering
- ▶ Genauere und praxisorientierte Bewertung von Flugaschen zur Einsatzfähigkeit (Differenzierung)

- ▶ Entfrachtung (z.B. Schwermetalle, Aluminium) zum Einsatz von MVA-Aschen

Projektbeispiele in Deutschland

- ▶ Modifizierung von Stahlwerksschlacke im Labormaßstab und in einer kleintechnischen Versuchsanlage in Deutschland, z.B. Loesche GmbH, F.A. Finger-Institut der Bauhaus Universität Weimar, Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung
- ▶ Klinkereffiziente Zemente werden bisher nur im Labormaßstab entwickelt und getestet
- ▶ Projekt C₂S/C₃S aus LD-Schlacke
- ▶ Projekt: Klinker aus Elektroofenschlacke (EOS)
- ▶ Projekt: Loesche Mahlen LD-Schlacke "Mikrokristallines C₂S"
Ferromanganschlacke: SiO₂ + Sulfat (feinst)

Einschätzung der Realisierbarkeit von Technologien bzw. Maßnahmen in Deutschland gemäß der Ergebnisse aus dem Workshop und Fachgespräch

- ▶ Weitere Entwicklung Klinkereffizienter Zemente in bekannten Stoffsystemen möglich
- ▶ Metallurgische Schlacken (außer S = Hüttensand) als Zementhauptbestandteil: Bis 2030 technologisch/energetisch wenig realistisch
- ▶ Berücksichtigung der regionalen Verfügbarkeit erforderlich
- ▶ Zukünftig mehr Fertigteile?

Differenzierung der Anwendung von Zement und Beton und Integration von der Produktion bis zur Anwendung und Nutzung

Förderliche Aspekte:

- ▶ Kooperation mit Zementanwendern, Zusammenarbeit und Bereitschaft zur technischen Begleitung
- ▶ Gemeinsame Strategie mit der Betonindustrie, Kooperation mit Qualitätskette Bau
- ▶ Anpassung der Zement- und Betonnormen
- ▶ Angemessene Qualitätssicherung für den Betonbau in Betonwerken und auf Baustellen
- ▶ Gespräche zwischen allen am Bau beteiligten in Abhängigkeit der Komplexität des Bauvorhabens
- ▶ Bauteilbezogene Rezepturen: Planer müsste sich mit den Eigenschaften des Betons intensiv auseinandersetzen
- ▶ Ausbildung und Qualifizierung
- ▶ Kennzeichnung
- ▶ Standardisierte Prozesse und Protokolle
- ▶ Digitale Kommunikation, reibungslose Informationsschnittstellen

Hinderliche Aspekte:

- ▶ Abläufe auf der Baustelle, Baupraxis
- ▶ Nicht mehr ein Zement für alle Anwendungsfälle
- ▶ Zunehmende Komplexität auf der Baustelle vs. geringe Qualifikation bei der Arbeit auf der Baustelle
- ▶ Viele unterschiedliche Fach- und Nationalsprachen für Personal

Forschungsansätze:

- ▶ Effizienter Einsatz von Zement im Beton und Beton im Bauwerk
- ▶ Building Information Modelling (BIM)
- ▶ Versandautomation
- ▶ Management, Steuerung und Überwachung der erforderlichen Informationsflüsse
- ▶ Funktionalität von Bauteilen um Betoneinsatz effizient zu machen

- ▶ Optimierung der Betonzusatzmittel
- ▶ Absenkung des Wasser/Zement-Werts

Anmerkungen:

- ▶ Kommunikationsvorgaben in neuer Richtlinie zur BetonBauQualität (BBQ) des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (DAfStB)
- ▶ Building Information Modelling (BIM) ist in Skandinavien bereits umfangreicher in Anwendung
- ▶ Sicherung der Leistungsfähigkeit, z.B. langfristig ausreichend hohen pH im Stahlbeton sicherstellen
- ▶ Kein Kompromiss bzgl. Bausicherheit

5.1 Granulierte Hochofenschlacke (Hüttensand)

Hüttensand entsteht nach schlagartiger Wasserabkühlung von Hochofenschlacke aus der Roheisenherstellung und besteht hauptsächlich aus Kalk, Kieselsäure, Aluminium- und Magnesiumoxid. Er besitzt latent-hydraulische Eigenschaften, die bei steigendem Gehalt von Hüttensand im Zement zu einer verlangsamten Frühfestigkeit des Zements führt. Die langsame Entwicklung der Festigkeit geht einher mit einer niedrigen Hydratationswärmeentwicklung und folglich mit einer geringen Rissneigung [BET]. Hüttensand dient seit über 100 Jahren als Hauptbestandteil zum teilweisen Ersatz von Klinker in Zement. Der in Deutschland überwiegend eingesetzte Hochofenzement CEM III/A weist einen Anteil von 36 bis 65 Massenprozent an Hüttensand auf [VDZ 16, Tabelle C9]. Gemäß DIN EN 197-1 können neun verschiedene Zemente mit unterschiedlichem Gehalt an Hüttensand (CEM III/C bis zu 95 Massenprozent) für verschiedenen Anwendungen hergestellt werden.

Der thermische Energiebedarf und die direkten CO₂-Emissionen aus der Klinkerherstellung nehmen bezogen auf den Zement mit Zunahme des Hüttensandanteils nahezu linear ab. Bei Einsatz von Hüttensand im Zement muss die zusätzliche thermische Energie zum Trocknen des Materials sowie die zusätzliche elektrische Energie für das Mahlen berücksichtigt werden. Allerdings steigt der Bedarf an elektrischer Energie beim Einsatz von Hüttensand insgesamt nicht signifikant, da durch die reduzierte Klinkerherstellung der elektrische Mehrbedarf weitgehend kompensiert wird.

In Deutschland wurden im Jahr 2013 insgesamt 6,12 Mio. t Hüttensand für die deutsche und ausländische Zementindustrie produziert [KRB]. Die Verfügbarkeit ist hauptsächlich von der Roheisenproduktion abhängig. In Deutschland wurden im Jahr 2015 etwa 4,6 Mio. t Hüttensand in der Zementherstellung als weiterer Hauptbestandteil genutzt. Gemäß der Umwelt-Produktdeklaration nach ISO 14025 und EN 15804 für Zement beträgt der Anteil an Hüttensand im Zement durchschnittlich etwa 15 % [UMW]. Zukünftig könnten Hochofenschlacke und Flugasche in Kombination mit weiteren Komponenten, wie Stahlwerksschlacken (LD-Schlacke und Elektroofenschlacke, s. auch Kapitel 5.6) eingesetzt werden, um den Mangel an Hydraulizität bestimmter Schlackentypen zu überwinden und um die Verfügbarkeit von Schlacken für die Zementproduktion zu erhöhen [EHR].

5.2 Flugasche als weiterer Hauptbestandteil in der Zementherstellung

Flugaschen besitzen puzzolanische Eigenschaften und können latent-hydraulische Eigenschaften aufweisen. Sowohl Stein- als auch Braunkohle können aufgrund ihrer Zusammensetzung dann als Zementhauptbestandteile zum Einsatz kommen, wenn sie die Anforderungen der DIN EN 197-1 erfüllen und durch elektrostatische oder mechanische Abscheidung entstanden sind [VDZ08]. Mögliche Schadstoffeinträge müssen hinsichtlich der Zement- und Betonqualität und des Umweltaspektes limitiert werden. Die Bestandteile der Zementhauptbestandteile dürfen die Produkteigenschaften nicht beeinträchtigen.

Für beide Flugaschen darf der Glühverlust von Flugasche höchstens 5,0 % betragen. Flugaschen mit einem Glühverlust von 5,0 bis 7,0 % können unter bestimmten der Voraussetzung akzeptiert werden, z.B. Erfüllen bestimmter Anforderung an Dauerhaftigkeit. In der Zementmahlung wurde 2015 in Deutschland 90.221 t Steinkohlenflugasche eingesetzt (s. auch Kapitel 5) [VDZ16a]. Untersuchungen zum Einsatz von Braunkohlenflugaschen wurden und werden national und international vereinzelt durchgeführt. Diese bisher durchgeführten Untersuchungen zeigten jedoch, dass ein Einsatz im Zement auf Grund der ungünstigen Eigenschaften z.B. schwankende Zusammensetzung und hohe Sulfatgehalte von Braunkohlenflugaschen in der Praxis nicht geeignet ist.

Siliziumreiche Flugasche, die vor allem bei der Verbrennung von Steinkohle z.B. in Kraftwerken entsteht, besteht im Wesentlichen aus Siliziumdioxid, Aluminiumoxid und Eisenoxid. Für den Einsatz im Zement muss nach DIN EN 197-1 der Massenanteil an reaktionsfähigem CaO unterhalb von 10,0 % liegen. Der Massenanteil von freiem CaO darf 1,0 % nicht übersteigen. Bei einem Anteil von 1,0 bis 2,5 % freiem Kalk müssen bestimmte Anforderungen erfüllt sein, um die Flugasche verwenden zu dürfen. Reaktionsfähiges SiO₂ muss mit einem Massenanteil von 25,0 % vorhanden sein. [VDZ08]

Kalkreiche Flugasche, die bei der Verbrennung von Braunkohle entsteht, enthält hauptsächlich Siliziumdioxid, Kalziumoxid und Aluminiumoxid. Gemäß DIN EN 197-1 darf der Massenanteil an reaktionsfähigem Kalziumoxid (CaO) 10,0 % nicht unterschreiten. Kalkreiche Flugasche muss einen Massenanteil von mindestens 25,0 % reaktionsfähigem Siliziumoxid (SiO₂) aufweisen, wenn sie Massenanteile zwischen 10,0 und 15,0 % reaktionsfähigem Kalziumoxid (CaO) enthält [VDZ08]. Braunkohlenflugasche kann in ihrer Zusammensetzung deutlich stärker schwanken als Steinkohlenflugasche, wodurch die Zementqualität beeinträchtigt wird.

Feinanteile der Flugasche können aufgrund der Mahlfeinheit dem Zement auch direkt zugefügt werden. Im Durchschnitt führt die direkte Zugabe zu einer Verringerung der elektrischen Energie im Zementmahlprozess. Der thermische Energiebedarf für die Klinkerproduktion nimmt linear ab mit der Zunahme des Flugascheanteils im Zement. Zemente mit Flugasche können einen geringen Wasserbedarf, eine verbesserte Verarbeitbarkeit, eine höhere Langzeitfestigkeit sowie eine erhöhte Resistenz gegen Sulfatangriff aufweisen [ECRA]. Der Einsatz von Flugasche in Zement ist stark abhängig von dessen zukünftigen langfristigen Verfügbarkeit. Wie eingangs erwähnt, wird sich der Einsatz von Kohle in deutschen Kraftwerken zur Verstromung zukünftig verringern. Die Anzahl und effektive Kapazität von Kohlekraftwerken ist schwer vorhersehbar, sodass Flugasche zukünftig nicht mehr ausreichend zur Verfügung stehen könnten [YAO]. Auch vor dem Hintergrund, dass Steinkohle überwiegend in der Betonherstellung eingesetzt wird, wird das Potential begrenzt zukünftig mehr Steinkohlenflugasche in der Zementherstellung zu nutzen.

5.3 Kalksteinmehl

Der Einsatz von Kalksteinmehl stellt eine weitere Möglichkeit dar, um den Klinker teilweise im Zement zu ersetzen und somit den Klinkergehalt zu reduzieren. Üblicherweise ist er in ausreichenden Qualitäten und Mengen aus dem Steinbruch des Zementwerks regional und kostengünstig verfügbar. Kalkstein als Hauptbestandteil im Zement führt bezogen auf den Zement zur Einsparung von thermischer und elektrischer Energie und von CO₂-Emissionen bei der Klinkerherstellung. Die Mahlbarkeit von Kalkstein ist im Vergleich zu Klinker besser, so dass für die Mahlung weniger elektrische Energie eingesetzt werden muss. Ein weiterer Vorteil besteht darin, dass kalksteinhaltige Zemente in der Regel einen geringeren Wasserbedarf aufweisen, woraus eine bessere Verarbeitbarkeit des Betons resultiert. Kalksteinhaltige Zemente müssen feiner gemahlen werden, damit die gleiche Festigkeit wie beim Portlandzement erreicht wird. Allerdings trägt Kalkstein nicht an sich zur Festigkeitsbildung bei. Gemäß DIN EN 197-1 ist deshalb der Anteil an Kalksteinmehl im Zement auf 35 Massenprozent begrenzt und es gelten bestimmte Qualitätskriterien, die das Kalksteinmehl einhalten muss. Der CaCO₃-Gehalt muss mindestens einen Massengehalt von 75 % besitzen.

Der Tongehalt darf höchstens 1,20 g/100 g betragen. Abhängig von der Kalksteinart darf der Gesamtgehalt an organischem Kohlenstoff (TOC) einen Massenanteil von 0,2 % bzw. 0,5 % nicht überschreiten [VDZ08].

Die Herstellung und Verwendung von größeren Anteilen an Kalkstein im Zement und Beton erfordern weitere komplexe prozesstechnische Maßnahmen im Zementwerk, wie z. B. die gezielte Gewinnung von Kalksteinen mit immer gleichbleibenden Eigenschaften bei der weiteren Aufbereitung, um ein gleichmäßiges Mahlergebnis und gleichbleibende Produkteigenschaften zu gewährleisten. Darüber hinaus wären zusätzliche anspruchsvolle betontechnologische Maßnahmen in der Betonherstellung notwendig, wie z. B. die Verwendung von Fließmitteln und niedrigen Wasserzementwerten. Gelingt die Umsetzung der Maßnahmen in der Praxis, ist es möglich, dass zulassungsfähige Dauerhaftigkeitskennwerte am Beton erreicht werden. [ECRA]

5.4 Natürliche Puzzolane

Natürliche Puzzolane sind vulkanische Gesteine mit kieselsäurehaltiger oder alumosilikatischer Zusammensetzung oder Sedimentgesteine mit geeigneter chemischer und mineralogischer Zusammensetzung (z.B. Trass). Bei Zugabe von Wasser und Kalkhydrat bilden sie Kalziumsilikathydrate und Kalziumaluminathydrate. Die Eigenschaften des Zements hängen von den verwendeten puzzolanischen Materialien, ihrer chemischen und mineralischen Zusammensetzung sowie der Feinheit und daher ihrer Reaktivität ab. Ein Vorteil bei Einsatz von Puzzolanen als Zementhauptbestandteil ist eine bessere Verarbeitbarkeit des Betons, eine höhere Langzeitfestigkeit und eine verbesserte chemische Beständigkeit. Allerdings ist bei erhöhtem Anteil an puzzolanischen Stoffen im Zement die Abnahme der in der Baupraxis relevanten Frühfestigkeit zu berücksichtigen. Zur Aufbereitung der Puzzolane für die Zementherstellung gehört die Zerkleinerung, das Trocknen, das Mahlen und das Vermahlen oder Mischen des Klinkers mit dem puzzolanischen Material. Der elektrische Energiebedarf ist aufgrund der besseren Mahlbarkeit im Vergleich zum Klinker geringer. Auch der thermische Energiebedarf für die Klinkerproduktion nimmt bezogen auf die Tonne Zement bei Einsatz von Puzzolanen ab. [ECRA]

Für die Verwendung im Zement müssen Puzzolane gemäß DIN 197-1 einen Massenanteil an reaktionsfähigem SiO_2 von mindestens 25,0 % enthalten.

Natürliche Puzzolane werden in Deutschland abhängig von der herzustellenden Zementsorte mit einem Gehalt von 6 bis 35 Massenprozent als Hauptbestandteil im Zement eingesetzt, bezogen auf die Summe der Haupt- und Nebenbestandteile [VDZ08]. Beispielsweise wurden insgesamt im Jahr 2015 31.896 t Trass in der Zementmahlung in Deutschland eingesetzt. Die Verfügbarkeit von Puzzolanen hängt von den lokalen geologischen Gegebenheiten ab. Durch längere Distanzen für den Transport sind neben den damit verbundenen Kosten auch der zusätzliche Energiebedarf und die daraus resultierenden CO_2 -Emissionen zu berücksichtigen. In Deutschland sind zwei Vorkommen an natürlichen Puzzolanen vorhanden (Bayrischer Trass, Bayerischer Ries und Rheinischer Trass, Eifel).

5.5 Natürliche kalzinierte Puzzolane - kalzinierte Tone

Natürliche kalzinierte Puzzolane sind thermisch aktivierte Materialien vulkanischen Ursprungs, Tone, Schiefer oder Sedimentgesteine (z.B. kalziniertes Kaolin). Zur Herstellung von Zement mit natürlichen kalzinierten Puzzolanen müssen diese wie natürliche Puzzolane vorbehandelt werden. Zusätzlich umfasst die Vorbehandlung die Kalzinierung. Im Vergleich zu Klinker ist der geringere elektrische Energiebedarf aufgrund der besseren Mahlbarkeit von Puzzolanen ein Vorteil. Allerdings nimmt die Frühfestigkeit von Zement mit natürlichen kalzinierten Puzzolanen bei steigendem Anteil an puzzolanen Stoffen ab. Zemente mit kalzinierten Tönen können eine höhere Langzeitfestigkeit und eine verbesserte Lebensdauer aufgrund einer dichten Mikrostruktur aufweisen. Die Tone können den Wasserbedarf des Zements erhöhen, der dann durch technologische Maßnahmen kompensiert werden muss. Für die Verwendung im Zement müssen Puzzolane gemäß DIN 197-1 einen Massenanteil an reaktionsfähigem SiO_2 mindestens 25,0 % enthalten.

Mit Kombinationen von kalzinierten Tonen und gemahlene Kalkstein sollen nach jüngsten internationalen Entwicklungen eine Reduktion von Klinker in Zement von bis zu 50 % ermöglicht werden [E-CRA]. Natürliche kalzinierte Puzzolane werden in nur wenigen Ländern und in geringen Mengen eingesetzt. In Deutschland werden sie bislang nicht eingesetzt. Mittelfristig betrachtet werden kalzinierte Puzzolane voraussichtlich in Regionen eingesetzt, in denen keine geeigneten Mengen an anderen Zementhauptbestandteilen wie Schlacken oder Flugasche verfügbar sind. Langfristig wird erwartet, dass kalzinierte Tone als Zementhauptbestandteile international an Bedeutung zunehmen, da zukünftig Schlacken und Flugaschen nicht mehr ausreichend zur Verfügung stehen. Die Verfügbarkeit von Rohton ist weltweit vergleichsweise hoch. Die Zementindustrie steht aber mit der Ton- und Ziegelindustrie um hoch qualitative Tone im Wettbewerb. Aus ökonomischen Gründen könnten zukünftig vermutlich Tone mit geringer Qualität als Mischungen von mehreren Tonmineralien für den Einsatz in Zementen relevant werden.

5.6 Potentiell neuer Einsatzstoff: Stahlwerksschlacken (LD-Schlacke und Elektroofenschlacke)

In Deutschland fallen jährlich etwa 6 Mio. t Stahlwerksschlacke an, davon 3,5 Mio. t LD-Schlacke (Schlacken aus dem sog. Linz-Donawitz-Stahlherstellungsprozesses) und 1,8 Mio. t Elektroofenschlacke [FEHS]. Stahlwerksschlacke entsteht im Stahlherstellungsprozess bei der Umwandlung von Roheisen, Eisenschwamm oder Schrott zu Rohstahl. In Abhängigkeit von der Herstellung des Rohstahls wird die Stahlwerksschlacke in LD-Schlacken und Elektroofenschlacken unterteilt. LD-Schlacken entstehen aus dem Sauerstoffblasverfahren, Elektroofenschlacke aus dem Schmelzverfahren im Elektrolichtbogenofen [FEHS]. Aufgrund der Zusammensetzung sind derartige Schlacken nur bedingt als Rohmaterial einsetzbar und aufgrund der geringen Reaktivität bei der Zementmahlung nicht geeignet. Hauptsächlich werden die Schlacken im Straßenbau oder abhängig vom Kalkgehalt als Dünger verwendet.

Untersuchungen zum Einsatz von Stahlwerksschlacken ergaben, dass es technisch möglich ist, Stahlwerksschlacke so zu modifizieren, dass diese hydraulisch aktiv wird und für die Verwendung im Zement als teilweiser Ersatz für Klinker geeignet ist. Durch die Modifizierung wird aus der Stahlwerksschlacke ein hydraulisch hochreaktives Material mit einem hohen Alitgehalt (bis zu 66 %) [ZKG13]. Dazu sind drei Prozessschritte erforderlich. In einem ersten Schritt wird das oxidisch gebundene Eisen der Stahlwerksschlacke in einem thermochemischen Verfahren in einer reduzierten Atmosphäre in eine elementare, metallische Form überführt und somit das Eisenoxid reduziert. Dadurch wird die Schlacke chemisch auf die angestrebte Klinkerzusammensetzung eingestellt. Der zweite Verfahrensschritt beinhaltet die Bildung von Alit, die durch die Erstarrung der Schlacke erfolgt. Die modifizierte Schlacke weist nun gute hydraulische Eigenschaften auf. In einem letzten Schritt wird das erstarrte klinkerähnliche Material gemahlen und damit der verbliebene eingebundene Eisenanteil zur Metallrückgewinnung abgetrennt. Versuche zur Modifizierung von Stahlwerksschlacke wurden in Deutschland im Labormaßstab und in einer kleintechnischen Versuchsanlage bereits durchgeführt. Der nächste Schritt wird sein, die Untersuchungen zur anteiligen Verwendung von Stahlwerksschlacke im Zement für den industriellen Einsatz fortzuführen und die praktische Realisierbarkeit und Ökonomie des neuen Verfahrens zu prüfen [ZKG13].

6 Einsatz neuer Bindemittel

Neue Bindemittel können Portlandzement bei der Herstellung von mineralischen Bindemitteln teilweise ersetzen. In begrenztem Umfang können sie somit dazu beitragen, den Einsatz von klassischem Portlandzementklinker zu verringern. Es gibt unterschiedliche Ansätze für die Herstellung solcher Bindemittelsysteme. Allerdings ist heute keines der neuen Bindemittel geeignet, im industriellen Maßstab Zement und seine Anwendung im Beton in weitem Umfang zu ersetzen. Diese Bindemittel, die sich z.T. noch im Forschungsstadium oder in der Entwicklung befinden, verfügen z.T. über andere Eigenschaften als herkömmlicher Zement. Deshalb könnten aus heutiger Sicht neue Bindemittel lediglich in begrenzten Mengen z.B. für Nischenprodukte eingesetzt werden. Neben der Erfüllung technischer Anforderungen wie Festigkeitsentwicklung oder Dauerhaftigkeit hängt die Nutzung und weitere Entwicklung von neuen Bindemitteln von der Verfügbarkeit der Ausgangsstoffe, deren Kosten und möglichen Aufwand für die Aufbereitung, Gesetzgebung, Normungsprozessen, CO₂-Emissionskosten und der Marktakzeptanz ab. Mögliche Schadstoffeinträge in die Bindemittel durch die Ausgangsmaterialien sind zu vermeiden.

Möglichkeiten zur effizienten Energienutzung

- ▶ Verringerung des Brennstoffenergiebedarfs
- ▶ Einsparung von CO₂-Emissionen
- ▶ Energieeinsparung durch reduzierte Brenntemperaturen z.B. bei Herstellung von Belitzement

Möglichkeiten zur Ressourcenschonung

- ▶ Effiziente Nutzung von calciumhaltigen (kalkhaltigen) Primärrohstoffen
- ▶ Einsparung fossiler Brennstoffe durch Reduzierung des Brennstoffenergiebedarfs
- ▶ aber z.T. Nutzung anderer z.T. knapper Ressourcen als Kalkstein

Voraussetzungen und mögliche Hemmnisse in der Anwendbarkeit der Technologien

- ▶ Verfügbarkeit, Qualität und Kosten der Ausgangsstoffe
- ▶ Optimierung der Prozesse für die Anwendung im industriellen Maßstab notwendig
- ▶ Marktakzeptanz
- ▶ z.T. zusätzlicher elektrischer Energiebedarf für den Mahlprozess von Bindemitteln

Alkalisch aktivierte Bindemittel:

- ▶ Eigenschaften von alkalisch aktivierten Bindemitteln hängen stark von den Eigenschaften der Ausgangsmaterialien ab
- ▶ Dauerhaftigkeit von Bauprodukten auf Basis von alkalisch aktivierten Bindemitteln ist noch nicht nachgewiesen

Belitzemente:

- ▶ Niedrige Frühfestigkeitsentwicklung, hoher Alkaligehalt, höherer Energiebedarf für die Zerkleinerung notwendig

Zemente auf Basis der Karbonatisierung von Calciumsilikaten:

- ▶ Verfügbarkeit von CO₂ für die Nutzung (Carbon Capture) ist Voraussetzung für die Herstellung von Zementen auf Basis der Karbonatisierung von Calciumsilikaten

Synergien und Zielkonflikte mit weiteren rohstoff- und energieintensiven Industrien

- ▶ Zielkonflikt: langfristig und regional begrenzte Verfügbarkeit der Ausgangsstoffe

Projektbeispiele und Forschungsansätze

- ▶ Celitement [GAR]
- ▶ Solidia cement [SOL]
- ▶ Eco-Binder [ECO]

6.1 Alkali-aktivierte Bindemittel (Geopolymere)

Alkali-aktivierte Bindemittel sind meist Zwei-Komponenten-Systeme. Diese anorganischen Bindemittel bestehen aus einer reaktiven Feststoffkomponente und einer alkalischen Aktivierungslösung. Die Feststoffkomponente beinhaltet Silizium- und Aluminiumoxide. Die Aktivierungslösung kann neben Wasser auch Alkalyhydroxide, -silikate, -aluminat, -carbonate und bzw. oder -sulfate enthalten. Durch die Reaktion des Feststoffes mit dem Aktivator entsteht ein dreidimensionales anorganisches alumosilikatisches Polymer. Dieses alumosilikatische Netzwerk ist für die relativ hohe Festigkeit des erhärtenden Produkts verantwortlich. Geeignete reaktive Feststoffkomponenten für die geopolymere Polykondensation sind Alumosilikate natürlicher Herkunft (Metakaolin, natürliche Puzzolane) oder industrieller Herkunft (Flugasche, granuliert Hochofenschlacke). Chemisch gesehen können alkalisch-aktivierte Bindemittel in Abhängigkeit ihrer Zusammensetzung in zwei Gruppen unterteilt werden. Zum einen in Materialien die hauptsächlich Aluminium und Silizium enthalten (z.B. Metakaolin) und zum anderen in Materialien, die hauptsächlich aus Kalzium und Silizium (z.B. Hochofenschlacke) bestehen. Bislang wurden alkalisch-aktivierte Bindemittel hauptsächlich zu Demonstrationszwecken hergestellt (z.B. Einsatz von Bindemitteln bei der Herstellung von Rohren oder Feuerfestmaterialien). Im Vergleich zu Portlandzement sind die alkali-aktivierten Bindemittel meist teurer und weisen insgesamt einen höheren Energiebedarf für die Herstellung auf. Zudem sind die Ausgangsstoffe industrieller Herkunft bezüglich der Verfügbarkeit langfristig begrenzt. Je nach Eigenschaften des Ausgangsmaterials und seiner chemischen Zusammensetzung, Temperatur und Feuchtigkeit sind erhebliche Qualitätsschwankungen (Festigkeitsentwicklung, Dauerhaftigkeit) nicht auszuschließen. Aus diesen Gründen scheint die Verwendung von alkali-aktivierten Bindemitteln hinsichtlich der Ökologie und Ökonomie eher weniger geeignet. [ECRA, ROH]

6.2 Belit-Zemente

Belit-Zemente basieren auf den gleichen Rohstoffen wie Portlandzement und können im herkömmlichen Zementwerk hergestellt werden. Ein Vorteil von Belitzementen besteht darin, dass sie mit einem geringeren Kalksättigungsfaktor und niedrigeren Temperaturen 1350 °C gebrannt werden können. Grundsätzlich kann ein Teil der Brennstoffenergie eingespart und CO₂-Emissionen durch die Reduzierung des Kalkgehaltes im Rohstoff und durch die niedrigere Brenntemperatur gemindert werden. Allerdings ist eine sehr schnelle Abkühlung des Klinkers notwendig. Diese stellt derzeit noch ein ökonomisches Problem dar, da die Wärme des Klinkers mit der derzeit bekannten und verfügbaren Anlagentechnik nicht zurückgewonnen und somit die damit verbundene Energie nicht genutzt werden kann. Auch ist ein höherer elektrischer Energiebedarf notwendig, da die höhere Härte von Belit im Gegensatz zum herkömmlichen Klinker zusätzliche Energie zum Mahlen erfordert. Grundsätzlich ist es auch möglich, Belit im hydrothermalen Verfahren oder mittels sogenannten Sol-Gel-Prozess bei niedrigen Temperaturen zwischen 600 und 900 °C herzustellen [ECRA]. Der daraus resultierende Klinker ist hochreaktiv, allerdings wurden diese Methoden bislang lediglich im Labormaßstab entwickelt und sind noch nicht für die Produktion im Industriemaßstab geeignet. Betone mit Belitzementen weisen eine dichte Mikrostruktur auf, eine Dauerfestigkeit sowie bei ihrer Aushärtung eine mäßige Hydratationswärmeentwicklung. Dies macht Belit-Zemente für massige Baukörper wie z.B. Dämme besonders geeignet. Die Eigenschaften von Belit-Zementen können jedoch auch durch die Verwendung von herkömmlichen Zementen, wie z.B. CEM III, erreicht werden.

6.3 Zemente auf Basis der Karbonatisierung von Kalziumsilikaten

Für Zemente, die auf der Karbonatisierung von Kalziumsilikaten basieren, werden als Rohstoffe Kalkstein und Quarz verwendet, die weltweit verfügbar sind. Je nach Rohstoff können kalkarme Kalziumsilikate (z.B. Wollastonit) bei um etwa 250 °C niedrigerer Brenntemperatur im Vergleich zum Portlandzementklinker gebrannt werden [ECRA].

Der Mechanismus der Karbonatisierung ist aus dem Bereich der Betontechnologie bekannt. Eine Karbonatisierung wird durch das Eindringen von CO₂ in die feinen Kapillarporen des Betons verursacht. Das CO₂ löst sich in den dünnen Wasserfilmen, die die Kapillarporen auskleiden. Es bildet sich Kohlensäure, die mit Kalziumhydroxid unter Bildung von Kalziumcarbonat reagiert [VDZ08]. Bei Stahlbewehrungen in Beton kann z.B. Korrosion durch Karbonatisierung von Kalziumhydroxid oder Kalziumsilikaten auftreten (s. Kapitel 7.1.2). Allerdings kann die Karbonatisierung von Ca-/Mg-Silikaten als mögliches CO₂-Abscheideverfahren betrachtet werden, wobei diese von Ca-Silikaten (z.B. Wollastonit) viel schneller als die Karbonatisierung von Mg-Silikaten abläuft.

Der Karbonatisierungsmechanismus von Wollastonit findet in zwei Schritten statt. Nach der Ca-Auswaschung aus der CaSiO₃-Matrix (1. Schritt) erfolgen die CaCO₃-Keimbildung und das Wachstum (2. Schritt). Während dieses Prozesses steigt die Druckfestigkeit als Funktion von Zeit und CO₂-Druck (Reaktionsgrad) an. Der auf diese Weise erzeugte Klinker ist nicht hydraulisch, wodurch Transport und Lagerung erleichtert werden und auch eine lange Verarbeitbarkeit von hieraus hergestelltem Frischbeton möglich ist. Die aktive Karbonatisierung der Silikate in einer CO₂-reichen Atmosphäre bei Umgebungsgasdrücken, dient als CO₂-Senke mit dauerhafter Speicherung. Vor dem Hintergrund der Erhärtung unter Einsatz von CO₂ erscheint diese Technologie, für die Herstellung unbewehrter Fertigteilelemente und zur Nutzung in der Nähe von CO₂-Quellen mit Abscheide-Technologie geeignet zu sein. [ECRA]

Erste Versuche im industriellen Maßstab zur Herstellung solcher Zemente wurden bereits durchgeführt. Die Herstellung wies gemäß Herstellerangaben einen bis zu 30 % geringeren CO₂-Ausstoß und 30 % geringen Energieverbrauch auf. Dieser kalksteinarme und nicht-hydraulische Zement wird z.B. für den sogenannten Solidia-Beton verwendet, der aus den gleichen Rohstoffen hergestellt wird wie herkömmlicher Portlandzementbeton und nach der Karbonatisierung vergleichbare Eigenschaften aufweist (s. auch Kapitel 8.2).

6.4 Kalzium-Sulfoaluminat-Klinker

Für die Herstellung von Kalzium-Sulfoaluminat-Klinker sind im Vergleich zu Portlandzementklinker höhere Mengen an bauxit- und sulfathaltigen Rohmaterialien notwendig, weshalb die Kosten der Zemente höher sind. Der Klinker kann in herkömmlichen Zementwerken bei etwas niedrigeren Sinter-temperaturen und mit einem geringeren CO₂-Ausstoß gebrannt werden. Kalzium-Sulfoaluminat-Zemente bestehen hauptsächlich aus den Phasen Ye'elimite oder Tetrakalzium-Trialuminatsulfat, Belit und Gips. Derzeit sind solche Zemente in Europa und China im Handel erhältlich und können nach individuellen technischen Zulassungen angewendet werden. Die weltweite jährliche Produktionsmenge an Kalzium-Sulfoaluminat-Zement wird auf etwa 2 Mio. t geschätzt. Überwiegend wird dieser Zement in China hergestellt. Eine weitere Entwicklung des Einsatzes von neuen Bindemitteln, sind sogenannte Zwischenklinker, bei denen versucht wird, die Vorteile von Belit- und Kalzium-Sulfoaluminat-Zementen zu kombinieren (Belitzement: niedrige Hydratationswärme, hohe Endfestigkeit; Kalzium-Sulfoaluminat-Zemente: hohe Frühfestigkeit). Die Festigkeitsentwicklung und die Betonbeständigkeit hängen stark von der Zusammensetzung des Belit-Kalzium-Sulfoaluminat-Klinkers ab. Ein Nachteil dieser Zemente ist die erhöhte Tendenz zur Bildung von Ansätzen während des Brennprozesses. [ECRA]

6.5 CSH-Binder

CSH-Binder stellen eine ganze Stoffgruppe von mineralischen Bindemitteln dar, die auf Kalziumhydro-silikaten (CSH) mit einem breiten Spektrum an verschiedenen Rezepturen basieren. Das Bindemittel Celitement gehört zu der Gruppe der CSH-Binder und basiert auf der Aktivierung von im Autoklaven hergestellten nicht hydraulischen Kalziumhydro-silikaten und anschließendem Vermahlen mit Silikat-trägern wie Quarz. Für die Produktion solcher Binder wird die gleiche Rohstoffbasis benötigt, wie in der herkömmlichen Zementherstellung.

Die Herstellung von Celitement erfolgt in drei Schritten. Zuerst wird der Kalkstein kalziniert, wobei wie im üblichen Klinkerbrennprozess prozessbedingt CO₂-Emissionen entstehen. In einem zweiten Schritt erfolgt die Reaktion von Kalk, Siliziumdioxid und Wasser in einem Autoklavenprozess zur Herstellung eines nicht hydraulisch aktiven Vorprodukts (A-Dikalziumsilikathydrat). Anschließend wird das Autoklavenprodukt in einem tribochemischen Mahlprozess unter Einsatz von elektrischer Energie und Zugabe von Silikatträgern, wie beispielsweise Quarz in das reaktive Bindemittel Celitement umgesetzt. Die Hydratationseigenschaften, die Festigkeitsentwicklung und die Endfestigkeit dieses Bindemittels bewegen sich annähernd im Bereich von herkömmlichen Zementen. Die Dauerhaftigkeit und Prüfung der Eignung für die Herstellung von Bindemitteln in der Baupraxis stehen allerdings noch aus. Neue analytische Technologien zur Steuerung des Autoklavenprozesses oder zur Charakterisierung des Produktes sind noch in der Entwicklung. Auch in Hinblick der Zerkleinerungstechnik mit Schwingmühlen besteht noch großes Optimierungspotential [ECRA, DEW]. Die erste Pilotanlage in einem deutschen Zementwerk ist für 2019/2020 geplant.

6.6 Magnesia-basierte Binder

Zemente, die auf Magnesiumoxid und Magnesiumchlorid basieren, sind lange bekannt und wurden bereits in der Zementindustrie eingesetzt [ROH]. Das britische Unternehmen Novacem entwickelte ein Bindemittelsystem auf Basis von magnesiumsilikathaltigen Gesteinen wie Olivin oder Serpentin. Die Herstellung des Bindemittels erfolgt in einem Autoklavenverfahren, in dem aufgrund der Karbonatisierung der Magnesiumsilikate Magnesiumcarbonat entsteht. Das beim Brennen emittierte CO₂ wird abgeschieden und zurückgeführt. Das freigesetzte CO₂ kann also für die Karbonatisierung der Magnesiumsilikate wieder verwendet werden [VDZM]. Anschließend werden bei einer Kalzinierung Magnesiumoxid produziert und in einem weiteren Prozessschritt (Hydro-)Magnesite aus einem Teil des Magnesiumoxids in einem Reaktor erzeugt, bevor die Produkte abgemischt werden. Die Produktion eines solchen Binders erfordert eine komplexe Prozesstechnologie, verbunden mit einem hohen Energiebedarf. Gemäß Angaben des Herstellers kann eine Tonne Novacem bei der Erhärtung ca. 0,1 t CO₂ einbinden. Da nicht bekannt ist, ob Emissionen für die Autoklavierung der Magnesiumsilikate mit einbezogen wurden, bleibt die tatsächliche CO₂-Bilanz unklar (zu wenig verlässliche Daten) [VDZM]. Bislang wurden keine großtechnischen Umsetzungen realisiert. Das Verfahren des Unternehmens Novacem hat sich als Alternative zur herkömmlichen Zementherstellung nicht etabliert. 2012 hat das Unternehmen die weitere Entwicklung eingestellt und Konkurs gemeldet. [NOV, HEI, DEW]

7 Materialeffizienz in der Betonherstellung, -anwendung und -recycling

Im Bereich der Betonherstellung zeigen der klinkereffiziente Einsatz von Zement im Beton, der Einsatz von Betonen mit industriellen Nebenprodukten als Zusatzstoffe (wie z.B. Steinkohlenflugasche) sowie das Betonrecycling Möglichkeiten auf, um Rohstoffe und Energie einzusparen sowie CO₂-Emissionen zu verringern. Auf Basis verschiedener Literaturquellen, nationalen sowie internationalen Regelwerken und baupraktischer Erfahrung lässt sich technisch betrachtet zusammenfassen, dass Beton grundsätzlich recycelt werden kann.

Möglichkeiten zur effizienten Energienutzung

- ▶ Einsparung von Energie und Verringerung von CO₂-Emissionen durch möglichst effizienten Einsatz von Recyclingmaterial im Straßenbau (aufgrund von geringerem Einsatz von Beton)

Möglichkeiten zur Ressourcenschonung

Schonung natürlicher Ressourcen, Verringerung des Rohstoff- und Materialverbrauchs durch:

- ▶ Einsatz von Recycling-Material aus mineralischen Baustoffen, z.B. Fraktionen aus recyceltem Beton [RBE]
- ▶ Einsatz von klinkereffizienten Zementen
- ▶ Herstellung und Einsatz schlanker, funktionaler Bauteile (UHPC, Carbonbeton)
- ▶ Einsatz von Müllverbrennungaschen als Rohstoff, Einsatz im Wesentlichen für unbewehrte Produkte
- ▶ Recycelter Beton kann wieder in der Betonherstellung eingesetzt werden
- ▶ Recycelter Beton kann beispielsweise in der Herstellung von Pflastersteinen (erdfeuchte Konsistenz) eingesetzt werden

Voraussetzungen, unterstützende Faktoren und mögliche Hemmnisse in der Anwendbarkeit der Technologien

Allgemein:

- ▶ Klinkereffizienter Einsatz von Zement in Beton
- ▶ Nachweis der Dauerhaftigkeit entsprechender Betone
- ▶ Anerkennung von recyceltem Beton als Produkt und nicht als Abfall
- ▶ Logistik und Qualitätssicherung
- ▶ Hohe Anforderung an Qualität, Liefergleichmäßigkeit
- ▶ Möglichkeit einer Deklaration als Öko-/RC-Beton bei Einsatz von Müllverbrennungaschen als Gesteinskörnung?
- ▶ Mögliches Hemmnis: Kein Antrieb durch (öffentliche) Bauherren

Rezyklierte Gesteinskörnung:

- ▶ Verfügbarkeit von geeigneter rezyklierter Gesteinskörnung
- ▶ Einsatz von Recyclinggesteinskörnungen im Beton: Geeignete Aufbereitung und lokale Verfügbarkeit in gleichbleibender Qualität und ausreichender Menge erforderlich
- ▶ Müllverbrennungsasche als Gesteinskörnung: Anpassung der Regelwerke erforderlich – Performanceprüfung; Müllverbrennungsasche nicht als Abfall sondern als Produkt
- ▶ Recycling von Betonen mit Müllverbrennungsasche als Gesteinskörnung - "second life" möglich?
- ▶ höherer Energiebedarf notwendig bei Verwendung rezyklierte Gesteinskörnung im Beton im Vergleich zum Einsatz von natürlicher Gesteinskörnung
- ▶ Langfristige zukünftige Verfügbarkeit von industriellen Nebenbestandteilen begrenzt

- ▶ Zielkonflikt zwischen Einsatz von rezyklierter Gesteinskörnung im Beton und im Straßenbau (rezyklierte Gesteinskörnung wird derzeit überwiegend im Straßenbau verwendet)
- ▶ Behördenanforderung: Umweltauforderungen vs. Ressourcenschonung
- ▶ Wie erfolgt die Verwendung bzw. die Deponierung des Rests?
- ▶ Ggf. Problem bei den Expositionsklassen XF (Beanspruchung durch Frost mit/ohne Taumiteleinwirkung), XS (Beanspruchung durch Chlorideinwirkung aus Meerwasser bzw. salzhaltiger Seeluft), XD (Beanspruchung durch Chlorideinwirkung aus Taumittel)
- ▶ Verwendung der Feinfraktion ist derzeit gesetzlich nicht zulässig

Betonbrechsand:

- ▶ Der Einsatz von Betonbrechsanden (≤ 2 mm) als Zuschlagstoff im Beton ist bislang nicht zulässig
- ▶ Anpassung von Normen und Richtlinien zur Verwendung von rezyklierten Gesteinskörnungen (z.B. Betonbrechsande) im Beton

UHPC-Beton:

- ▶ Praktische Erfahrung zum Einsatz von UHPC-Beton notwendig

Synergien und Zielkonflikte mit weiteren rohstoff- und energieintensiven Industrien

Rezyklierte Gesteinskörnung:

- ▶ Rezyklierte Gesteinskörnung ersetzt natürliche Gesteinskörnung [RBE]; je geringer die notwendige Aufbereitung, desto effizienter ist der Einsatz

UHPC-Beton:

- ▶ Anpassungen/Überarbeitungen der gesetzlichen Regelungen für UHPC notwendig

Projektbeispiele in Deutschland

- ▶ Möglicher Einsatz von Feinfraktionen (Brechsande) als Zementhauptbestandteil: Laufendes Forschungsprojekt R-Beton – Ressourcenschonender Beton: Einsatz der Feinfraktion zur Klinkerherstellung, als Dünger oder Zementhauptbestandteil möglich? [RBEa]
- ▶ Einsatz von Carbonbeton: Brücke Albstadt-Ebingen⁵, Rissinstandsetzung und Textilbetonverstärkung eines Silos⁶
- ▶ Zulassungen für Bauwerksverstärkungen

Weitere Projektbeispiele

- ▶ „Green deal“ in den Niederlanden „Improved sustainability of the concrete chain“: Betonhersteller, „Abfall“-Aufbereiter, Behörden
- ▶ Einsatz vorgespannter Carbonbewehrung in der Schweiz

⁵ <https://www.solidian.com/referenzen/details/?reference=12&cHash=c38ed0a97235822b3ba5eb5e7ebaf1af>

⁶ Zuckerfabrik Uelzen, <http://www.torkret.de/leistungsvielfalt/kernkompetenzen/textilbeton-carbonbeton.html>

Einschätzung der Realisierbarkeit von Technologien bzw. Maßnahmen in Deutschland gemäß der Ergebnisse aus dem Workshop

- ▶ Müllverbrennungsasche als Gesteinskörnung: vor 2030
- ▶ Betonrecycling: vor 2030

7.1 Klinkereffizienter Einsatz von Zement in Beton

7.1.1 Ultrahochleistungsbeton (UHPC, ultra high performance concrete)

Hoch- oder Ultrahochleistungsbeton (HPC, UHPC) ist gefügedichter Beton mit oder ohne Stahlfasern, mit einer sehr hohen Druckfestigkeit von mindestens 130 N/mm² und einer maximalen Korngröße zwischen 0,5 und 16 mm [ECRA]. Durch die hohe Packungsdichte des Feststoffs weist UHPC-Beton einen besonders hohen Widerstand gegen Karbonatisierung, gegen das Eindringen von Chloridionen sowie gegen Frostangriff auf. Für einen solchen Beton wird üblicherweise Portlandzement mit einem hohen Klinkeranteil (CEM I) eingesetzt. UHPC-Betone enthalten zwar einen erhöhten Zementgehalt pro t oder m³, allerdings wird weniger Material je funktionaler Einheit (z.B. eines Bauteils) benötigt, was zu einer potentiellen Reduzierung von CO₂-Emissionen führt. Die Dauerhaftigkeit ist aufgrund des dichten Gefüges grundsätzlich hoch. Derzeit ist UHPC noch keine geregelte Bauweise, das heißt, Bauen mit UHPC kann nur auf Basis „Zulassung im Einzelfall (ZiE)“ erfolgen. Eine DAfStb-Richtlinie wird aktuell erarbeitet. Sobald diese veröffentlicht ist, besteht die Chance den Baustoff tatsächlich im Markt zu etablieren.

7.1.2 Carbonbeton

Eine der Herausforderungen für die Dauerhaftigkeit von Stahlbetonelementen und -bauteilen ist die Korrosion der Stahlbewehrung durch das Eindringen von Chloriden bzw. durch Karbonatisierung. Zum Schutz des eingebetteten Stahls für eine Lebensdauer von beispielsweise 50 Jahren wird eine Mindestdicke sowie die Qualität der Betonüberdeckung, durch Vorgabe eines maximalen Wasser-Zementwertes, eines Mindestzementgehalts sowie einer Mindestbetonfestigkeitsklasse (EN 206-1) erreicht. Wenn rostfreier Stahl verwendet wird oder besondere Maßnahmen (z.B. Beschichtungen, kathodischem Korrosionsschutz; Verringerung der Mindestbetondeckung auf Grund zusätzlicher Schutzmaßnahmen) ergriffen werden, kann die minimale Betonüberdeckung gemäß EN 1992-1-1 reduziert werden. Eine innovative Möglichkeit besteht darin, Beton mit nicht-korrodierender, nicht-eisenhaltiger Bewehrung zu kombinieren. Entwickelt wurde anfangs „Textilbeton“ mit alkali-beständigen Glasfasern oder -gelegen als Bewehrung. In aktuellen Forschungsprojekten wird Glas durch Carbon ersetzt. Verglichen mit Stahl hat Carbon einen ähnlichen Elastizitätsmodul, jedoch eine viel höhere Biegezugfestigkeit und eine viel geringere Dichte. Die Herstellung von Carbonbewehrung erfolgt in einem Pyrolyseprozess auf Basis organischer Ausgangsstoffe. Hierbei muss der relativ hohe Energieaufwand für die Herstellung der Carbonfasern berücksichtigt werden. In Kombination mit der nicht-korrodierenden Eigenschaft kann die Verwendung von Carbon als Bewehrung und hoch- oder ultrahochfestem Beton als Matrix zu sehr schlanken Bauteilen mit der gleichen Funktionalität führen wie normale, stahlbewehrte Betonelemente. Für die Herstellung der Betonmatrix kann auf lokale Ausgangsstoffe der deutschen Baustoffindustrie zurückgegriffen werden. Klinkereffiziente Zemente mit höherem Anteil weiterer Hauptbestandteile (siehe Kapitel 5) und mit geringerem Karbonatisierungs- oder Chlorideindringwiderstand können verwendet werden, wenn andere Dauerhaftigkeitsanforderungen – wie z. B. Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand – erfüllt sind. Da einige Fragen hinsichtlich der Bemessung und Dauerhaftigkeit von Carbonbeton in Klärung sind, ist derzeit der Einsatz von Carbonbetonbauteilen nur nach Zulassungsprüfung für einzelne Projekte oder durch allgemeine bauaufsichtliche Zulassungen auf nationaler oder europäischer Ebene möglich. Zurzeit werden vorwiegend Betonfertigteile mit Carbongelegen als Bewehrung in der Praxis verwendet. Carbonstäbe für den Einsatz in Fertigteil- oder Transportbeton befinden sich in der Entwicklungsphase.

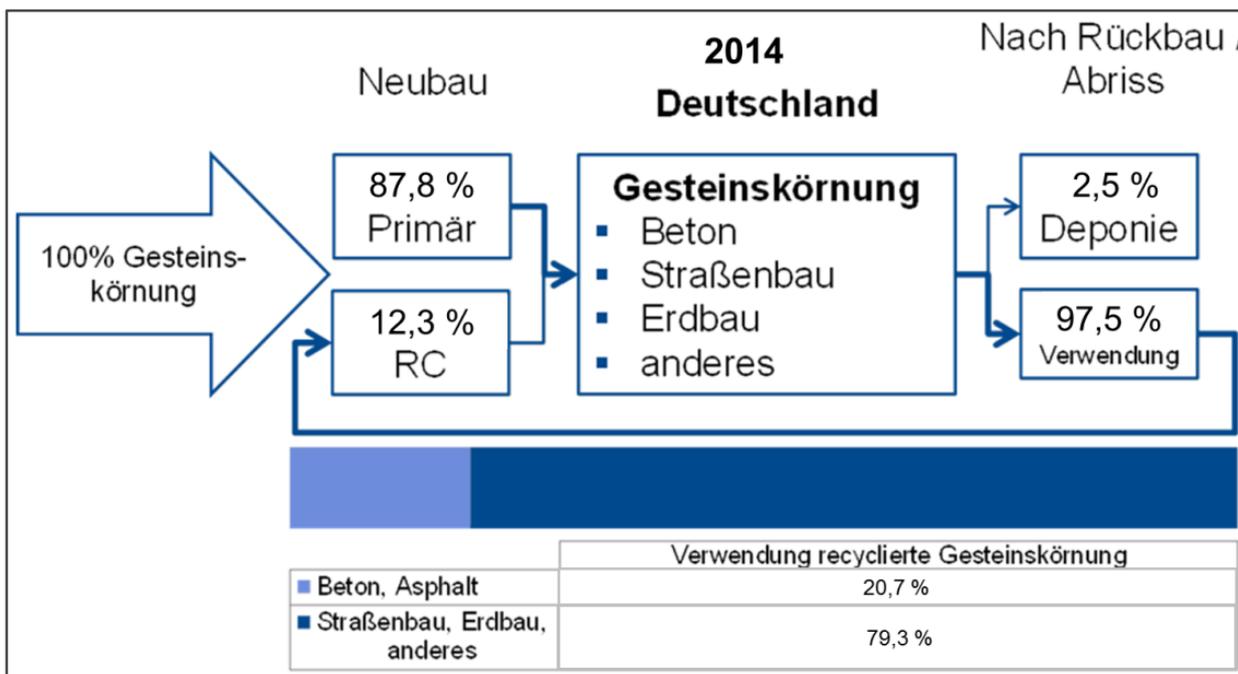
Ein zweiter Anwendungsbereich für Carbonbeton neben Neubauteilen ist die Verstärkung von stahlbewehrten Betonbauten durch dünne, laminierte Schichten aus Carbonbeton. Für diese Anwendung sind technische Zulassungen verfügbar und einige Bauprojekte wurden in der Praxis bereits umgesetzt (Brücke Albstadt-Ebingen⁷, Rissinstandsetzung und Textilbetonverstärkung eines Silos⁸). Es muss sich jedoch zeigen, in welchen Bereichen Carbonbeton eine wirtschaftliche Alternative zu Stahlbeton sein kann [ECRA]. Das Recycling von Carbonfaserabfällen ist jedoch eine bislang ungelöste Frage, sodass hierzu weiterer Forschungsbedarf besteht.

7.2 Betonrecycling

7.2.1 Recyclingquote in Deutschland

Die Recyclingquote mineralischer Bauabfälle in Deutschland lag bei 97,5 % im Jahr 2014 [AKB, BBS, KRB]. Dies bedeutet, dass die aus Abbruch bzw. Rückbau gewonnenen Materialien zu 97,5 % wiederverwendet werden. 2,5 % werden deponiert. Mit den 97,5 % können 12,3 % der in Deutschland benötigten Gesteinskörnungen bereitgestellt und entsprechendes Primärmaterial eingespart werden. Von diesen 12,3 % rezyklierter Gesteinskörnung (RC) geht ein geringer Anteil von 20,7 % in die Herstellung von Beton und Asphalt. Der Rest wird beispielsweise im Straßenbau verwendet und ersetzt dort ebenfalls Primärgesteinskörnung (79,3 %). Dies wird im folgenden Diagramm näher erläutert:

Abbildung 20: Recyclingsituation in Deutschland 2014



Quelle: VDZ, eigene Darstellung, [BBS, KRB, MUE]

Der Wiedereinsatz von aufbereiteten mineralischen Abfällen für die Betonherstellung stellt hinsichtlich der eingesetzten Mengen einen wichtigen Optimierungsansatz dar. Durch die Verwertung von rezyklierter Gesteinskörnung aus beispielsweise dem Hochbau zurück in den Hochbau oder den Straßenbau, werden Primärrohstoffe wie Kies und Sand substituiert und somit eingespart [UBA]. Nach

⁷ <https://www.solidian.com/referenzen/details/?reference=12&cHash=c38ed0a97235822b3ba5eb5e7ebaf1af>

⁸ Zuckerfabrik Uelzen, <http://www.torkret.de/leistungsvielfalt/kernkompetenzen/textilbeton-carbonbeton.html>

mehreren Untersuchungen zum Einsatz von rezyklierten Gesteinskörnungen ist die teilweise Substitution von natürlichen Gesteinskörnungen durch rezyklierte Gesteinskörnungen in Abhängigkeit des Anwendungsbereiches des Betons möglich [MUEa].

Bei der Verwendung von rezyklierten Gesteinskörnungen ist jedoch zu berücksichtigen, dass diese im Vergleich zu natürlichen Gesteinskörnungen eine höhere Porosität aufweisen und den Zementverbrauch, den Wasseranspruch, die Verarbeitbarkeit sowie die Verdichtung des Betons beeinflussen können. Aus diesem Grund ist die Verwendung im Beton in den Normen bisher eingeschränkt [ROH]. Bevor das rezyklierte Material wieder der Betonherstellung zugeführt werden kann, muss zuerst ein qualifizierter, umweltverträglicher Abbruch oder Rückbau der Gebäude erfolgen. Anschließend wird das Material in mobilen oder stationären Anlagen zu Gesteinskörnungen mechanisch oder thermomechanisch aufbereitet, die dann als Gesteinskörnung in der Betonherstellung oder im Straßenbau als sekundäre Rohstoffe verwendet werden können. Durch den Einsatz von mobilen Anlagen können die Transportwege zur Weiterverarbeitung des Materials verkürzt, wodurch die Emissionen reduziert werden [RBE]. Die aufbereiteten rezyklierten Gesteinskörnungen müssen bestimmte Anforderungen an Eigenschaften, Materialzusammensetzung und Korngrößen erfüllen.

Da in den nächsten Jahrzehnten ein Anstieg von Betonabbruchmengen erwartet wird, steigt das Potential zum Einsatz von rezyklierten Gesteinskörnungen [ROH].

- ▶ Anwendung im Beton auf Gesteinskörnungen > 2 mm beschränkt
- ▶ Feinfraktion (Brechsand) bisher in Erdbau und Sandbettungen verwertet
- ▶ Bei zukünftig ggf. erhöhtem Anteil an RC-Material für den Betonbau ergeben sich ggf. Schwierigkeiten mit geeigneten Verwertungsmöglichkeiten

Förderliche Aspekte:

- ▶ Einfachere Verwendung rezyklierter Gesteinskörnungen in der Praxis (Normenänderung in Erarbeitung)
- ▶ Verwendung von rezykliertem Sand / Brechsand (Normenänderung in Erarbeitung)
- ▶ Sicherstellung gleichmäßiger Stoffströme
- ▶ Sicherstellung geeigneter Güte der rezyklierten Gesteinskörnungen (keine schwankenden Eigenschaften, kein negativer Einfluss auf Frisch- und Festbetoneigenschaften)

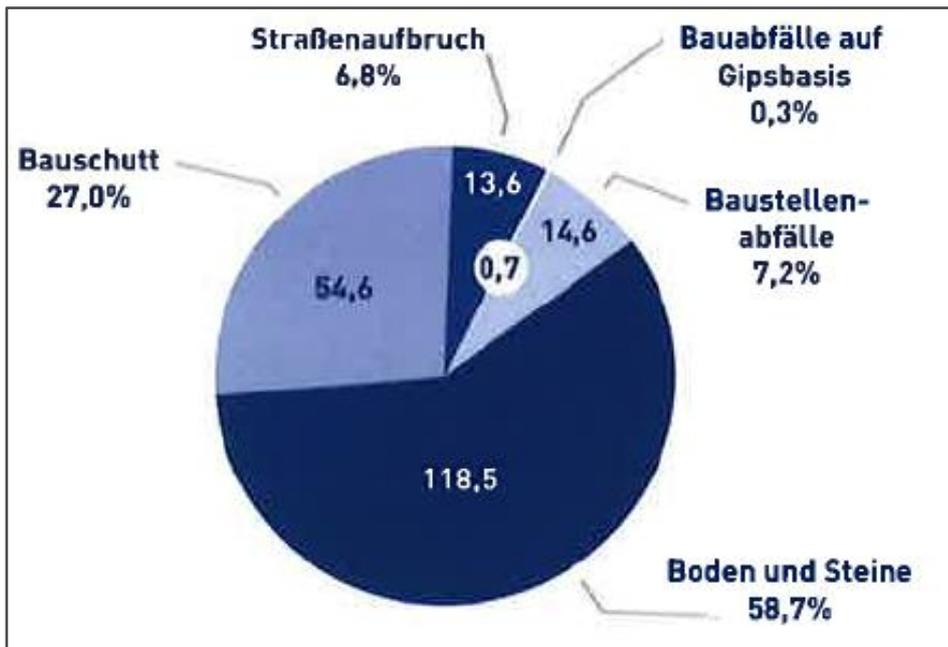
Forschungsansätze:

- ▶ Aufbereitungsverfahren um gleichwertige Qualität zu erreichen, Fragmentierung

7.2.2 Einsatz von Betonen mit rezyklierten mineralischen Baumaterialien

Mineralische Abfälle, wie Beton, Mauer-, Ziegel- und Kalksandsteine fallen in großen Mengen an. Im Jahr 2014 fielen 202 Mio. t mineralische Bauabfälle an (s. Abbildung 21). Sie enthalten eine große Menge an Rohstoffen, wie beispielsweise Kalk, Gips, Schiefer, Kies und Sand. Nach einer entsprechenden Aufbereitung können die mineralischen Abfälle als Recyclingmaterial dem Baustoffkreislauf zurückgeführt und somit umweltverträglich verwertet werden. In Deutschland wird das rezyklierte Material heute überwiegend im Straßen- oder Landschaftsbau eingesetzt. Bauschutt, Straßenaufbruch und Baustellenabfälle machen rund 41 % der mineralischen Bauabfälle aus. Die mittlere Verwertungsquote für diese drei Gruppen beträgt rund 95 %. Recyclingbaustoffe konnten 2014 rund 12,3 % des Bedarfs an Gesteinskörnungen decken (RC-Gesteinskörnung, Abbildung 20).

Abbildung 21: Statistisch erfasste Mengen mineralischer Bauabfälle 2014 in Mio. t



Quelle: VDZ, eigene Darstellung, [BBS, KRB]

Die Quoten rezyklierter Gesteinskörnungen im Beton sowie die Gesamtrecyclingquoten von Beton sind innerhalb Europas sehr unterschiedlich. Die Unterscheidung verschiedener Recyclingabstufungen („Recycling, Upcycling, Downcycling“) ist vor dem Hintergrund einer nötigen umfassenden Bewertung nicht sinnvoll. Zweck des Recyclings ist das Einsparen von Primärrohstoffen und Energie im Rahmen einer Nachhaltigkeitsbetrachtung [MUE]. Generell stellt der Betonbau höhere Anforderungen an rezyklierte Gesteinskörnungen als zum Beispiel der Straßenbau. In beiden Fällen wird als Primärrohstoff natürliche Gesteinskörnung ersetzt. Im Betonbau ist jedoch ein zusätzlicher Aufwand für die Aufbereitung und Qualitätssicherung der rezyklierten Gesteinskörnung erforderlich. Lebenszyklusanalysen gemäß EN 15804 wurden durchgeführt, um die Umwelteinflüsse der Verwendung von rezykliertem Beton als Bestandteil von Straßenbettungen (Szenario A) bzw. Verwendung von rezykliertem Beton als Gesteinskörnung in Beton nach DIN 1045-2 (Szenario B) zu untersuchen. Die Einzelheiten können einer Studie [MUE] entnommen werden. Als Ergebnis lässt sich zusammenfassen, dass bei der in der Studie betrachteten Recyclinganlage die Verwendung rezyklierter Gesteinskörnung im Vergleich zu natürlicher Gesteinskörnung (Kies) in Szenario A zu einer Verringerung von CO₂-Äquivalenten (Treibhauspotential) sowie einer Einsparung von erneuerbarer und nicht-erneuerbarer Primärenergie je Tonne Gesteinskörnung führt. In Szenario B sind dagegen Mehraufwendungen von CO₂-Äquivalenten (Treibhauspotential) sowie erneuerbarer und nicht-erneuerbarer Primärenergie je m³ Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung aufzuwenden. Wenn also die Verwendung rezyklierter Materialien im Straßenbau möglich ist, sollte dieser Verwertungsweg in den meisten Fällen bevorzugt werden [MUE]. Hinsichtlich der optimalen Nutzung von rezykliertem Beton besteht eine Gefahr, dass pauschale Ansätze von Recyclingquoten für definierte Anwendungen ohne einen situationsbedingten Vergleich (Lebenszyklusanalyse) weniger nachhaltige Verwertungswege vorgeben.

7.2.3 Feinfraktionen aus rezyklierten Gesteinskörnungen (Brechsande)

Brechsande sind die feinkörnigen Fraktionen aus rezyklierten Gesteinskörnungen mit einer Korngröße von ($\leq 4\text{mm}$). Der beim Betonrecycling anfallende Anteil dieser Feinfraktionen beträgt etwa 40 bis 60 % [ROH]. Die DAfStb-Richtlinie „Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierter Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620“ regelt den Einsatz dieser sog. RC-Gesteinskörnungen. Allerdings schließt sie die Verwendung von feinen Fraktionen ($\leq 2\text{mm}$) in der Betonproduktion aus.

Als Grund werden hauptsächlich die Eigenschaften von Brechsanden genannt (z. B. chemische Zusammensetzung, Einfluss auf die Dauerhaftigkeit von Beton), die vorrangig auf die am natürlichen Gesteinskorn anhaftenden Reste der Zementsteinmatrix zurückzuführen sind. Derzeit wird in Deutschland ein Forschungsvorhaben [RBE] zum Einsatz von rezyklierten Gesteinskörnungen in der Zement- und Betonherstellung durchgeführt. In den Untersuchungen zum Einsatz von gemahlenem Brechsand als Hauptbestandteil im Zement (sog. R-Zement) wurden bis zu 30 Masse-% Brechsand verwendet [SEV]. In Abhängigkeit des Baumaterials, aus dem der Brechsand für die Laborversuche gewonnen wurde, sowie in Abhängigkeit des Brechsandanteils und der Klinkergranulometrie zeigten die Ergebnisse, dass Brechsande als Zementhauptbestandteil geeignet sind und Betone mit R-Zementen wesentliche dauerhaftigkeitsrelevante Zulassungskriterien erfüllen können. Allerdings ist Brechsand nach EN 197-1 nicht als Hauptbestandteil definiert. Für die Anwendung von Brechsanden im Zement sowie für die Anwendung von R-Zementen im Beton sind entsprechende Zulassungen und ggf. Anpassungen der Normen und Richtlinien erforderlich.

Im Bereich der Klinkererzeugung können Brechsande als Alternative für Sand oder andere Siliziumträger als Korrekturstoff in der Rohmaterialmischung von Portlandzementklinker in geringen Mengen verwendet werden.

7.2.4 Müllverbrennungsasche als Gesteinskörnung

Müllverbrennungsasche wird in Deutschland überwiegend im Deponiebau eingesetzt (s. auch Kapitel 4.4). Eine Verwertung dieser Aschen als Gesteinskörnung in der Betonherstellung, z.B. für unbewehrte Produkte, findet bislang nicht statt. Eine mögliche Nutzung der Asche könnte der Einsatz in Regionen darstellen, in denen natürliche Gesteinskörnungen nicht ausreichend verfügbar sind. Etwa 5 Mio. Tonnen Müllverbrennungsasche könnten theoretisch ca. 2 bis 3 Mio. Gesteinskörnungen pro Jahr konstant bis 2030 ergeben. Wichtige Voraussetzungen für die mögliche Verwendung der Asche sind eine eindeutige Definition der Zusammensetzung und die Sicherstellung der Gleichmäßigkeit des Stoffes, um die Betonqualität nicht zu beeinträchtigen. Das erforderliche Entfernen von metallischen Aluminium und weiteren umweltrelevanten Bestandteilen ist bislang mit einer kostenintensiven Technologie verbunden, was ein wesentliches Hemmnis für den Einsatz von Müllverbrennungsasche als Gesteinskörnung ist.

7.3 Einsatz von Betonen mit weiteren industriellen Nebenprodukten

7.3.1 Steinkohlenflugasche

Steinkohlenflugasche fällt in Kohlekraftwerken an und kann vielseitig in der Bauindustrie eingesetzt werden. Steinkohlenflugasche wird in Deutschland im Wesentlichen als Betonzusatzstoff und nur in geringem Maß als Zementhauptbestandteil eingesetzt. Im Jahr 2014 wurden etwa 2,8 Mio. t Flugasche in der Betonherstellung vermarktet. Der Einsatz von Steinkohlenflugasche als weiterer Hauptbestandteil in der Zementherstellung und als alternativer Rohstoff in der Klinkerherstellung ist in Kapitel 5.2 und 4.3 beschrieben.

Gemäß deutschem Regelwerk (DIN EN 206-1 / DIN 1045-2) kann Steinkohlenflugasche als Betonzusatzstoff bis zu 33 % auf den Zementgehalt angerechnet werden.

Das Porengefüge von Festbeton wird durch zementähnliche Hydratationsprodukte, die durch die puzolanische Reaktion der Flugasche entstehen, positiv beeinflusst. Hierdurch kann das Gefüge dichter und Festbeton- sowie auch Frischbetoneigenschaften verbessert werden. Wie beim Einsatz von Flugasche im Zement können auch durch deren Einsatz im Beton entsprechende Mengen an Rohstoffen, CO₂-Emissionen gemindert und Energie eingespart werden. Allerdings muss die begrenzte Verfügbarkeit von Steinkohlenflugasche berücksichtigt werden (prognostizierte Verfügbarkeit s. Kapitel 4, 5.2, 12.2).

7.3.2 Hüttensandmehl

Hüttensandmehl wird in Deutschland überwiegend als Zementhauptbestandteil verwendet, kann jedoch auch dem Beton als Zusatzstoff hinzugefügt werden. Die Normen DIN EN 206-1 / DIN 1045-2 regeln die Verwendung von Hüttensand in Beton, Mörtel, und Einpressmörtel. Eine Kombination von Hüttensandmehl und Flugasche und/oder Silikastaub zur gleichzeitigen Verwendung als Betonzusatzstoff ist nicht erlaubt [THI].

8 Abscheidung, dauerhafte Speicherung und Nutzung von CO₂ aus gasfassten Quellen

In der Zementindustrie wird seit Mitte der 2000-er Jahre die Anwendung von Technologien zur CO₂-Abscheidung (Carbon Capture, CC) diskutiert und erforscht [ECRA]. Die im Klinkerbrennprozess anwendbaren Verfahren befinden sich im Stadium der Forschung und Entwicklung. Ergebnisse zu CC-Verfahren aus Pilotversuchen oder industriellen Versuchsstudien in der Zementindustrie sind derzeit verfügbar [ECRA; ECRA: „Deployment of CCS in the Cement Industry“]. Nach umfangreichen Untersuchungen zur technischen und wirtschaftlichen Machbarkeit [ECRA, CEMd, CEMe] erfordern sie insbesondere eine Demonstration der Technologien im industriellen Maßstab, bevor sie realisiert werden können.

Heute werden die Kosten für eine Abtrennung auf 50 bis 70 €/t abgeschiedenes CO₂ geschätzt [ECRA], womit sich die Herstellungskosten für eine Tonne Zement signifikant erhöhen würden. Vor diesem Hintergrund und den hohen Investitions- und Betriebskosten (s. z.B. auch Kapitel 8.1.2) wären effektive und langfristig zuverlässige, gesetzliche Regelungen zum Schutz vor Carbon Leakage unerlässlich [VDZ15; CEMb].

Aktuelle Analysen deuten darauf hin, dass nach umfänglicher Umsetzung von anderen CO₂-Minderungsmaßnahmen, insbesondere zur Minderung des hohen Anteils von prozessbedingten CO₂-Emissionen die Abscheidung und dauerhafte Speicherung von CO₂ erforderlich bleibt [IEAa; CEMb; ECRAe]. Für die dauerhafte Speicherung von CO₂ in unterirdischen geologischen Formationen (CCS: Carbon Capture and Storage) und für die Durchführung von großtechnischen CCS-Projekten mit der vollständigen CCS-Prozesskette (Abscheidung, Transport, Speicherung) ist in Deutschland derzeit keine Akzeptanz und ausreichende Rechtssicherheit vorhanden. In anderen europäischen Ländern und insbesondere im Offshore-Bereich zeichnet sich eine bessere Akzeptanz ab. Der Transport und die Speicherung von sehr großen Mengen an CO₂ stellen außerhalb der Anwendungen im Offshore-Bereich und zur Steigerung der Öl- und Gasgewinnung (Enhanced Oil Recovery) eine nicht vollständig gelöste Frage dar. Eine für CCS erforderliche CO₂-Infrastruktur ist in den meisten Ländern noch nicht verfügbar. Allerdings werden Fragen zur nötigen und möglichen CO₂-Infrastruktur zunehmend zum Thema aktueller Forschungsvorhaben auf der regionalen und europäischen Ebene (In4Clima.NRW, EU Horizon 2020 Projekte). Bis 2020 kann erwartet werden, dass weitere Forschungsprojekte oder Pilotversuche durchgeführt werden, um praktische Erfahrungen mit CCS-Technologien zu sammeln. Für die Anwendung ist hierbei als grundlegende Voraussetzung zunächst eine erfolgreiche Demonstration der nötigen Technologien im Industriemaßstab zu nennen. Weiterhin gilt, dass wirtschaftliche und politische Rahmenbedingungen eine Anwendung von CCS ohne das hohe Risiko der Verlagerung von Produktionsstandorten (Carbon Leakage) ermöglichen müssen.

Aus diesen Gründen werden Überlegungen für die Nutzung von an Zement- und Kalkofenanlagen abgeschiedenem CO₂ (Carbon Capture and Utilization, CCU) angestellt. In den CSI/ECRA Technology Papers 2017 [ECRA] wurden verschiedene „Reuse“-Möglichkeiten beschrieben (z.B. Power to Gas, Power to Liquid, Herstellung von Grundchemikalien, Enhanced Oil Recovery, Kultivierung von Mikroalgen, Mineralisierung) und Angaben zu den geschätzten Kosten und zum Potenzial der jeweiligen Verfahren gemacht. Grundsätzlich lässt sich für die meisten Verwertungspfade feststellen, dass eine Wirtschaftlichkeit dieser Verfahren momentan nicht gegeben ist. Eine wirtschaftliche Nutzung von größeren Mengen an abgeschiedenem CO₂ ist zurzeit allenfalls bei der Öl- und Gas-Gewinnung möglich (je nach den aktuellen Öl- und Gaspreisen). Bei der Nutzung von CO₂ als Rohstoffquelle für kohlenstoffhaltige Produkte der chemischen Industrie ist der zusätzliche sehr hohe Energieaufwand zu berücksichtigen [SAP; BAZ; JOR].

8.1 Carbon Capture

Grundsätzlich kommen für die CC-Technologien das Oxyfuel-Verfahren sowie verschiedene Post-Combustion-Verfahren in Betracht [ECRAB; ECRAC]. Dazu wurden bisher Labor- und Technikumsversuche und in einzelnen Fällen auch Pilotversuche in Zement- bzw. Kalkwerken durchgeführt. Die anwendbaren Verfahren befinden sich im Stadium der Forschung, Entwicklung und Demonstration [ECRA]. Ergebnisse zu CC-Verfahren aus Pilotversuchen oder industriellen Versuchsstudien in der Zementindustrie sind derzeit verfügbar. Nach umfangreichen Untersuchungen zur technischen und wirtschaftlichen Machbarkeit [ECRAD, CEMd, CEMe] erfordern sie insbesondere eine Demonstration der Technologien im industriellen Maßstab, bevor sie realisiert werden können. Die Abscheidung von CO₂ mit verschiedenen Technologien erfordert i.d.R. einen deutlich höheren Aufwand an Energie [ECRAB; ECRAC; JOR].

Während der Einsatz von Carbon Capture-Technologien auch in bestehenden Zementwerken grundsätzlich möglich erscheint, stellen die wirtschaftlichen und rechtlichen Rahmenbedingungen eine große Herausforderung für eine industrielle Anwendung dar. Mittelfristig wird erwartet, dass hinsichtlich CC-Technologien zwischen 2020 und 2030 mehrere Demonstrationsprojekte im industriellen Maßstab realisiert werden [CEMb]. Nach 2030 könnten die Verfahren zur CO₂-Abscheidung bei geeigneten Voraussetzungen industriell angewendet werden, was in der Zementindustrie und insbesondere für bislang nicht vermeidbare, prozessbedingte CO₂-Emissionen zu deutlich höheren Minderungen führen könnte. Hierzu müssen relevante Fragen zur Bewertung von Technologien zur Abscheidung und Nutzung von CO₂ hinsichtlich der Speicherdauer, Speichermenge und Energiebedarf für die nachfolgende Prozesskette gelöst werden.

Möglichkeiten zur effizienten Nutzung von Ressourcen und Energie

- ▶ Die Technologien für eine Abscheidung von CO₂ sind im Wesentlichen verfügbar und hinsichtlich ihrer Anwendung in der Zementindustrie Gegenstand laufender Forschungs- und Entwicklungsprojekte
- ▶ ca. 90 % Abscheidung scheinen möglich
- ▶ CO₂ Capture mit Algen: Von einzelnen Zementunternehmen wurden bereits kleinere Projekte zur Kultivierung von Mikroalgen mit CO₂-haltigem Abgas von Zementofenanlagen außerhalb Deutschlands durchgeführt.
- ▶ E-Power-Converter (Umwandlung von CO₂ zu CO als Brenngas)

Voraussetzungen, unterstützende Faktoren und mögliche Hemmnisse

- ▶ Voraussetzung: Klärung der Rechtslage zur Abscheidung von CO₂-Emissionen, Transport und Speicherung
- ▶ Voraussetzung: Nachfrage nach CO₂-neutrale Zemente
- ▶ Unterstützende Faktoren: Mögliche Optionen zur Speicherung in Norwegen und Niederlande
- ▶ Unterstützende Faktoren: Bearbeitung von Fallbeispielen zur CO₂-Infrastruktur
- ▶ Mögliches Hemmnis: Vor allem Investitionen/Finanzierung sind problematisch
- ▶ Mögliches Hemmnis: Carbon Leakage, Gefahr von Verlagerung der Produktionsstandorte
- ▶ Mögliches Hemmnis: Mangelnde Förderung
- ▶ Mögliches Hemmnis: Die Komplexität der Prozesse steigt
- ▶ Mögliches Hemmnis: Speicherung in Europa kaum bzw. nicht umsetzbar (außer Nutzung/UK)
- ▶ Mögliches Hemmnis: Begrenzte CO₂-Speicherkapazität
- ▶ Mögliches Hemmnis: E-Power-Converter: Hoher Stromverbrauch und Koks wird benötigt
- ▶ Mögliches Hemmnis: Deutlich erhöhter Energieverbrauch

Synergien und Zielkonflikte

- ▶ Synergien zur CO₂-Nutzung
- ▶ Zielkonflikt: Deutlich höherer Preis für CO₂-neutrale Zemente

Projektbeispiele

- ▶ ECRA Carbon Capture Projekt zur Demonstration der Oxyfuel-Technologie
- ▶ EU-Forschungsprojekte: CEMCAP [CEMg], LEILAC [LEIa] und CLEANKER [CLE]
- ▶ NORCEM Projekt zur CO₂-Abscheidung in einem Zementwerk in Brevik, Norwegen [NOR]
- ▶ (Pilot)projekte in MVAs, z.B. Hengelo, Oslo
- ▶ Norwegische Projektentwicklung zur CO₂-Abscheidung, Transport und dauerhaften Speicherung

Einschätzung der Realisierbarkeit von Technologien bzw. Maßnahmen in Deutschland gemäß der Ergebnisse aus dem Workshop

- ▶ Carbon Capture: nach 2030

Förderliche Aspekte:

- ▶ Öffentliche Beschaffung von CO₂-neutralem Zement
- ▶ Politischer Wille und belastbare politische Entscheidungen
- ▶ Carbon Capture erfordert effektiven Carbon-Leakage-Schutz
- ▶ Rahmenbedingungen für eine Refinanzierung der zusätzlichen Produktionskosten in der Größenordnung eines 2- bis 3-fachen Produktpreises
- ▶ Investitionssicherheit und -förderung
- ▶ Neubewertung von Carbon Storage Off-shore und On-shore

Hinderliche Aspekte:

- ▶ CO₂-Menge und Höhe der spezifische CO₂-Vermeidungskosten
- ▶ Unklare politische Optionen für den mittel- und langfristigen Einsatz von Technologien zur CO₂-Speicherung und -Nutzung
- ▶ CCS-Gesetzgebung in Deutschland und unterschiedliche regionale CCS-Politiken auf Länder-ebene
- ▶ CCU erscheint nur teilweise zielführend zur Minderung von CO₂-Emissionen in die Atmosphäre hinsichtlich der Lebenszeit von CCU-Produkten
- ▶ Begrenzter Kohlenstoffbedarf der chemischen Industrie
- ▶ Gefahr eines ungleichen Wettbewerbs mit anderen Bauprodukten
- ▶ Komplexität der Bewertung

Forschungsansätze:

- ▶ Ziel: CO₂-neutrales Zementwerk, Projektbeispiel: NORCEM Brevik, Norwegen
- ▶ CO₂-Transport Infrastruktur
- ▶ Klärung von Sicherheitsaspekten und Kosten von CO₂-Transport und -Speicherung
- ▶ Gesellschaftliche Aufgabe und Voraussetzungen zur Entscheidung der Technologieoption

Anmerkungen:

- ▶ Großbritannien, Norwegen, Niederlande verhalten sich pro-aktiv zur Nutzung von Carbon-Capture-Technologien und der Off-shore-Speicherung von CO₂
- ▶ Erfolgsfaktoren sind hierbei eine klare Zielsetzung zu den Technologien zur CO₂-Abscheidung, -Transport und -Speicherung und eine regionale Lösung des CO₂-Managements

8.1.1 Pre-Combustion-Technologie

Die Pre-Combustion-Technologie, die auf der Dekarbonisierung von Brennstoffen beruht, hat für den Klinkerbrennprozess nur ein begrenztes Potential. Grund dafür ist, dass nur etwa 1/3 der CO₂-Emissionen aus dem Einsatz von Brennstoffen bei der Klinkerherstellung vermieden werden können. Für die Vermeidung der überwiegend prozessbedingten CO₂-Emissionen aus der Kalksteinentsäuerung und eine vollständige Abscheidung von CO₂ aus dem Klinkerbrennprozess sind aus heutiger Sicht die Oxyfuel- und Post-Combustion-Technologien eher geeignet.

8.1.2 Oxyfuel-Technologie

Bei der Oxyfuel-Technologie wird reiner Sauerstoff gemischt mit rezykliertem CO₂ anstelle von Luft in der Feuerung eines Drehrohrofens verwendet, wodurch ein möglichst CO₂-reiches Abgas entsteht [E-CRA; ECRAB; ECRAC]. Bei dieser Abscheidetechnologie ist mit einem deutlichen Anstieg des elektrischen Energieeinsatzes zu rechnen. Die Luftzerlegung erfolgt in einer sogenannten CPU-Anlage (CO₂ purification unit). Dieser Prozess und der Betrieb einer solchen Anlage erfordern zusätzliche elektrische Energie. Aus diesem Grund wird der elektrische Energiebedarf pro Tonne Klinker voraussichtlich um etwa den Faktor 2 ansteigen. Der thermische Energiebedarf bleibt auf demselben Niveau. Die Produktionskosten für Zement steigen um 40 bis 50 % bezogen auf das heutige Niveau an und führen zu der Gefahr einer Produktionsverlagerung (Carbon Leakage). Der Grad der Abscheidung bei der Oxyfuel-Technologie beträgt bis zu 95 %. In den CSI/ECRA Technology Papers 2017 [ECRA] wurde eine Abschätzung der Investitions- und Betriebskosten vorgenommen. Die Investitionskosten beinhalten die Sauerstoffzufuhr und CO₂-Anreicherung. Gemäß dieser Abschätzung würden voraussichtlich im Jahr 2030 die Investitionskosten für eine Neuinstallation einer Anlage mit Oxyfueltechnologie 355 bis 380 Mio. € betragen. Die Erhöhung der Betriebskosten würde sich voraussichtlich auf 8 bis 13 €/t Zement beziffern. Die Umrüstung bestehender Anlagen scheint unter bestimmten standortspezifischen Voraussetzungen möglich [CEMe]. Bei einer Umrüstung einer bestehenden Anlage sind die Investitions- und Betriebskosten für das Jahr 2030 mit 105 Mio. € und 9 bis 14 €/t Zement abgeschätzt worden [ECRA]. Hierin nicht enthalten sind die zusätzlichen Kosten für den Transport und die weitere Nutzung oder Speicherung des CO₂. Die Kostenabschätzung unterliegt einer großen Unsicherheit, hinsichtlich der ausstehenden weiteren Entwicklung dieser Technologie.

In den letzten Jahren wurden weiterführende Forschungsprojekte⁹ in der Zementindustrie durchgeführt, in denen die Möglichkeiten zur Gestaltung eines Oxyfuel-Klinkerbrennprozesses und die Auswirkungen auf die Produktqualität und Kosten genauer untersucht wurden. Die Entwicklung der Oxyfuel-Technologie ist inzwischen soweit fortgeschritten, dass im Rahmen des ECRA-Projekts derzeit Fördermöglichkeiten für ein Demonstrationsprojekt gesucht werden.

⁹ z.B. ECRA CCS Projekt, EU-Forschungsprojekt CEMCAP , <https://www.vdz-online.de/en/research/current-projects/cemcap/>

8.1.3 Post-Combustion-Technologie

Post-Combustion-Technologien sind End-of-Pipe-Maßnahmen zur CO₂-Abscheidung, die keine grundlegenden Änderungen im Klinkerbrennprozess erfordern. Aus diesem Grund wären diese Technologien für die Nachrüstungen an bestehenden Zementöfen besonders gut anwendbar [CEMe]. Die am besten erforschte Methode ist die chemische Absorption, zu der Betriebserfahrungen aus verschiedenen Branchen zur Verfügung stehen und bei der hohe Abscheideraten erreichbar sind. Das Verfahren wurde in der Zementindustrie im Pilotmaßstab¹⁰ getestet [NOR; ECRA]. Bei dieser Abscheidetechnologie verdoppeln sich etwa der thermische und der elektrische Energieeinsatz. Die erheblichen zusätzlichen Kosten stellen ein großes Hindernis für eine Anwendung der Post-Combustion Technologie im industriellen Maßstab dar.

8.1.4 Weitere Verfahren zur CO₂-Abscheidung

8.1.4.1 Calcium-Looping

Eine weitere Technologie zur Abscheidung von CO₂ ist das Calcium-Looping-Verfahren, bei dem CO₂ durch CaO, welches aus Kalkstein gewonnen wird, absorbiert wird. Bei der Absorption entsteht CaCO₃, das in einem Kalzinator unter Zufuhr von Wärme wiederum regeneriert wird, wobei das CO₂ freigesetzt und anschließend gespeichert werden kann. Das Calcium-Looping-Verfahren ist Gegenstand laufender Forschungsvorhaben [ECRA]. Ein Beispiel ist das EU-Forschungsprojekt CLEANKER [CLE], das im Oktober 2017 beginnen wird.

8.1.4.2 Direkte Kalzinierung

Die Abscheidung von freiwerdendem CO₂ aus Kalkstein des Rohmaterials während der Kalzinierung wird in der Zement- und Kalkindustrie beim EU-Forschungsprojekt LEILAC [LEIa] untersucht. Die Abscheidung erfolgt in einem indirekt beheizten Kalzinator, in dem die Wärme der Abgase über einen speziellen Stahlkessel auf das Rohmaterial übertragen wird. Das Prozess-CO₂ kann separat erfasst werden, da die Ofenabgase mit dem Rohmaterial nicht in Berührung kommen. Die Qualität des Klinkers ist bei diesem Abscheideverfahren weitestgehend unabhängig von der Technologie der CO₂-Abscheidung. Andererseits ist der Grad der Abscheidung von CO₂-Emissionen signifikant niedriger (etwa 60 bis 70 %) im Vergleich zur Oxyfuel-Technologie (bis 95 %) (Oxyfueltechnologie s. Kapitel 8.1.2). Technische Herausforderungen, wie z.B. die Materialauswahl des indirekt beheizten Kalzinators aufgrund der für die Kalzinierung erforderlichen hohen Temperaturen oder aufgrund des Spurenelementeintrags in den Kalzinator durch das Rohmehl sowie mögliche Korrosion müssen gelöst werden. Zusätzliche technische Herausforderungen und Einschränkungen hinsichtlich der Kontinuität des Prozesses zur Kalzinierung ergeben sich für den Fall der Nutzung von Solarenergie für die direkte Kalzinierung [CALa].

¹⁰ NORCEM Projekt, http://www.norcem.no/en/carbon_capture

8.2 Stoffliche Nutzung von CO₂

Der Zementsektor ist einer der großen industriellen CO₂-Quellen mit einem hohen Anteil an unvermeidbarem prozessbedingtem CO₂ (ca. 2/3). Sobald zukünftig großtechnische Projekte zur CO₂-Abscheidung durchgeführt würden, könnten sehr große Mengen CO₂ für eine stoffliche Nutzung bereitgestellt werden (CCU: Carbon Capture and Utilization). Innerhalb der Zementindustrie wurden bereits Studien und kleinere Versuche zur Verwertung bzw. stofflichen Nutzung von CO₂ aus Zementofenanlagen durchgeführt.

Die aktive Karbonatisierung der Silikate in einer CO₂-reichen Atmosphäre bei Umgebungsgasdrücken, dient als CO₂-Senke mit dauerhafter Speicherung in den hergestellten Bauprodukten (s. auch Kapitel 6.3). Vor dem Hintergrund der Erhärtung unter Einsatz von CO₂ erscheint diese Technologie für die Herstellung unbewehrter Fertigteilelemente und in der Nähe von CO₂-Quellen mit CCU-Technologie geeignet zu sein [ECRA]. Die Unternehmen LafargeHolcim und Solidia Technologies entwickelten den sogenannten Solidia Zement. Der kalksteinarme und nicht hydraulische Zement besteht hauptsächlich aus Kalziumsilikatphasen mit einem niedrigen Kalkgehalt, wie z.B. Wollastonit und Rankinit. Er kann bei einer Sintertemperatur von 1.200 °C aus den gleichen Rohstoffen wie für den Portland-Zement hergestellt werden. Aufgrund des geringen Kalkgehalts und der niedrigeren Sintertemperatur wies die Herstellung von Solidia-Zement im Vergleich zur Herstellung von herkömmlichem Portland-Zement nach Angabe der Unternehmen einen bis zu 30 % geringeren CO₂-Ausstoß und 30 % geringeren Energieverbrauch auf. Der Zement wird z.B. für den sogenannten Solidia-Beton verwendet, der aus den gleichen Rohstoffen hergestellt wird wie herkömmlicher Portlandzementbeton und vergleichbare Eigenschaften aufweist. Die Herstellung von Solidia-Beton ermöglicht sehr kurze Aushärtungszeiten (etwa 24h). Bei diesem Aushärtungsprozess können durch die exotherme Reaktion zwischen gasförmigem CO₂ und Kalziumsilikaten im Vergleich mit der Nutzung von Portlandzement in Beton kurzfristig zusätzlich etwa 240 kg CO₂/t Zement gebunden werden [SOL]. Dies übersteigt um ein Mehrfaches die Menge an CO₂, die entsprechend aktueller Einschätzungen durch Karbonatisierung der Oberflächen von Beton aus der Atmosphäre langfristig mineralisch gebunden wird [CEMb].

Die wichtigste Weiterverwendung von abgetrenntem CO₂ aus dem Klinkerbrennprozess in Verbindung mit anderen Industrien ist derzeit dessen Einsatz zur Öl- oder Gas-Gewinnung. Bei dem sogenannten Enhanced Oil Recovery (EOR)-Verfahren und ähnlich auch beim Enhanced Gas Recovery wird durch Injektion von CO₂, aus unterirdischen Vorkommen Öl bzw. Gas gefördert und die Ausbeute von Öl-/Gasfeldern gesteigert. Je nach aktuellem Öl- und Gaspreis ist das Verfahren wirtschaftlich rentabel. Ziel ist es dabei, dass ein erheblicher Anteil des eingesetzten CO₂ in der Gesteinsform im unterirdischen Vorkommen verbleibt und das meist als Nebenprodukt mit geförderte CO₂ somit nicht in die Atmosphäre emittiert wird. Zwar wird bei diesem Verfahren das CO₂ stofflich genutzt, doch es handelt sich nicht um die Einbindung in ein Produkt.

Eine weitere Möglichkeit zur Verwertung von abgeschiedenem CO₂ ist die katalytische Hydrierung von CO₂ zu Alkoholen, Kohlenwasserstoffen oder anderen chemischen Grundstoffen [BAZ]. Innerhalb der European Cement Research Academy (ECRA) wurden Möglichkeiten zur Verwertung von CO₂ für die Herstellung von Methanol und Methan (Power-to-gas) untersucht [ECRA]. Innerhalb des CEMCAP-Forschungsprojekts zur CO₂-Abscheidung in der Zementproduktion [CEMg] wurden Prozesswege zur Herstellung von Ethanol untersucht. Diese kurzkettigen Kohlenstoffmoleküle kommen sowohl als Grundstoffe für Kohlenstoff-basierte Chemieprozesse als auch für eine energetische Nutzung als Kraftstoff in Frage. Allerdings wird zusätzlich zur Nutzung als Kohlenstoffquelle auch die dauerhafte Speicherung als notwendige Ergänzung für die Vermeidung von CO₂-Emissionen gesehen [SAP; ABA; JOR].

Die Herstellung von Kraftstoffen aus abgetrenntem CO₂ könnte aufgrund der hohen Energiedichte der Produkte ein interessanter Ansatz zur Speicherung überschüssiger Energie aus erneuerbaren Quellen sein.

Obwohl die Kraftstoffe nach relativ kurzer Zeit erneut verbrannt werden und wieder CO₂ als Verbrennungsprodukt erzeugen, würden CO₂-Emissionen aus der Zementindustrie und dem Verkehr, wo die Kraftstoffe verwendet würden, insgesamt halbiert oder zumindest deutlich reduziert werden [ECRA]. Die Herstellung von synthetischen Kraftstoffen wird auch als Möglichkeit zur Speicherung erneuerbarer Energie und zur Schonung primärer Energierohstoffe benannt. Allerdings müssen die Effizienz des Energieeinsatzes und Verluste bei der Umwandlung im Rahmen einer umfassenden Bewertung berücksichtigt werden.

Ein anderer Weg zur Nutzung von CO₂ ist die Kultivierung von Mikroalgen mit CO₂-haltigem Abgas aus Zementwerken. Von einzelnen Zementunternehmen wurden bereits kleinere Projekte zur Kultivierung von Mikroalgen mit CO₂-haltigem Abgas von Zementofenanlagen durchgeführt. Die Energie für alle Prozessschritte zur Algenproduktion muss dabei von erneuerbaren Energiequellen bezogen werden, anderenfalls würde diese Technologie zu einer Nettozunahme von CO₂-Emissionen führen. In Regionen mit dichter Besiedlung oder intensiver Flächennutzung ist ein erheblicher Nachteil dieses Verfahrens der sehr große Flächenbedarf für die benötigten Reaktoren, in denen die CO₂-Umwandlung unter direkter Nutzung von Sonnenenergie durch Photosynthese erfolgt. Wirtschaftlich könnten solche Projekte werden, wenn auf Flächen mit geringem anderen Nutzungspotential hochwertige Produkte, z.B. Futtermittel hergestellt werden können. Zu diesem Ansatz gibt es Demonstrationsprojekte in mehreren Zementwerken außerhalb von Deutschland. [ECRA]

Derzeit lässt sich kaum vorhersagen, ob die verschiedenen CCU-Technologien im Bereich der Zementindustrie in den nächsten Jahrzehnten eine zunehmende Bedeutung erlangen werden. Vieles hängt von der Entwicklung geeigneter politischer und technischer Randbedingungen ab, wie z.B. Energiesteuern, CO₂-Kosten oder Kosten für herkömmlicher Primärrohstoffe wie Erdgas oder Öl für chemische Produkte und der Umsetzung von Maßnahmen zur effektiven Vermeidung von Produktions- und Emissionsverlagerungen (Carbon Leakage). Die meisten CCU-Technologien befinden sich derzeit in einem sehr frühen Entwicklungsstadium, indem die langfristigen Kosten schwer abzuschätzen sind. Eine Marktreife von ersten Reuse-Optionen wäre eventuell im Zeitraum 2025 bis 2030 zu erwarten. Mit Ausnahme des CO₂-Einsatzes bei der Öl- oder Gasgewinnung (EOR) sind die Technologien zur Weiterverwendung bisher noch nicht wirtschaftlich. [ECRA]

Möglichkeiten zur effizienten Nutzung von Ressourcen und Energie

- ▶ Die Technologien für eine Nutzung von CO₂ sind im Wesentlichen im Bereich der Forschung und Entwicklung
- ▶ Erdgasnetz/-speicher existieren
- ▶ Nutzen aus Power-to-Gas (PtG), Gas könnte im Zementwerk direkt wieder als Brennstoff genutzt werden
- ▶ Substitution von Erdgasimporten z.B. aus Russland möglich
- ▶ Bei großen Einheiten werden die Kosten günstiger
- ▶ Algen können wieder als Brennstoff eingesetzt werden, Herstellung von Tierfutter aus Algen
- ▶ Verflüssigtes CO₂ kann als Arbeitsmedium zur Stromspeicherung genutzt werden

Voraussetzungen, unterstützende Faktoren und mögliche Hemmnisse

- ▶ Unterstützender Faktor: Kostengünstiger Strom aus erneuerbaren Energiequellen
- ▶ Unterstützender Faktor: Quellen-Senken-Identifizierung (source-sink-matching)
- ▶ Mögliches Hemmnis: Fehlende CO₂-Infrastruktur
- ▶ Mögliches Hemmnis: Klärung der Rechtsgrundlagen und eindeutige Zuordnung der vermiedenen direkten CO₂-Emissionen
- ▶ Mögliches Hemmnis: Überschussstrom mit sehr niedrigen Kosten ist nur sehr begrenzt verfügbar und nicht für den Einsatz in kontinuierlichen Produktionsprozessen verfügbar.

- ▶ Voraussetzung: CO₂-Speicher würden dennoch benötigt (für Zeiten in denen Strom zu teuer ist)
- ▶ Mögliches Hemmnis: Die Komplexität der Prozesse steigt
- ▶ Mögliches Hemmnis: Erneuerbar herstellbare Strommenge in Deutschland begrenzt

Synergien und Zielkonflikte

- ▶ Sehr hoher Energiebedarf
- ▶ Verhältnis abscheidbare vs. nutzbare CO₂-Mengen
- ▶ Begrenzte Strommengen, die zu geringen Preisen verfügbar sind
- ▶ Synergie und Wettbewerb zur Umsetzung von CCU mit anderen Branchen, z.B. mit der Chemieindustrie
- ▶ Nutzung von erneuerbar erzeugtem Strom
- ▶ Algen: sehr großer Flächenbedarf erforderlich

Projektbeispiele

- ▶ Carbon2Cem
- ▶ Forschung zum Thema CO₂ Utilization durch ECRA Chair Uni Mons

Ergebnis aus dem Workshop: Einschätzung der Realisierbarkeit von Technologien bzw. Maßnahmen in Deutschland

- ▶ CO₂ Utilization: nach 2030

9 Strombasierte Klinkererzeugung

Vor dem Hintergrund der weltweiten Bemühungen um die Verminderung von Treibhausgasemissionen wird die Frage diskutiert, inwieweit der Brennstoff-basierte Klinkerbrennprozess auf elektrische Beheizung umgestellt werden könnte. Hintergrund dieser Überlegung ist die Annahme, dass Strom langfristig ausschließlich erneuerbar hergestellt und in ausreichender Menge zur Verfügung stehen wird, um auch Prozesse zu versorgen, die heute thermisch betrieben werden. Selbst damit würde aber nur ein Drittel der CO₂-Emissionen des Klinkerbrennprozesses vermieden, da die anderen zwei Drittel als unvermeidbares, prozessbedingtes CO₂ aus der Entsäuerung des Rohmaterials stammen. Bei Einsatz teilweise biogener Brennstoffe, wie heute in Deutschland üblich, ist das Minderungspotential sogar noch geringer. Neben der Herausforderung, die hohe erforderliche Wärmeübertragung im Ofen darzustellen, stellt der Materialtransport im Ofen bei Temperaturen bis 1500 °C eine bisher nicht gelöste technische Aufgabe dar.

In einer Literaturstudie [KAR] werden allgemein Methoden und Funktionsweisen von Elektroöfen aus verschiedenen Branchen beschrieben, gefolgt von Ideen und Studien für eine ggf. mögliche elektrische Klinkerherstellung. Die Verträglichkeit der verschiedenen Teilprozesse muss hinsichtlich der Wärmerückgewinnung und einer kontinuierlichen Produktion weiter untersucht werden. Experimentelle Daten liegen dafür zum derzeitigen Zeitpunkt nicht ausreichend vor.

Die wichtigste Voraussetzung für eine elektrische Klinkerproduktion ist die sichere und dauerhafte Verfügbarkeit von CO₂-neutralem Strom. Anstelle von thermischer Energie für den herkömmlichen Klinkerbrennprozess ist für die elektrische Klinkerherstellung ein elektrischer Energieeinsatz von 800 kWh/t Kli erforderlich. Bei einer Klinkerproduktion von 3.000 t/Kli pro Tag müsste für eine Produktionsanlage ein elektrischer Energiebedarf von rund 2,4 GWh pro Tag bereitgestellt werden.

Die elektrische Klinkerherstellung in einem Elektrolichtbogenofen, Mikrowellenofen, Plasmaschmelzofen und Elektrodenstrahlöfen weisen verschiedene Vor- und Nachteile auf. Beispielsweise kann mit der Elektrodenstrahltechnik keine gleichmäßige Erwärmung des Materials erfolgen. Die Herstellung von Klinker in einem Mikrowellenofen weist hohe Energieverluste und Investitionskosten auf. Manche beschriebene Verfahren können lediglich für einen Teil des Prozesses verwendet werden. In Bezug auf die Vorwärmung und die Kalzinierung mittels eines elektrischen Systems lieferten der Elektrolichtbogenofen und Plasmaschmelzofen im Vergleich zu den anderen Prozessen die besten Ergebnisse und scheinen daher am ehesten geeignet zu sein. Widerstandsheizverfahren könnten möglicherweise eine Lösung für den Kalzinierungsprozess darstellen.

Die Temperatur für die Klinkerreaktionen können im Prinzip bereitgestellt werden und eine geeignete Klinker- und Zementchemie wird beschrieben. In einem ersten Schritt für eine elektrische Klinkerherstellung könnte ein Plasmabrenner als zusätzlicher Brenner in einem bestehenden Drehofenrohrföfenprozess installiert werden. Alle elektrischen Verfahren müssen für die einzelnen Teilprozesse hinsichtlich einer Anwendung in der Praxis und im industriellen Maßstab getestet werden.

Die Nutzung eines Plasmabrenners für einen erweiterten Einsatz biogener alternativer Brennstoffe im Klinkerbrennprozess wurde in einem europäischen Forschungsvorhaben EDEFU (New Designs of Ecological Furnaces, www.edefu.eu) untersucht. Der sehr hohe Bedarf an elektrischer Energie für eine Vergasung alternativer Brennstoffe im Plasma hat jedoch gezeigt, dass aus heutiger Perspektive der Einsatz bei den absehbaren Preisen für elektrische Energie nicht ökonomisch umsetzbar erscheint [EDEFU].

Möglichkeiten zur effizienten Nutzung von Ressourcen und Energie

- ▶ Evtl. mehrstufiger Prozess
- ▶ Vermeidung des Brennstoff CO₂
- ▶ Es wird chemisch relativ reines prozessbedingtes CO₂ aus Kalkstein erzeugt, das ggf. im Bereich Landwirtschaft und Lebensmittel eingesetzt werden kann
- ▶ Ist eine elektrische Kalzinierung möglich?: Nur über Strahlungswärme

Voraussetzungen, unterstützende Faktoren und mögliche Hemmnisse

- ▶ Der strombasierte Klinkerbrennprozess befindet sich nach wie vor in einem frühen Forschungsstadium, u.a. führen FLSmidth, Cementsa und Vattenfall Untersuchungen durch
- ▶ Mögliches Hemmnis: Nur Brennstoff-CO₂ wird vermieden
- ▶ Verbleibende zweidrittel an prozessbedingtem CO₂ könnten als sehr reines CO₂ aus Kalkstein abgeschieden und genutzt werden
- ▶ Mögliches Hemmnis: Sehr große Strommengen sind für Plasma/Lichtbögen erforderlich
- ▶ Mögliches Hemmnis: Hohe Stromkosten
- ▶ Mögliches Hemmnis: Andere flüchtige Bestandteile, wie H₂O, S, C oder Verunreinigungen
- ▶ Mögliches Hemmnis: Lichtbogenofen: Geringe Mengen, reduzierende Atmosphäre, reduzierend wg. Inhaltsstoffen
- ▶ Mögliches Hemmnis: Effektiver Wärmeübertrag auf Rohmehl erforderlich
- ▶ Mögliches Hemmnis: Technologisch: Rohmehl/Klinker schlecht elektrisch leitend
- ▶ Mögliches Hemmnis: Geringer technologischer Reifegrad (TRL ca. 2 bis 4)
- ▶ Mögliches Hemmnis: Bisherige Versuchsergebnisse zeigten, dass nur ein Batchverfahren möglich ist und kein kontinuierliches Verfahren
- ▶ Mögliches Hemmnis: Erforderliche Ofengröße ist heute nicht verfügbar bzw. denkbar

Synergien und Zielkonflikte

- ▶ Nutzung von regenerativ erzeugtem Strom
- ▶ Wettbewerb um kostengünstigen erneuerbaren Strom

Projektbeispiele in Deutschland

- ▶ Versuche mit Plasmaofen (z.B. Tonerdezement: gut schmelzbar)

Weitere Projektbeispiele

- ▶ Laboruntersuchungen unter dem Projektnamen „CemZero“ und Ankündigung weiterer Forschungsarbeiten durch Cementsa und Vattenfall in Schweden [WIL]

Einschätzung der Realisierbarkeit von Technologien bzw. Maßnahmen in Deutschland gemäß der Ergebnisse aus dem Workshop

- ▶ Klinkerbrennen mit Strom: nach 2030

10 Modellierung der Material- und Energieeffizienz

Zur weiteren Beschreibung und Bewertung wesentlicher Technologiebereiche wurde im Projekt das VDZ-Modell2018 entwickelt und angewendet. Ausgehend von statistischen Daten der Zementindustrie aus dem Jahr 2016 und am Beispiel eines Referenzzementwerks, wurden fünf Szenarien für das Jahr 2030 beschrieben. Für diese wurden der Ressourceneinsatz, der Energieeinsatz und die damit verbundenen CO₂-Emissionen eingeschätzt. Diese Szenarien wurden durch Beispiele für weitere Technologieanwendungen ergänzt. Im Folgenden werden die Grundlagen dieser Modellierung im Arbeitspaket 3 zusammengefasst.

10.1 Modellgrundlage

Das VDZ-Modell2018 nutzt als zentrale Grundlage ein im VDZ entwickeltes und durch Experten in vielen Projektanwendungen validiertes Modell zum Energieeinsatz und zur Energieeffizienz bei der Zementherstellung. Das Modell wurde 2013 ausführlich in einer Veröffentlichung beschrieben [HOEc]. Dieses Modell wurde für die nachfolgend beschriebene Modellierung im Arbeitspaket 3 dieses Projektes wesentlich erweitert, um die Materialeinsätze und die Auswirkung auf CO₂-Emissionen einschätzen zu können.

10.2 Zielparameter

Wesentliches Ziel der Modellierung ist die Einschätzung der Auswirkungen von Technologieanwendungen bei der Zementklinkerherstellung und bei der Zementherstellung auf die

- ▶ thermische Energieeffizienz (MJ),
- ▶ elektrische Energieeffizienz (kWh) und
- ▶ CO₂-Emissionen (direkte und indirekte, kt CO₂)

Die Modellierung der Zementproduktion ermöglicht gleichzeitig die Darstellung der angenommenen Materialströme, Einsatzstoffe und Produkte:

- ▶ Rohmaterialeinsatz
- ▶ Brennstoffeinsatz
- ▶ Zementproduktion
- ▶ Zementhauptbestandteile

Es wurden fünf Szenarien zur Technologieanwendung dargestellt. Hierbei sind die Entwicklung der Einsatzmengen von Rohmaterial, unterschiedlichen Brennstoffen und Zementbestandteilen als wesentliche Parameter des VDZ-Modells2018 eingeflossen. Die Entwicklung des Energieeinsatzes und der CO₂-Emissionen wurde umfangreich ausgewertet und dargestellt (siehe Abschnitt 10.3, Kapitel 11 und Anhang 3: Modellergebnisse in Tabellen). Alle Ergebnisse wurden im VDZ durch Experten sorgfältig auf Plausibilität und Konsistenz geprüft und mit statistischen Daten des VDZ verglichen.

10.3 Referenzzementwerk und Basis 2016

Die Produktionskapazität des Referenzwerks von bis zu 3.000 t Klinker pro Tag und darauf bezogene Klinker- und Zementproduktionsmengen orientieren sich an den Ausgangswerten des VDZ-Modells zur Auswertung der Energieeffizienz [HOEc] (Tabelle 3). Die Produktionskapazität liegt dadurch ca. 25 % über der derzeitigen mittleren Kapazität deutscher Zementwerke. Sie entspricht Produktionskapazitäten neuerer Werke oder in jüngerer Zeit in ihrer Kapazität erweiterter Werke. Gleichzeitig entspricht sie der Angabe typischer Kapazitäten im europäischen BREF Dokument für die Zementherstellung [BREF].

Im Weiteren wurde als maßgebliche Referenz für die Ableitung spezifischer Zahlen ein statistisch durchschnittliches Zementwerk in Deutschland abgebildet. Die aktuelle statistische Grundlage bilden dazu die VDZ-Zahlen und Daten für das Jahr 2016 [VDZ17] und die VDZ-Umweltdaten 2016 [VDZ17a].

Tabelle 3: Referenzzementwerk im VDZ-Modell2018

Parameter	Einheit	Referenzzementwerk	Quelle
Klinkerkapazität	t/Tag	3.000	VDZ-Modell2018, Definition des Referenzwerks, vergleiche [HOEc; BREF]
Betriebstage	Tage	320	Annahme VDZ-Modell2018
Auslastung	-	85 %	Annahme VDZ-Modell2018
Klinkerproduktion	t/Jahr	816.000	berechnet
Zementproduktion	t/Jahr	1.133.333	berechnet, konstant im VDZ-Modell2018
Rohmehl-/Klinkerfaktor	t Rohmehl/ t Klinker	1,65	VDZ-Umweltdaten 2014 bis 2016
Klinker-/Zementfaktor	t Klinker/t Zement	72 %	VDZ-Umweltdaten 2016
Rohmaterial	t/Jahr	1.346.400	berechnet
Anteil alternativer Rohmaterialien	t/t	1,74 %	VDZ-Umweltdaten 2014 bis 2016
Spezifischer thermischer Energieeinsatz	GJ/t Zement	2.763	VDZ-Zahlen und Daten
Spezifischer elektrischer Energieeinsatz	kWh/t Zement	110	VDZ-Zahlen und Daten

Das Referenzzementwerk und die Annahmen für die Basis 2016 (Szenario 0) ist weiter entsprechend der VDZ-Zahlen und Daten [VDZ17] und VDZ-Umweltdaten [VDZ17a] durch folgende Aspekte gekennzeichnet:

- ▶ 1,13 Millionen Tonnen Zementproduktion pro Jahr im Referenzwerk. Dies entspricht etwa 3,4 % des Zementversands in Deutschland
- ▶ Ofenkapazität: 3.000 t/d, 25 % größer als der Durchschnitt in Deutschland
- ▶ Einsatz von 65 % alternativer Brennstoffe mit Bezug auf den gesamten thermischen Energieeinsatz: Die statistische Zusammensetzung der alternativen Brennstoffe wurde für die Modellierung in vier Brennstoffklassen abgebildet: Fluff, Klärschlamm, Altreifen, sonstige Alternative Brennstoff
- ▶ Ofenmehleinsatz und Einsatz alternativer Rohstoffe wie deutschlandweit gemittelt
- ▶ Mittlerer Klinker/Zement-Faktor 2016: 0,72
- ▶ Zementportfolio:
29 % CEM I; 18 % CEM II/S; 22 % CEM II/LL etc.; 7 % CEM II/M; 24 % CEM III

Diese Basis 2016 wird als Ausgangspunkt für die Entwicklung aller weiteren Szenarien herangezogen. Gleichzeitig bildet dieses Szenario 0 für alle Änderungen der Modellergebnisse zwischen 2016 und 2030 und die weiteren Szenarien die einheitliche Bezugsgröße (siehe Abschnitt 10.5, Kapitel 11 und Anhang 3: Modellergebnisse in Tabellen).

10.4 Indirekte CO₂-Emissionen gemäß Strommix

Indirekte CO₂-Emissionen machen aus dem Einsatz elektrischer Energie mit ca. 10 % nur einen geringen Teil der direkten und überwiegend prozessbedingten CO₂-Emissionen aus. Allerdings gibt es in jüngerer Zeit deutliche Veränderungen in der Zusammensetzung des Strommix in Deutschland (Abbildung 22). Eine deutliche Veränderung zeigt sich insbesondere in den spezifischen CO₂-Emissionen je Kilowattstunden in den Jahren 2014 bis 2016 [UBAa].

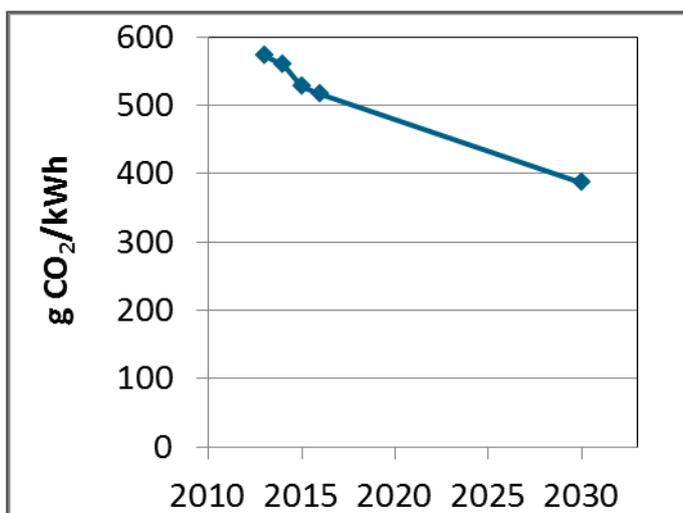
Für die weitere Entwicklung bis 2030 liegen sehr unterschiedlichen Perspektiven aus verschiedenen Studien vor. Im VDZ-Modell2018 wurde für das Jahr 2030 ein spezifischer Wert von 387 g CO₂/kWh angenommen. Dies entspricht einer weiteren Reduktion um 25 % bis 2030 bezogen auf 2016, bzw. 30 % bezogen auf 2014.

Als Vergleich dienten hierzu u.a.

- ▶ das Referenzszenario der Agora Energiewende zum „Klimaschutzbeitrag des Stromsektors bis 2040“ mit einer Annahme von ca. -30 % 2030 in Bezug auf 2014 und einem spezifischen Wert in 2030 von 391 g CO₂/kWh [AGO]
- ▶ das Zielszenario der Energiereferenzprognose 2014 erstellt von Prognos AG, EWI, GWS [PRO] mit einem spezifischen Wert in 2030 von 376 g CO₂/kWh und
- ▶ die Studie Klimapfade für Deutschland des BDI [BCG]

Im Vergleich zu vielfältigen Zielszenarien entspricht der Wert von 387 g CO₂/kWh insgesamt einem konservativen Ansatz. In der Modellierung hebt die konservative Annahme die Emissionsminderung in der Zementindustrie selbst hervor. Ein ähnliches Vorgehen wurde in den VDZ-Monitoring Berichten [VDZ13] hinsichtlich der indirekten CO₂-Emissionen bis 2012 angewendet gemäß RWI-Auswertesystem zu den Klimaschutzverpflichtungen in der Industrie.

Abbildung 22: CO₂-Intensität des deutschen Strommix und Trendannahme für 2030



Quelle: VDZ, eigene Darstellung, [UBAa]

10.5 Szenarien-Übersicht

Die Quantifizierung zur Einschätzung der Material- und Energieeffizienzpotentiale in der Zementindustrie erfolgt anhand ausgewählter Szenarien. Diese Auswahl und Darstellung der Szenarien orientiert sich an dem Ziel der Erfassung wesentlicher Einflüsse auf die Energieeffizienz und den hierfür typischen Szenarien der Modellgrundlage [HOEc]. Gleichzeitig werden in den Szenarien wesentliche Technologiebereiche für die Quantifizierung zusammengefasst. Hierzu wurde ein Vorgehen entsprechend der aktuellen CSI/ECRA-Technology Paper 2017 [ECRA] und den darin enthaltenen State-of-the-art-Paper gewählt.

Als Ausgangspunkt für das Referenzzementwerk dient ein Szenario, das die mittleren Werte in Deutschland anhand der aktuellen VDZ-Zahlen und Daten und VDZ-Umweltdaten für eine Anlage mit einer Produktionskapazität von 3.000 t/d widerspiegelt:

- ▶ **Szenario 0: Basis 2016**, Referenzzementwerk (s. Abschnitt 10.3)

Für die Einschätzung der Entwicklung entsprechend bestimmter Technologieanwendungen wurden folgende Szenarien gewählt:

- ▶ **Szenario 1: Basis 2030**, mit zunehmendem Einsatz alternativer Brennstoffe bis zu einer Substitutionsrate von 80 % und weiterer Verfügbarkeit von Hüttensand und Flugasche für die Zementproduktion in 2030
- ▶ **Szenario 2: Anlagenoptimierung**, sukzessive Anlagenoptimierung bis 2030 und hohe Verfügbarkeit von weiteren Zementhauptbestandteilen (vergleiche [HOEc]), gleichzeitig basierend auf Szenario 1
- ▶ **Szenario 3: Hüttensandeinsatz ca. -25 %**, niedrige Verfügbarkeit von Hüttensand in 2030 und entsprechende Umstellung des Zementportfolios, gleichzeitig basierend auf Szenario 2
- ▶ **Szenario 4: BAT-Mahlung**, Einsatz neuer Mahltechniken mit vollständiger Umrüstung aller Mühlen auf Vertikal-Wälzmühlen bzw. kombinierte Mahlanlagen, gleichzeitig basierend auf Szenario 2
- ▶ **Szenario 5: Oxyfuel 95 % CO₂-Abscheidung**, Einsatz der Oxyfuel CO₂-Capture Technologie an der Referenzanlage. Bis 2030 könnte davon ausgegangen werden, dass diese Technologie an einer einzelnen Anlage eingesetzt wird. Ein weiterer Einsatz wird entsprechend der Bewertung aus dem Workshop allerdings erst im Zeitraum 2030 bis 2050 erwartet. Das Szenario 5 entspricht dem CSI/ECRA-Technology Paper 2017 Nummer 43 „Oxyfuel Technology“ mit 95 %iger Abscheiderate. Gleichzeitig basiert es auf Szenario 2

Die Annahmen und Ergebnisse der Szenarien 1 bis 5 im VDZ-Modell2018 werden in den folgenden Kapiteln genauer erläutert.

10.6 Beispiele

Zusätzlich zu den Szenarien im VDZ-Modell2018 wurden einzelne Beispiele beschrieben, die den Einsatz weiterer Technologie in Bezug auf die Ressourceneffizienz und ihre wesentlichen Rahmenbedingungen skizzieren. Soweit möglich wurden für diese Beispiele Abschätzungen anhand von Annahmen durchgeführt, die im Kapitel 12 beschrieben sind:

- ▶ **Beispiel 6: Entwicklung neuer Bindemittel**, Zemente auf Basis der Karbonatisierung von Kalziumsilikaten, entsprechend CSI/ECRA-Technology Paper 2017 Nummer 39 „Cements based on carbonation of calciumsilicates“
- ▶ **Beispiel 7: Flugasche Einsatz im Beton** bei -50 % abnehmender Verfügbarkeit von Flugasche
- ▶ **Beispiel 8: Carbonbeton**, Perspektiven für den Einsatz
- ▶ **Beispiel 9: R-Zement**, Recycling von Brechsand zur weiteren Ressourceneffizienz in der Zementherstellung

11 Einschätzung des Material- und Energieeinsatzes und damit verbundener CO₂-Emissionen

11.1 Szenario 1: Basis 2030

Zunehmender Einsatz alternativer Brennstoffe bis zu einer Substitutionsrate von 80 % und weiterer Verfügbarkeit von Hüttensand und Flugasche für die Zementproduktion in 2030.

Das Szenario 1 dient als Basis zur Einschätzung der Situation der Zementherstellung im Jahr 2030 in Deutschland. Dabei dient die Zementproduktion von 1,13 Mt als unveränderte Bezugsgröße des Referenzwerks 2016 und 2030. Die Minderung der primären Rohstoff- und Brennstoffeinsätze erfolgt durch weiterführende effiziente Nutzung von Klinker im Zement. Gleichzeitig führt die weitere Steigerung des alternativen Brennstoffeinsatzes bis hin zu einem Anteil von 80 % an der genutzten thermischen Energie zu einem insgesamt stabilen oder lediglich geringfügig niedrigerem thermischen Energieeinsatz im Szenario 1 als Basis für 2030.

Im Basisszenario wird von einer Bypassrate von 5 % bezogen auf den Ofeneinlauf ausgegangen. Der Anteil der eingesetzten alternativen Rohstoffe am Rohmaterial wird konstant angenommen.

11.1.1 Thermischer Energieeinsatz und Brennstoffmix

Die Änderung im Brennstoffmix wird im Modell durch zunehmenden Einsatz von Fluff, Klärschlamm, Altrefen und sonstige alternative Brennstoffe abgebildet (Tabelle 4). Für den Brennstoffmix im Kalzinator wird von einem Heizwert von ca. 16.000 kJ/kg ausgegangen (erhöhte Feuchte des eingesetzten Fluffs). In der Hauptfeuerung ist insgesamt ein höherer Heizwert von ca. 21.500 kJ/kg erforderlich. Hierzu trägt auch der restliche Anteil an primären fossilen Brennstoffen bei. Dieser wird im Modell als Mischung aus 25 % Steinkohlen- und 65 % Braunkohlenstaub und 10 % sonstige fossile Brennstoffe mit einem Heizwert von 23.800 kJ/kg angenommen.

Trotz weiter steigendem Ersatz von primären fossilen Brennstoffen mit hohen Heizwerten durch alternative Brennstoffe, kann der thermische Energieeinsatz aufgrund effizienter Nutzung von Klinker im Zement insgesamt konstant gehalten bzw. geringfügig verringert werden (-13 TJ/Jahr im Referenzementwerk, Anlage 3).

Die Steigerung des Energieeintrags aus alternativen Brennstoffen von 65 % auf 80 % erfolgt durch gleichbleibende relative Energieeinträge in den Brennstoffgruppen. D.h. entgegen ursprünglicher Annahmen des VDZ zur deutlichen Steigerung des Klärschlammeinsatzes um ca. +50 % zwischen 2020 und 2030 nach aktuellen Gesetzesänderungen (siehe Abschnitte 3.1.3 bis 3.1.5) wird im Modell Szenario 1 und allen weiteren Szenarien bei Klärschlamm keine Anpassung des relativen Anteils abgebildet. Die relativen Energieeinträge durch Klärschlammeinsatz erhöhen sich hierdurch in gleicher Weise wie für die anderen alternativen Brennstoffe um +18 % bis +23 % (siehe Anhang 3 Modellergebnisse in Tabellen). Mittlere Heizwerte, CO₂-Emissionsfaktoren und biogene Kohlenstoffgehalte wurden nach Standardwerten aus den Leitfäden zum CO₂-Monitoring und aus VDZ-Umweltdaten abgeleitet (Tabelle 15).

Tabelle 4: Brennstoffmix 2030

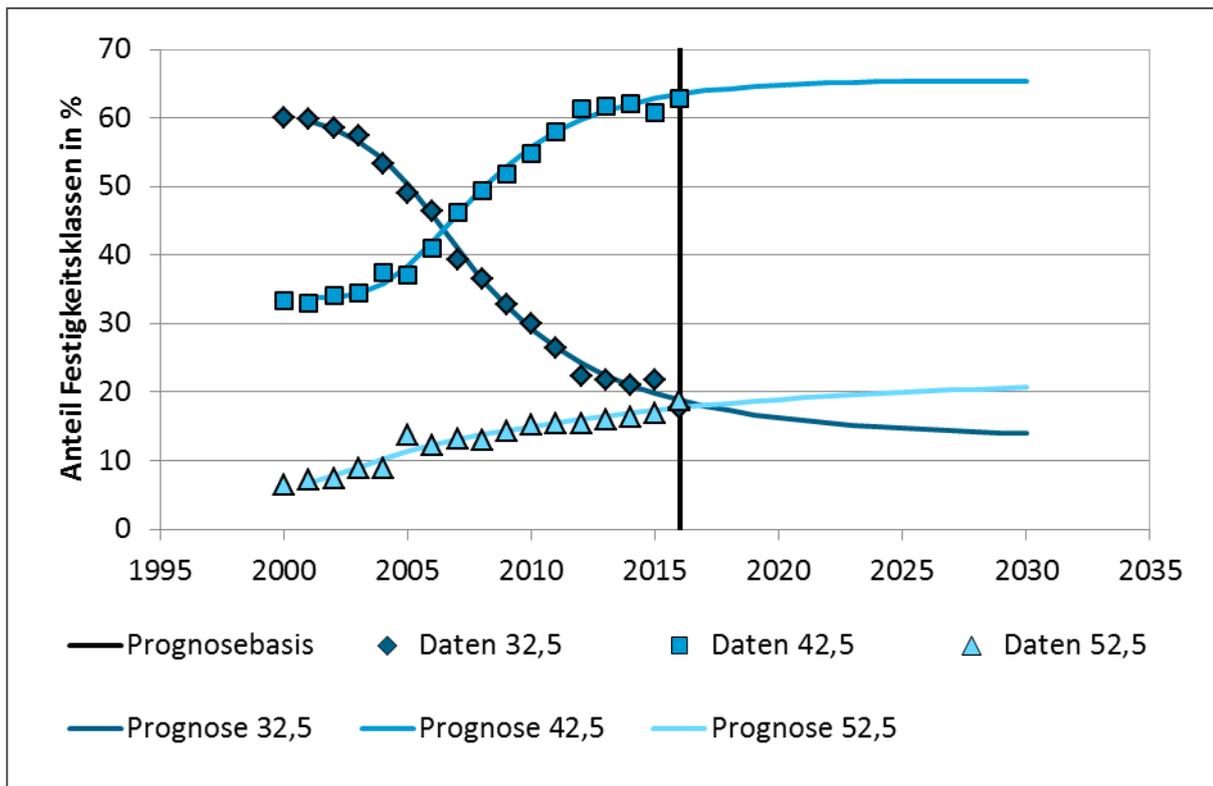
Brennstoff	relativer Anteile am Energieeintrag in 2030	Brennstoffeinsatz im Referenzzementwerk 2030 nach Szenario 1 in kt
Alternative Brennstoffe gesamt	80 %	136
Hierin Fluff	48 %	60
Reifen	10 %	8
Klärschlamm	2 %	19
Sonstige alternative Brennstoffe	40 %	48
Primäre fossile Brennstoffe gesamt	20 %	25
Hierin Braunkohle	60 %	15
Steinkohle	25 %	6
Sonstige fossile BS	15 %	4

11.1.2 Entwicklung des Zementportfolios

Ein weiter steigender Einsatz elektrischer Energie ergibt sich einerseits aus der Weiterentwicklung des Zementportfolios und aus dem steigenden Einsatz von Umwelttechnologien und begleitenden Technologien zum steigenden Einsatz alternativer Brennstoffe.

Seit den 2000er Jahren hat es in Deutschland eine ausgeprägte Entwicklung in der Produktnachfrage für Zemente mit höheren Festigkeitsklassen gegeben (Abbildung 23). Diese Entwicklung beruht auf verstärkter Produktion von Zementen in den N- gegenüber R-Klassen. Diese deutliche Entwicklung scheint weitgehend abgeschlossen. Im VDZ-Modell2018 wird von einem fortgesetzten moderaten Rückgang der Nachfrage nach Zementen in niedrigen Festigkeitsklassen und von einer weiteren leichten Steigerung der Nachfrage von Zementen in hohen Festigkeitsklassen ausgegangen (Prognose bis 2030 in Abbildung 23). Die Produktion der besonders leistungsfähigen Zementprodukte mit hoher Feinheit erfordert einen hohen elektrischen Energieeinsatz bei der Mahlung.

Abbildung 23: Entwicklung der Festigkeitsklassen im Zementversand in Deutschland

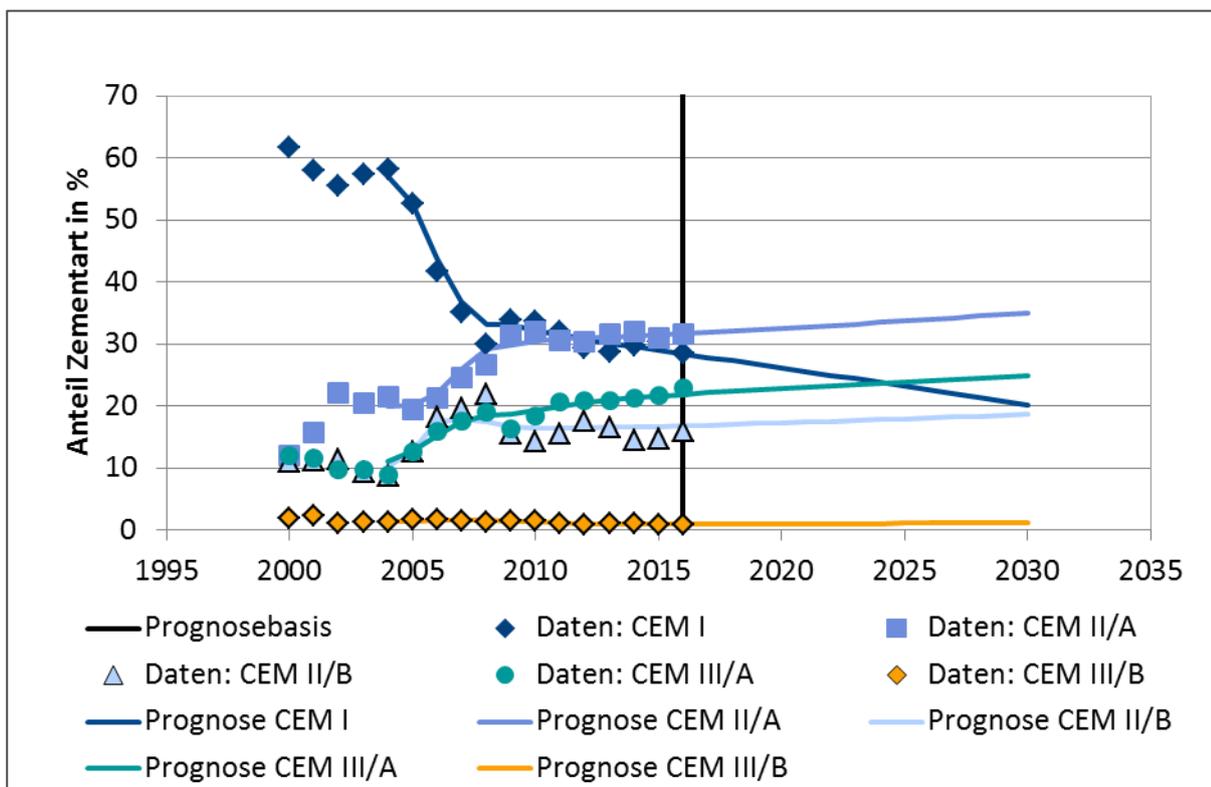


Quelle: VDZ, eigene Darstellung, [VDZ17], VDZ-Modell2018

Gleichzeitig ist der effiziente Einsatz von Klinker in Zementen z.B. durch die Nutzung weiterer Hauptbestandteile wie Hüttensand mit spezifisch höherem Aufwand an Mahlergie verbunden. Im Szenario 1 wird als Basis für 2030 von einer hohen Verfügbarkeit weiterer Hauptbestandteile für den Zement ausgegangen, sodass insbesondere der weiter zunehmende Einsatz von Hüttensand um +10 % eine weitere Verminderung des Anteils von Klinker im Zement auf 69,2 % ermöglicht (Anhang 3). Dies setzt eine stabile Hüttensandproduktion und einen Einsatz von ca. 6,8 Mt Hüttensand in Zementen in Deutschland im Jahr 2030 voraus. Für das Referenzementwerk entspricht dies einem zusätzlichen Hüttensandeinsatz von +22 kt. Der größte Anteil des zusätzlich eingesetzten Hüttensands ermöglicht eine Steigerung der Produktion von CEM III/A Zementen um ca. +9 %. Gleichzeitig wird die Produktion von Mischzementen durch Einsatz von Kalkstein als weiterem Hauptbestandteil im Zement um ca. +50 % deutlich gesteigert (+ 8 kt Kalkstein im Referenzementwerk, Anhang 3) und die Produktion von CEM I Zementen um ca. -30 % deutlich verringert (Abbildung 24). Im Szenario 1 wurde der Verlauf der CEM I-Produktion entsprechend der Entwicklung von 2011 bis 2016 und ähnliche Erfahrungen in anderen europäischen Ländern angenommen.

Das Szenario 1 nimmt gleichzeitig eine stabile Produktion von Steinkohlenflugaschen an. Hierbei liegt die Hauptanwendung für Flugasche jedoch weiterhin im Beton. Es wird folglich keine weitere Steigerung von CEM II - V-Zementen, sondern ein insgesamt gleichbleibender Flugascheinsatz in Zementen angenommen (+/- 0 %). Eine maßvolle Steigerung der Nutzung von Mischzementen CEM II/B-M (V-LL) ermöglicht eine zusätzliche leichte Absenkung der CEM I Produktion.

Abbildung 24: Entwicklung der Zementarten in Deutschland in den Szenarien 1, 2, 4, 5, VDZ-Modell2018



Quelle: VDZ, eigene Darstellung, [VDZ17], VDZ-Modell2018

Das VDZ-Modell2018 bildet die Einschätzung der spezifischen Mahlenergie für unterschiedliche Festigkeitsklassen und Zementarten entsprechend der in den Szenarien angenommenen weiteren Entwicklung des Zementportfolios ab. Hierbei entsprechen die grundlegenden Rahmenbedingungen der VDZ-Studie zur Energieeffizienz in der Zementherstellung [HOEc]:

- ▶ Die Gesamtzementproduktion bis zum Jahr 2030 wird im VDZ-Modell2018 für das Referenzzementwerk konstant angenommen. Als Bezugsbasis für Deutschland wird von ca. 33 Mt Zementproduktion inkl. Zement für den Export ausgegangen
- ▶ Neben Portlandzementklinker kommen in Deutschland im Wesentlichen die Zementhauptbestandteile Hüttensand, Steinkohlenflugasche und Kalkstein zum Einsatz
- ▶ Hüttensand wird weiterhin als Zementhauptbestandteil verwendet
- ▶ Die Entwicklung des Zementportfolios im VDZ-Modell2018 Szenarien 1, 2, 4, 5 geht von einer leichten Steigerung des Einsatzes von Hüttensand bei der Zementherstellung in Deutschland um ca. +10 % von 6,1 Mt auf 6,8 Mt aus
- ▶ Flugasche wird weiterhin im Wesentlichen als Betonzusatzstoff und in geringem Maß als Zementhauptbestandteil eingesetzt
- ▶ Die Verfügbarkeit von Kalkstein für die deutlich zunehmende Produktion von Mischzementen wird im Rahmen der angenommenen Zementproduktionsmenge uneingeschränkt vorausgesetzt
- ▶ Es wird davon ausgegangen, dass sich die Betontechnologie, die in Deutschland überwiegend angewandt wird, innerhalb der Jahre bis 2030 nicht wesentlich verändern wird
- ▶ Bezüglich der Zementgehalte je m³ Beton wird bis 2030 keine signifikante Veränderung angenommen

Die historische Verfügbarkeit sowie die Annahmen der zukünftigen Verfügbarkeit von Hüttensand und Steinkohlenflugasche stützen sich auf Angaben des Instituts für Baustoff-Forschung e.V. (FEhS) bzw. des VGB Powertech e.V. Bei den Annahmen wird den Aussagen des FEhS folgend von einer konstanten Verfügbarkeit von etwas über 8 Mt Hochofenschlacke bis zum Jahr 2030 ausgegangen. Der Anteil an granulierter Hochofenschlacke bzw. Hüttensand liegt derzeit gemäß FEhS bei etwas unter 80 % und eine leichte Steigerung auf ca. 85 % scheint möglich. Der starke Rückgang der Verfügbarkeit von Hochofenschlacke bzw. Hüttensand im Jahr 2009 [HOEc] ist auf die Wirtschaftskrise zurückzuführen. In den darauffolgenden Jahren stieg die verfügbare Menge wieder auf Vorkrisenniveau mit ca. 8 Mt.

11.1.3 Elektrischer Energieeinsatz für Umwelttechnologien

Der steigende elektrische Energieeinsatz (+25 Tj/Jahr = +7 GWh/Jahr im Referenzzementwerk, Anlage 3) wird mit einem Anteil von 53 % überwiegend durch zusätzliche Umweltschutzmaßnahmen zur NO_x- und Staub-Minderung verursacht (Abschnitt 2.3.3). Weitere Beiträge stammen aus zusätzlichen Anlagen u.a. zur Brennstoffaufbereitung und dem weiter zunehmenden Einsatz von Mahlenergie, entsprechend der oben dargestellten Entwicklung des Zementportfolios.

- ▶ Einsatz der SCR-Technologie zur NO_x-Minderung, 2011 bis 2030: +5 kWh/t Klinker
- ▶ Zunehmender Stromeinsatz in Filtern, 2011 bis 2020: +1 kWh/t Klinker
- ▶ Steigender Einsatz alternativer Brennstoffe mit +10 % Einsatz begleitender Technologien, zwischen 2016 bis 2030: +1,4 kWh/t Klinker

11.1.4 Elektrische Energieeffizienz in Querschnittstechnologien

Der Anteil des Stromeinsatzes der durch Querschnittstechnologien wie z.B. durch effiziente Steuerung und weitere Modernisierung elektrischer Antriebe außerhalb der Mahltechnik (siehe Abschnitte 2.2 bis 2.3.2) beeinflusst werden kann, ist in Zementwerken mit ca. 8 % des Stromeinsatzes stark begrenzt. Somit haben zusätzliche relative Verbesserungen in Querschnittstechnologien eine geringe Auswirkung auf den absoluten Einsatz elektrischer Energie.

- ▶ Stromeinsatz in Querschnittstechnologien -7 % durch sukzessive Verbesserung, gezielte Ersatzinvestition und fortgesetztes Energiemanagement: 2016 bis 2030: -0,6 kWh/t Zement

11.1.5 Auswirkungen auf die direkten und indirekten CO₂-Emissionen

Die weitere Minderung der fossilen CO₂-Emissionen um -5 % wird im Basisszenario je etwa zur Hälfte durch den zunehmenden Einsatz von alternativen Brennstoffen (-14 kt CO₂) und die Nutzung weiterer Zementbestandteile erreicht (-17 kt CO₂, siehe Minderung der prozessbedingten CO₂-Menge).

Für die alternativen Brennstoffe wurden dabei die relativen Anteile und biogenen Kohlenstoffanteile gleichbleibend angenommen.

Die Minderung der indirekten CO₂-Emissionen resultiert in Szenario 1 vorwiegend aus Änderungen im deutschen Strommix (Abschnitt 10.4).

Insgesamt werden die direkten und indirekten CO₂-Emissionen im Szenario 1 als Basis für 2030 um -6 % bzw. -44 kt CO₂/Jahr gemindert.

11.2 Szenario 2: Anlagenoptimierung

Sukzessive zusätzliche Anlagenoptimierung bis 2030 und hohe Verfügbarkeit von weiteren Zementhauptbestandteilen, basierend auf Szenario 1.

Eine zusätzliche und sehr tiefgreifende Umsetzung von Technologien zur Anlagenoptimierung wird in Szenario 2 im Sinne eines Maximalansatzes für ein Referenzzementwerk abgebildet. In der Praxis müssen standort- und werksbezogene Kriterien und Potentiale individuell untersucht und bewertet werden.

Maßgeblich ist hierbei insbesondere der in Deutschland und Europa erreichte hohe Grad an Nutzung des thermischen Energieeinsatzes in Zementwerken. Eine zusätzliche Einschränkung für die Umsetzung von Technologien gemäß Szenario 2 muss angesichts der begrenzten zusätzlichen Energieeinsparung durch die begrenzte Wirtschaftlichkeit von Maßnahmen erwartet werden.

11.2.1 Thermische Energieeffizienz

Das Szenario 2 beruht auf der Optimierung der thermischen Energieeffizienz durch Erneuerung der Anlagentechnologie. Dies entspricht dem Technologiemo­dell der VDZ-Studie „Energieeffizienz bei der Zementherstellung“ [HOEc]. Die stetige verfahrenstechnische Optimierung führt zu einer Minderung des thermischen Energiebedarfs um 3 bis 4 % zwischen 2016 und 2030.

Geeignete Maßnahmen müssen hierzu standort- und werkspezifisch geprüft und, sofern geeignet, ziel­führend umgesetzt werden. Wichtig ist hierbei, dass die Maßnahmen zur Energieeinsparung nicht voll­ständig additiv anzusetzen sind (CSI/ECRA Technology Papers 2017 [ECRA]; State-of-the-art-paper Nr. 1: Thermal Efficiency). Hintergrund ist, dass zusätzliche Energie im Produktionssystem jeweils nur einmal und nicht mehrfach eingespart werden kann. Für die Modellierung wurde eine zusätzliche Um­setzung von 20 % der maximalen einzelnen Potentiale sowohl für die nötige Auswahl geeigneter Maß­nahmen als auch ihre wechselseitige Einschränkung eingeschätzt. Folgende Maßnahmen zur ther­mischen Energieeffizienz wurden hiernach anteilig berücksichtigt (Abschnitt 1.1; [ECRA] Technology Pa­per Nr. 1, 4, 5, 6, 7, 8):

- ▶ Optimierte Brennbarkeit
- ▶ Wärmetauscher Umbau mit zusätzlichem Zyklon
- ▶ Kapazitätserhöhung
- ▶ Optimierung Brenner
- ▶ Sauerstoff-Anreicherung
- ▶ Hoch-Effiziente Klinkerkühler

11.2.2 Technologie zum optimierten Einsatz von alternativen Brennstoffen

Der Einsatz von alternativen Brennstoffen kann je nach Stoffeigenschaften durch weitere Technolo­gien für die Aufbereitung sinnvoll begleitet werden. Dies wird in den Abschnitten 3.2.2 und 3.2.3 und in den CSI/ECRA-Technology Papers 2017 [ECRA] in den Technologiepapieren Nr. 15 und 16 beschrie­ben.

Eine begrenzte oder partielle Anwendung der Technologien zum optimierten Einsatz von alternativen Brennstoffen wird als notwendige Voraussetzung gesehen, um einen hohen Anteil von 80 % alternati­ver Brennstoff erreichen zu können. Für den steigenden Einsatz alternativer Brennstoffe im Referenz­zementwerk 2016 bis 2030 von 65 % auf 80 % wurde der Einsatz begleitender Technologien anhand der Technologiepapiere 15 und 16 wie folgt abgeschätzt:

- ▶ Szenario 1: Stetiger Ansatz mit Begrenzung auf plus 10 % Umsetzung
- ▶ Szenario 2, 3, 4, 5: Maximale partielle Umsetzung von plus 50 %

Vorbehandlung von alternativen Brennstoffen (Zerkleinerung, Trocknung)

- ▶ Trocknung unter Nutzung von restlichen Wärmequellen im Zementwerk, z.B. Fluff oder Klär­schlamm­trockner Band-, Trommel, oder Flash-Trockner
- ▶ Grobe Fraktionen können durch Mahlen oder Schneiden auf eine transport- und besser zündfähige Größe aufbereitet werden
- ▶ Einige Mühlen für alternative Brennstoffe kombinieren Trocknung und mechanische Zerklei­nerung

- ▶ Steigerung der Feinheit und des Heizwerts können alternative Brennstoffe besser für die Hauptfeuerung des Drehofens geeignet machen. Dies gewinnt für Anteile an alternativen Brennstoffen von 80 % besondere Bedeutung
- ▶ Die Technologieentwicklung in diesem Bereich schreitet fort. Den Energieeinsparungen z.B. durch geringeres Abgasvolumen bei reduzierter Feuchte, stehen meist elektrische Energieeinsätze für die Aufbereitungstechniken gegenüber (Abschnitt 11.1.3).

Sollten sich zukünftig die Qualitäten restlicher Abfallmaterialien deutlich ändern, würde dies ggf. eine zusätzliche Aufbereitung (außerhalb der Zementindustrie) erfordern, um geeignete Qualitäten für den Einsatz im Zementwerk zu erreichen. Der elektrische Energieeinsatz für eine zusätzliche Aufbereitung aufgrund der Änderung der Qualitäten der Ausgangsmaterialien wurde in Szenario 2 für das Referenz-Zementwerk nicht hinzugerechnet.

Vorverbrennung oder Vergasung von alternativen Brennstoffen

- ▶ Vorbehandelte alternative Brennstoffe erhöhen die Flexibilität zu deren Einsatz. Dies gewinnt für Anteile an alternativen Brennstoffen von 80 % besondere Bedeutung
- ▶ Ein breiteres Spektrum an alternativen Brennstoffen kann eingesetzt werden hinsichtlich der Qualität, Homogenität, Heizwert, Feuchtegehalt, Schadstoffgehalten, Partikelgrößen
- ▶ Verfahren: Vorbrennkammern mit Sauerstoffüberschuss oder Vergasung oder Pyrolyse in sauerstoffarmer Atmosphäre
- ▶ Zum Einsatz kommen u.a. Feststoff-Reaktoren, Vorbrennkammern, rotierende Vorbrennöfen, Stufen-Verbrennung
- ▶ Mögliche Vorteile: Erhöhte Verbrennungsdauer, Vermeidung von zusätzlichem Energiebedarf, NO_x-Reduktion, Stabilisierung des Klinkerbrennprozesses

11.2.3 Maximalansatz zur Optimierung von Querschnittstechnologien

Möglichkeiten für Energieeinsparungen an den Antrieben als Hauptstromverbraucher in einem Zementwerk sind begrenzt, wenn die Ofen- oder Mahlanlagen mit ihrer maximalen Kapazität betrieben werden. So werden die elektrischen Antriebe, überwiegend auf eine vollständige Leistungsnutzung ausgelegt und dementsprechend mit konstanter Motorenleistung effizient betrieben. Die Optimierung der Mahltechnologie wird deshalb gesondert in Szenario 4 behandelt. Im Szenario 2 ist somit kein Austausch von Mühlenantrieben berücksichtigt.

Der Maximalansatz zur Optimierung von Querschnittstechnologien in Szenario 2 erfordert eine äußerst tiefgreifende und vollständige Umsetzung der hier berücksichtigten Technologien. Ausgangspunkt ist eine bereits sehr hohe Implementierung im Bereich relevanter Antriebe und Stromverbraucher (Abschnitt 2.3.1). Folglich ist in vielen Fällen von eingeschränkten zusätzlichen Potentialen und einer nicht ausreichenden Wirtschaftlichkeit der zusätzlichen Maßnahmen auszugehen (Abschnitte 2.2.2 bis 2.2.5 und 2.3.2, Technologiepapiere 18 bis 22 [ECRA]):

- ▶ Anlagenspezifisch Austausch von zuvor nicht optimierten Antrieben hinsichtlich FU und Drehzahlregelung
- ▶ Umstellung der Informations- und Kommunikationstechnik (IKT) und optimierte Anlagenautomatisierung
- ▶ Druckluftherzeugung und -nutzung
- ▶ Beleuchtung mit minimalem Energieeinsatz
- ▶ Verstärkte flexible Nutzung erneuerbarer elektrischer Energien

Verbesserungspotentiale in den Querschnittstechnologien wurden wie folgt abgeschätzt:

- ▶ Szenario 1: Stetiger Ansatz in der Technologieanwendung, Stromeinsatz in Querschnittstechnologien -7 %
- ▶ Szenario 2, 3, 4, 5: Maximalansatz in der Technologieanwendung, minimaler Stromeinsatz in Querschnittstechnologien -14 %

11.2.4 Auswirkungen auf den Energieeinsatz

Die weitere Optimierung der thermischen Energieeffizienz im Szenario 2 bis 2030 (-128 TJ; -4 %) geht mit einem geringfügig steigendem elektrischen Energieeinsatz einher (+7 TJ) von Szenario 1 auf Szenario 2, siehe Anhang 3). Insgesamt ergeben sich aus den Maßnahmen nach Szenario 1 und 2 +32 TJ = +9 GWh elektrischer Energieeinsatz entsprechend 25 % der Einsparung an thermischer Energie oder +1 % bezogen auf den gesamten Energieeinsatz.

Wie in Szenario 1 wird auch in Szenario 2 die Zunahme des elektrischen Energieeinsatzes von Anforderungen an die Leistungsfähigkeit der Produkte, vom Stromeinsatz für neue Anlagentechnologie und dabei insbesondere vom Einsatz der SCR-Technologie zur NO_x-Minderung bestimmt.

Der geringe Anteil der Querschnittstechnologien am elektrischen Energieeinsatz (8 %) hat selbst bei einem Maximalansatz zur Optimierung nach Szenario 2 (-14 % bis 2030) nur sehr geringe Auswirkung auf den gesamten elektrischen Energieeinsatz (-1,1 %).

11.2.5 Auswirkungen auf die direkten und indirekten CO₂-Emissionen

Im Szenario 2 für das Referenzzementwerk verstärkt sich die Minderung der brennstoffbedingten fossilen CO₂-Emissionen deutlich um -3,6 % auf insgesamt -22 kt CO₂ im Vergleich zu Szenario 1 bei -14 kt CO₂. Angesichts des hohen Anteils von 2/3 an prozessbedingten CO₂-Emissionen bei der Herstellung von Zementklinker, vermindern sich die direkten fossilen CO₂-Emissionen jedoch nur geringfügig um -1,2 % auf -6 %. Hierbei ist die Produktionsmenge von Zementklinker im Referenzzementwerk zwischen Szenario 1 und 2 unverändert geblieben.

Der zusätzliche Einsatz von elektrischer Energie für die Anlagenoptimierung und den optimalen Einsatz von alternativen Brennstoffen, kann mit dem angenommenen hohen Aufwand für eine maximale Optimierung von Querschnittstechnologien im Szenario 2 nicht ausgeglichen werden. Insgesamt ergeben sich allerdings nur äußerst geringfügige Auswirkungen auf die indirekten CO₂-Emissionen.

Insgesamt werden durch Anlagenoptimierung die direkten und indirekten CO₂-Emissionen im Szenario 2 für 2030 um -7 % bzw. -51 kt CO₂ gemindert.

11.3 Szenario 3: Hüttensandeinsatz ca. -25 %

Niedrige Verfügbarkeit von Hüttensand in 2030 und entsprechende Umstellung des Zementportfolios, basierend auf Szenario 2.

Das Szenario 3 hebt die herausragende Bedeutung des effizienten Einsatzes von Klinker im Zement hervor. Es wird deutlich, dass Gleiches für den Einsatz von weiteren Hauptbestandteilen mit begrenzter Verfügbarkeit wie Hüttensand und Flugasche gilt (Kapitel 5).

Das Szenario 3 beinhaltet im Vergleich zu Szenario 2 ca. -25 % weniger Einsatz von Hüttensand und lehnt sich damit an die Untersuchung in der VDZ-Studie „Energieeffizienz in der Zementherstellung“ an [HOEc, Seiten 52]. Dort wird dieses Szenario jedoch als Szenario 2 bezeichnet:

„In diesem Szenario wird angenommen, dass mittelfristig 25 % weniger Hüttensand zur Verfügung stehen wird. Der Hüttensandmangel geht aus technologischen Gründen im Wesentlichen nicht zu Lasten der CEM III- sondern der CEM II-S-Produktion (vgl. hierzu die historische Entwicklung im Jahr 2009 [HOEc, dort Seiten 55, Abbildung 3].“ Hintergrund für die Formulierung des Szenarios war eine im Jahr 2009 kurzfristig um ca. -30 % stark gesunkene Verfügbarkeit von Hüttensand infolge einer Wirtschaftskrise und deutlich geringerer Produktion von Hochofenstahl in Deutschland.

Bei einem Hüttensandeinsatz von -25 % im Szenario 3 sinkt im Referenzzementwerk 2030 demnach die eingesetzte Menge um -52 kt.

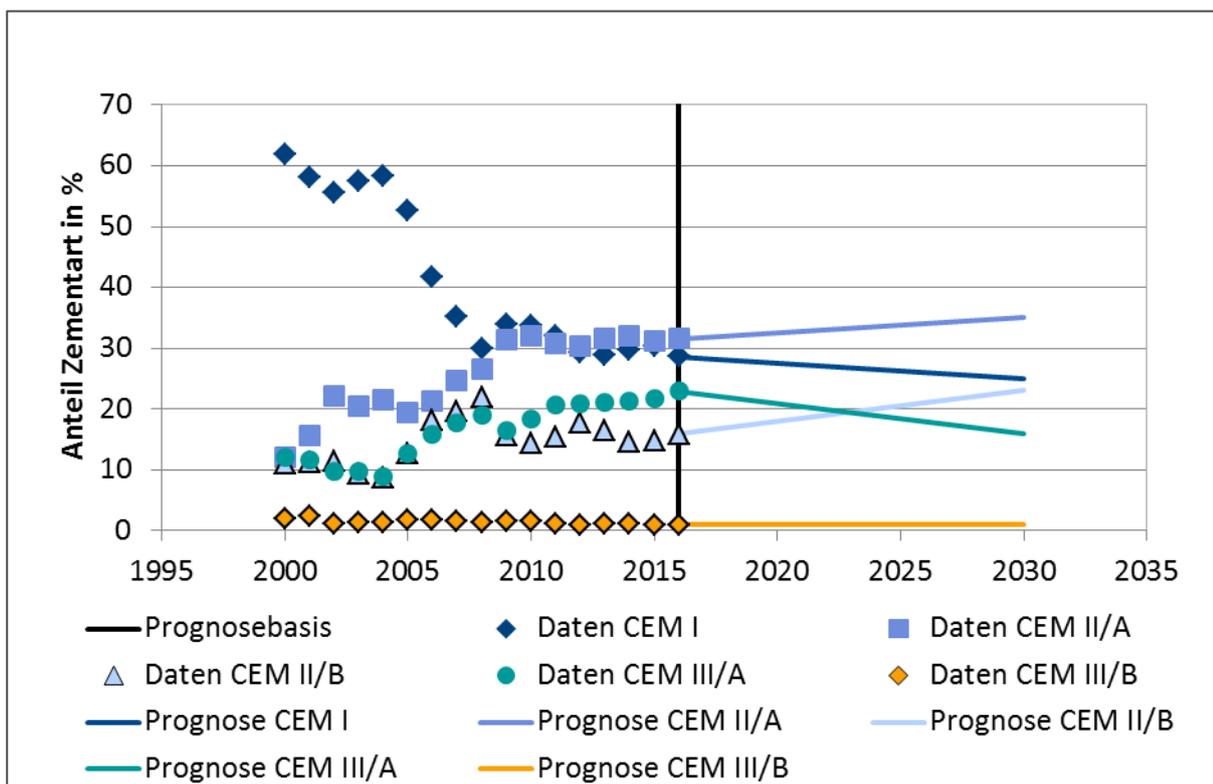
Im Szenario 3 entfällt gleichzeitig die geringe Menge an Flugasche die bisher im Zement eingesetzt wurde (-3 Mt im Referenzzementwerk).

Hintergrund ist die Annahme einer ebenfalls abnehmenden Verfügbarkeit bei veränderter Stromerzeugung und der überwiegende Einsatz von Flugasche im Beton.

Der deutlich verringerte Einsatz von Hüttensand erfordert insbesondere einen deutlichen Rückgang der Produktion von CEM II/S- und CEM III/A-Zementen um ca. -50 % bis -30 % (Abbildung 25). Dieses könnte wie folgt teilweise ausgeglichen werden:

- ▶ Die Produktion von Mischzementen wird auf ein 2- bis 3-faches extrem gesteigert, ca. +260 %
- ▶ Dadurch kann die Menge an CEM II-Zementen insgesamt weiterhin um ca. +20 % gesteigert und die Produktion von CEM I-Zementen um ca. -10 % verringert werden

Abbildung 25: Entwicklung der Zementarten in Deutschland bei abnehmender Verfügbarkeit und vermindertem Einsatz von Hüttensand um -25 % im Szenario 3, VDZ-Modell2018

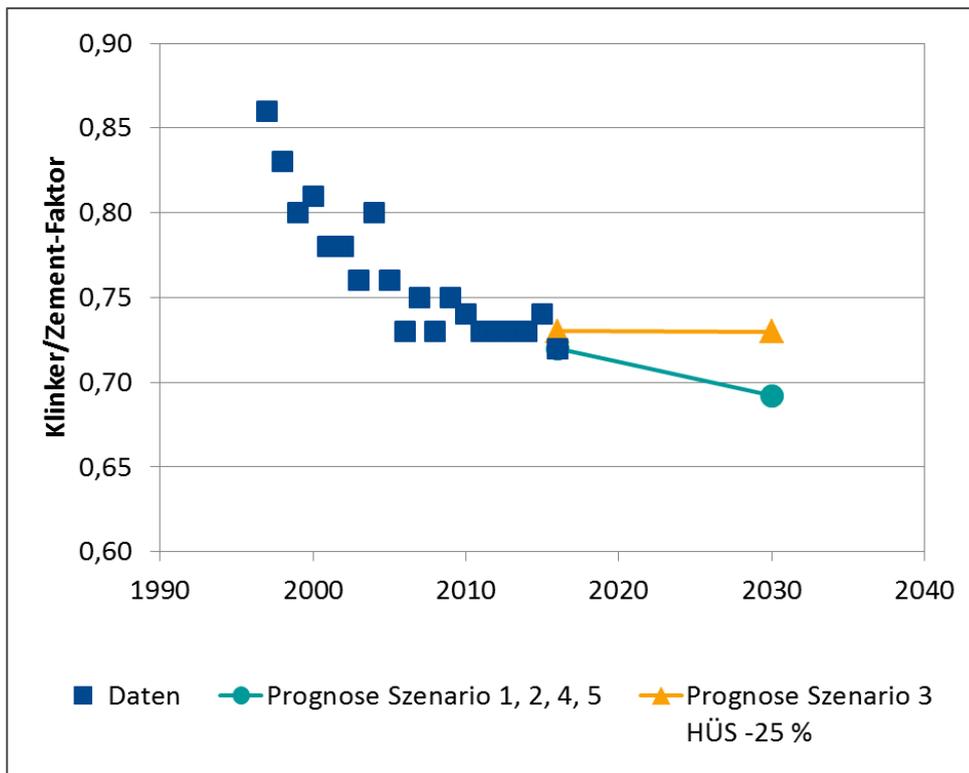


Quelle: VDZ, eigene Darstellung, [VDZ17], VDZ-Modell2018

11.3.1 Entwicklung des Klinker/Zement-Faktors

Diese extreme Umstellung innerhalb des CEM II-Zementportfolios ist entscheidend, um den Anstieg des Klinker/Zement-Faktors zu begrenzen und ihn 2030 auf dem in den 6 Jahre (2011 bis 2016) erreichten Wert von 73 % zu halten (Abbildung 26).

Abbildung 26: Entwicklung des Klinker/Zement-Faktors im VDZ-Modell2018



Quelle: VDZ, eigene Darstellung, [VDZ17], VDZ-Modell2018

Die Entwicklung des Klinker/Zement-Faktors wurde anhand des Zementportfolios und der Anteile der Zementarten berechnet:

- ▶ Im Szenario 1 wurde als Basis für 2030 eine maßvolle Steigerung von CEM II/B-M angenommen. Die gleiche Annahme gilt für die Szenarien 2, 4 und 5
- ▶ Der Klinker/Zement-Faktor bleibt bei abnehmender Einsatzmenge an Hüttensand in Szenario 3 in etwa konstant bei sehr deutlicherer Steigerung in der Nutzung von Mischzementen (CEM II/B-M)

11.3.2 Auswirkungen auf den Einsatz von weiteren Zementhauptbestandteilen

Szenario 3 geht einher mit deutlich steigendem Einsatz von Kalkstein im Referenzzementwerk in 2030 (+82 %, +42 kt) insbesondere zur Erzeugung von Mischzementen (CEM II/ B-M). Dieser kompensiert zu mehr als 2/3 die im Szenario 3 nicht mehr verfügbaren Hüttensandmengen.

Die Modellierung der Zementzusammensetzung unterliegt statistischer Unschärfe bei der Verwendung von Bezugsgrößen. Es ergeben sich hierbei nicht immer schlüssige Summen der Einsatzmengen aus den vorliegenden statistischen Daten. Dennoch liefern die angegebenen konsolidierten Mengen an Hüttensand, Flugasche und Kalkstein im Szenario 3 plausible Aussagen für eine mögliche Entwicklung des Einsatzes weiterer Zementhauptbestandteile (Anlage 3).

11.3.3 Auswirkungen auf die direkten und indirekten CO₂-Emissionen

Für das Referenzzementwerk kehrt sich die deutliche Minderung der prozessbedingten fossilen CO₂-Emissionen im Szenario 1 (-4 %) durch den erforderlichen Einsatz von Zementklinker im Szenario 3 in eine leichte Steigerung (+1 %) um. Diese zeigt sich gleichfalls in einer leichten Steigerung des Energieeinsatzes.

Im Ergebnis von Szenario 3 und in der Entwicklung der historischen und prognostizierten Entwicklung des Klinker/Zement-Faktors (Abbildung 26), zeigt sich die herausragende Bedeutung der effizienten Nutzung von Klinker im Zement in Kombination mit weiteren Hauptbestandteilen.

Insgesamt werden die direkten und indirekten CO₂-Emissionen im Szenario 3 für 2030 um lediglich -2 % bzw. -16 kt CO₂/Jahr gemindert.

11.3.4 Ausblick zur Verfügbarkeit von Hüttensand

Derzeit sind in Deutschland nach Angaben der FEHS ca. 6,8 bis 7,0 Mt Hüttensand verfügbar. Allerdings müsste bei Entfallen der Produktion eines großen Hochofens in Deutschland mit ca. 0,5 Mt geringerer Verfügbarkeit an Hüttensand gerechnet werden.

In der vom BDI veröffentlichten Studie „Klimapfade für Deutschland“ wird eine insgesamt unveränderte Verfügbarkeit von Hüttensand aus der Herstellung von Hochofenstahl angenommen [BCG; S. 44; S. 151]. Es wird angenommen „dass sich der Anteil von Elektrostahl an der deutschen Stahlproduktion im selben Zeitraum 2015 bis-2050 von 30 Prozent auf 35 Prozent erhöht.“ „Ein stärkerer Anstieg erscheint aus Sicht der Stahlbranche angesichts begrenzter Schrottverfügbarkeit und steigender marktseitiger Qualitätsansprüche sowohl in der Referenz als auch in den Zielszenarien der vorliegenden Studie eher unrealistisch.“ „In der Stahlindustrie wird in der Entwicklung der Rahmenbedingungen für alle Szenarien ein leichter Produktionsanstieg von 0,3 Prozent pro Jahr angenommen. Da im Referenzszenario gleichzeitig der Anteil der Produktion von Elektrostahl aus Schrott von 30 Prozent auf 35 Prozent wächst, resultieren hieraus gleichbleibende Prozessemissionen von 17 Mt CO₂ä. Verfügbare Schrottmengen sind begrenzt, weshalb eine weitere Erhöhung über 35 Prozent hinaus im 80 %-Pfad nicht realistisch ist.“

Aus den gleichbleibenden Prozessemissionen lässt sich indirekt eine unverminderte Verfügbarkeit von Hüttensand aus der Stahlproduktion in der Hochofen-Konverter-Route schließen.

„Der Klinkeranteil im Zement lässt sich durch zusätzliche Beimischung von Hüttensanden und (noch verfügbarer) Flugasche aus Kohlekraftwerken von 74 Prozent in 2015 auf 68 Prozent in 2050 vermindern, was Energie- und Prozessemissionen in der Klinkerproduktion spart.“ [BCG; S. 44]

Diese Annahme entspricht den Szenarien 1, 2, 4 und 5 im VDZ-Modell2018, in denen nach einer Einschätzung der Entwicklung des Zementportfolios (Abschnitt 11.1.2) ein Klinker/Zement-Faktor von 69,2 % im Jahr 2030 angenommen wird. Gleichwohl wurde das Szenario 3 ca. -25 % Hüttensand als Szenarienvariation im VDZ-Modell2018 beibehalten, um die zukünftige Verfügbarkeit von besonders geeigneten weiteren Zementhauptbestandteilen wie Hüttensand als Voraussetzung der anderen Szenarien deutlich zu machen. Der Einsatz von Flugasche im Beton im Fall deutlich abnehmender Verfügbarkeit wurde als Beispiel 7 in Abschnitt 12.2 ergänzt.

11.4 Szenario 4: BAT-Mahlung

Einsatz neuer Mahltechniken mit vollständiger Umrüstung aller Mühlen auf Vertikal-Wälzmühlen bzw. kombinierte Mahlanlagen, basierend auf Szenario 2.

Das Szenario 4 BAT-Mahlung bildet den Einsatz neuer Mahltechniken ab. Es geht dabei in dem Referenzementwerk von einer vollständigen Umrüstung aller Mühlen auf Vertikal Wälzmühlen bzw. kombinierte Mahlanlagen aus. Diese Methode entspricht einem „Green-field Szenario“ für die Zementmahlung mit der Investition in einen Neubau der Mahlanlagen. Ausgenommen hiervon ist lediglich ein Anteil von ca. 6 % für die Herstellung hochfeiner Zemente. Es entspricht damit gleichzeitig der Methode und Beschreibung in der VDZ-Studie „Energieeffizienz bei der Zementherstellung“ [HOEc; S. 66].

Die Umrüstung bestehender Mahlanlagen ist wirtschaftlich in der Regel nur in Verbindung mit Kapazitätssteigerungen darstellbar. Es handelt sich folglich um eine Abschätzung der theoretisch erreichbaren maximalen Reduktionspotenziale:

„Verfahrens- bzw. anlagentechnisch wird davon ausgegangen, dass alle bestehenden Anlagen durch moderne Anlagen wie Vertikal-Wälzmühlen oder Gutbett-Walzenmühlen in Kombination mit Kugelmühlen zur Nachmahlung ersetzt werden. Das mögliche Einsparpotenzial wurde für beide Mahlsysteme als gleichwertig eingeschätzt und auf Werte von bis zu 30 % beziffert (VDZ-Arbeitsgruppe „Sekundärstoffe“, September 2012). Dieser Wert wurde durch Auswertung diverser Datensätze realer Anlagen verifiziert. Grund für die höhere Energieeffizienz ist eine Zerkleinerung unter Druck im Gutbett bzw. unter Gutbett-ähnlichen Bedingungen. Hierbei ist die Energieausnutzung trotz hoher Verluste durch Kompressions- und damit Reibungseffekte zwischen den Mahlgutpartikeln wesentlich höher als in der Kugelmühle. Die unterschiedlichen Beanspruchungsbedingungen, ein verändertes Verweilzeitverhalten und hohe Umlaufzahlen, führen zudem zu veränderten Korngrößenverteilungen, was im Produkt zu berücksichtigen ist. [...] Hierbei wurde ein deutlich höheres Einsparpotenzial bei der Mahlung von CEM II- und III-Zementen (-30 %) gegenüber den CEM I-Zementen (-20 %) aufgrund der geringeren Klinkeranteile identifiziert. Ferner wurde berücksichtigt, dass die erreichbaren Feinheiten bei der Zerkleinerung im Gutbett begrenzt sind. So sind sehr feine Zemente auf diesen Anlagen nur sehr schwer oder gar nicht herstellbar.“ [HOEc; S. 66]

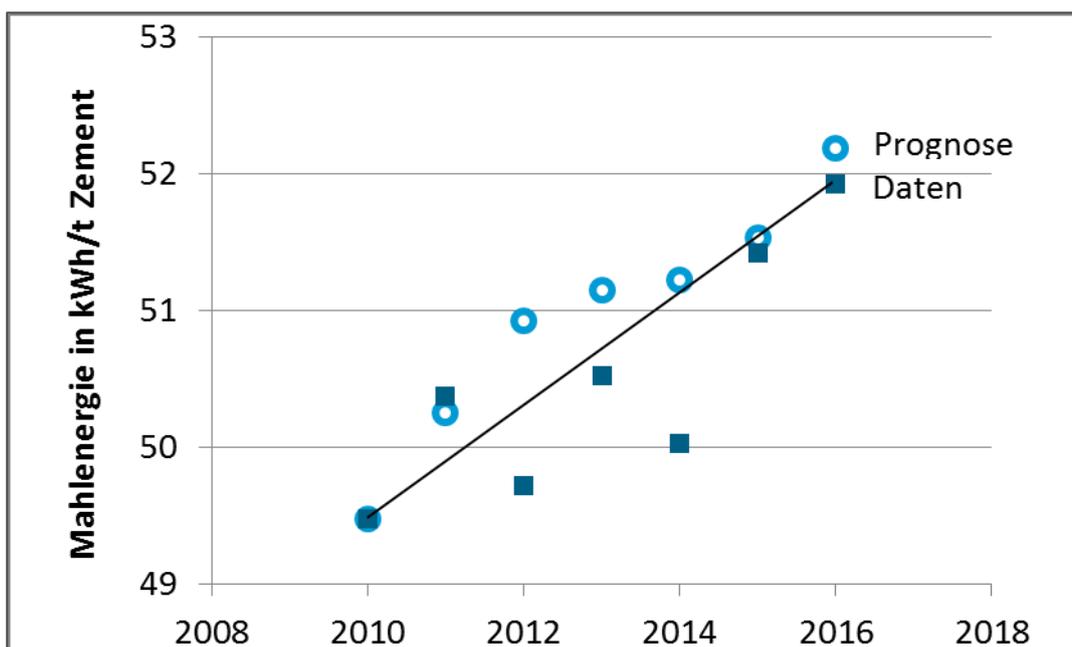
Dies wird berücksichtigt, indem für die Festigkeitsklasse 52,5 (2030: 21 %) ein Anteil von 50 % der CEM I-Zemente und 20 % der CEM II- und III-Zemente unverändert auf den Energiebedarfswerten von 2016 verbleibt. Dies entspricht mahlseitig einem „Green-field-Szenario“ mit Ausnahme von ca. 6 % für hochfeine Zemente, deren Mahlung unverändert ausschließlich auf Kugelmühlen erfolgt.

Trotz des vernachlässigbar geringen Einflusses wurden auch die übrigen Sorten anlog zu CEM II und III mitberücksichtigt. Es wird eine lineare Umsetzung der maximalen Einsparpotenziale bis 2030 angenommen.

11.4.1 Entwicklung der produktspezifischen Mahlenergie

Für die Auswertung im VDZ-Modell2018 konnten die Ableitung der Mahlenergie aus dem Portfolio an Zementsorten und Feinheiten validiert und weiter verfeinert werden. Hierbei wurde auch der weiterhin zunehmende Anteil an Produkten mit höherer Feinheit und Leistungsfähigkeit (Abbildung 23) und der hiermit einhergehende Trend zu höherem Einsatz von Mahlenergie in der Zementproduktion bestätigt. Dieser betrug in den letzten Jahren ca. +0,4 kWh/Jahr (Abbildung 27).

Abbildung 27: Modellierung der produktspezifischen Mahlenergie im VDZ-Modell2018



Quelle: VDZ, eigene Darstellung, VDZ-Modell2018

11.4.2 Auswirkungen auf den elektrischen Energieeinsatz

Im Szenario 4 BAT-Mahlung zeigt das VDZ-Modell2018 für eine vollständige Umrüstung der Mahlanlagen für Zement und Rohmehl im Referenzzementwerk auf Vertikal-Wälzmühlen und Kombimahlanlagen, eine deutliche Einsparung im elektrischen Energieeinsatz. Die Reduktion um $-59 \text{ TJ} = -16 \text{ GWh}$ als Differenz zwischen Szenario 4 und Szenario 2 entspricht -12% des elektrischen Energieeinsatzes 2030.

Hierbei bleiben mehrere Aspekte als maßgebliche Hemmnisse und Einschränkung für die praktisch erzielbare Minderung des elektrischen Energieeinsatzes in der Zement- und Rohmahlung zu berücksichtigen:

- ▶ Die Umrüstung bestehender Mahlanlagen ist wirtschaftlich in der Regel nur in Verbindung mit Kapazitätssteigerungen darstellbar. Es handelt sich folglich um eine Abschätzung der theoretisch erreichbaren maximalen Reduktionspotenziale
- ▶ Möglichkeiten zur Umrüstung von Zement- und Rohmühlen müssen Standort- und Werkspezifisch geprüft und bewertet werden
- ▶ Gegenläufiger Trend zu besonders leistungsfähigen Zementprodukten mit höherer Feinheit. Demnach könnte die Nachfrage nach hochfeinen Produkten, die i.d.R. einen Einsatz von Kugelmühlen und einen höheren Einsatz von Mahlergie erfordern, 2030 deutlich höher als 6% liegen. Der Anteil der Druckfestigkeitsklasse 52,5 wurde mit ca. 21% eingeschätzt (Abbildung 23)
- ▶ Möglichkeiten für einen gezielten Umgang mit diesen Hemmnissen könnten sich in einer getrennten Feinstmahlung und anschließenden Mischung finden (Abschnitt 2.1.3; Abbildung 9). Diese Technologien erfordern weitere Forschung und Entwicklung, um sicherzustellen, dass die notwendige Leistungsfähigkeit und Korngrößenverteilung der so hergestellten Zemente sicher erreicht werden kann. Hierzu könnten sich Ansätze aus einer Kombination mit der Erforschung neuer Mahltechniken ergeben (Abschnitt 2.1.4)

11.4.3 Auswirkungen auf die indirekten CO₂-Emissionen

Im Szenario 4 für das Referenzzementwerk verstärkt sich die Minderung der indirekten CO₂-Emissionen von -20% im Szenario 2 auf -30% im Szenario 4. Dies entspricht einer zusätzlichen indirekten Einsparung von 6 kt fossiler CO₂-Emissionen. Die direkten CO₂-Emissionen bleiben bei der Optimierung der Mahlprozesse unverändert. Auf die Summe von direkten und indirekten Emissionen bezogen entspricht diese Einsparung -1% . Indirekte CO₂-Emissionen aus dem Einsatz elektrischer Energie machen derzeit ca. 10% der direkten CO₂-Emissionen aus. Die gleichzeitige Änderung im Strommix verringert den Einfluss der elektrischen Energieeinsparung auf die CO₂-Emissionen.

Insgesamt werden die direkten und indirekten CO₂-Emissionen im Szenario 3 durch Anlagenoptimierung und vollständige Umrüstung der Mühlen im Referenzzementwerk für 2030 um -8% bzw. -57 kt CO₂ gemindert.

11.5 Szenario 5: Oxyfuel-Prozess mit 95 % CO₂-Abscheidung

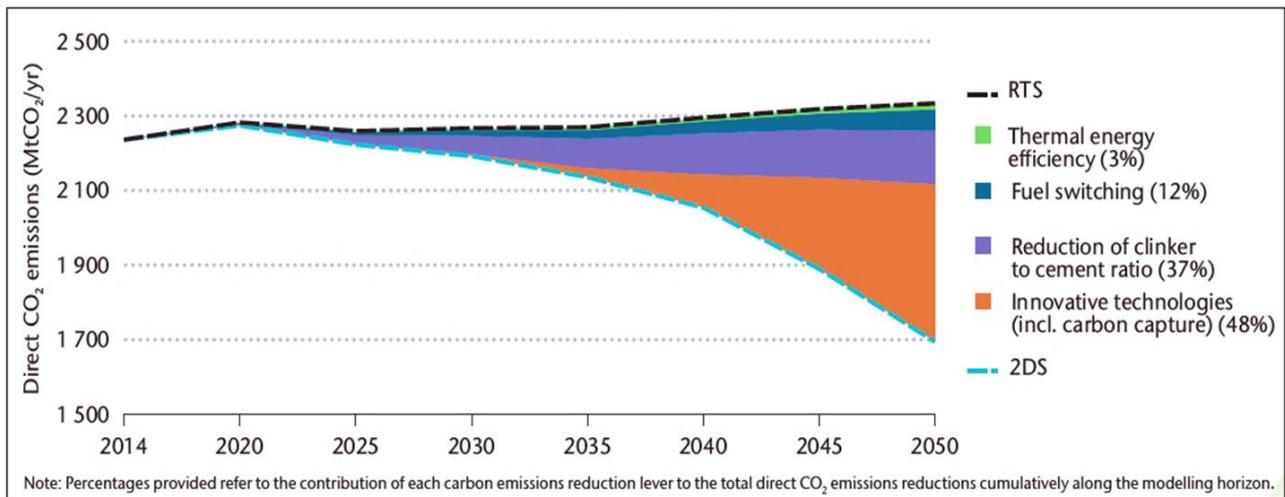
Einsatz der Oxyfuel CO₂-Capture Technologie an der Referenzanlage, basierend auf Szenario 2.

Bis 2030 könnte davon ausgegangen werden, dass diese Technologie an einer einzelnen Anlage eingesetzt wird. Ein weiterer Einsatz wird entsprechend der Bewertung aus dem Workshop allerdings erst im Zeitraum 2030 bis 2050 erwartet. Das Szenario 5 entspricht dem CSI/ECRA-Technology Paper 2017 Nummer 43 „Oxyfuel Technology“ mit 95% iger Abscheidung und Minderung von CO₂ aus dem Klinkerherstellungsprozess. Gleichzeitig basiert es auf Szenario 2.

Bei der Kombination der Szenarien 5 und 2 sind neben der Anwendung des Oxyfuel-Prozess zur CO₂-Abscheidung bei der Klinkerherstellung zusätzlich die weitreichende Anlagenoptimierung und die Nutzung von 80 % alternativer Brennstoffe mit einem Anteil biogenen Kohlenstoffs hervorzuheben.

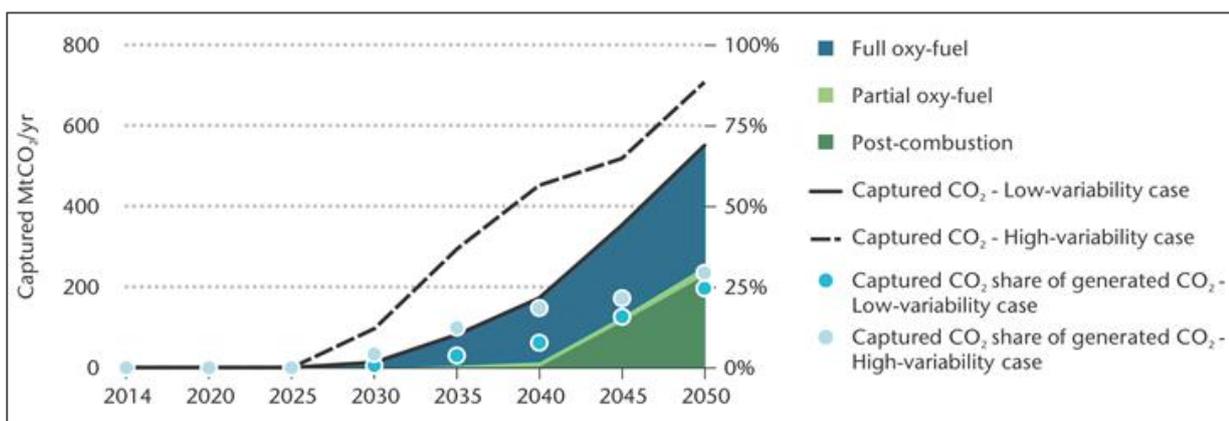
Entsprechend der Beschreibung und Ergebnisse internationaler Technologiepfade für die Zementindustrie ist eine sehr tiefgreifende Minderung der direkten und insbesondere zu 2/3 prozessbedingten CO₂-Emissionen bei der Klinkerherstellung erst durch CO₂-Abscheidung und -Speicherung erreichbar (Abbildung 28; CSI/IEA Technology Roadmap 2018 [IEAa]; CEMBUREAU Low-Carbon Economy Roadmap 2013 und 2018 [CEMc]). Für die mittelfristige Anwendung von Technologien zur CO₂-Abscheidung wird aus heutiger Sicht der vollständige Oxyfuel-Prozess als geeignete und energetisch effizienteste Lösung eingeschätzt (Abbildung 29). Eine dauerhafte CO₂-Speicherung könnte geologisch erfolgen. Zum Teil könnte dies auch durch Nutzung und dauerhafte Einbindung in Bauprodukten erfolgen [CEMb].

Abbildung 28: Technologiepfade zur Minderung von direkten CO₂-Emissionen bei der weltweiten Herstellung von Zement



Quelle: CSI/IEA Technology Roadmap 2018 [IEAa]; RTS: Referenzszenario; 2DS: 2 °C-Zielszenario zur Minderung von CO₂-Emissionen

Abbildung 29: Weltweite Perspektive zur Anwendung von Technologien zur CO₂-Abscheidung in der Zementindustrie



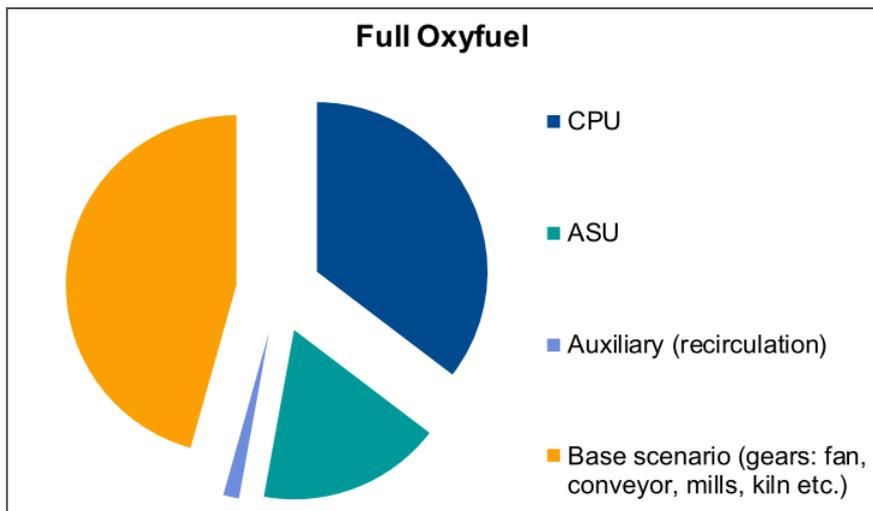
Quelle: CSI/IEA Technology Roadmap 2018 [IEAa]

Die Entwicklung geeigneter Technologien und insbesondere die technischen Möglichkeiten zur CO₂-Abscheidung aus einem Oxyfuel-Prozess im Zementwerk werden in laufenden Forschungsprojekten untersucht. Dies erfolgt z.B. im Carbon Capture Project der European Cement Research Academy [ECRAF; ECRAe] und im EU-Forschungsprojekt CEMCAP [CEMd; CEMe; CEMg]. Konkret wurde die Erprobung und Demonstration der CO₂-Abscheidung mit dem Oxyfuel-Prozess bislang in zwei Zementwerken in Italien und Österreich vorgeschlagen [ECRag].

11.5.1 Auswirkungen auf den Energieeinsatz

Der elektrische Energiebedarf wird durch die CO₂-Abscheidung im Oxyfuel-Prozesses im Szenario 5 im Vergleich zum Szenario 2 in etwa verdoppelt (+114 %). Diese Einschätzung entspricht den Ergebnissen diesbezüglicher Forschungsprojekte (Abbildung 30; [ECRAc; ECRAe; CEMe]). Im Referenzszenario entspricht dies einem zusätzlichen Strombedarf von +509 Tj = 141 GWh pro Jahr.

Abbildung 30: Elektrischer Energiebedarf beim vollständigen Oxyfuel-Prozess



Quelle: IEAGHG und ECRA Bericht: Deployment of CCS in the Cement Industry [ECRA_d]; CPU: CO₂ purification unit, Anlage zur CO₂ Aufbereitung; ASU: Air separation unit, Anlage zur Luftzerlegung; Auxiliary: Nebenanlagen; Base scenario: Szenario Basis eines Referenzzementwerks

Der thermische Energiebedarf beim Oxyfuel-Prozess unterliegt im Gegensatz zu nachgelagerten CO₂-Abscheidetechnologien (Post-combustion CO₂ capture) einer eher geringen Veränderung [ECRA_c; CEMe]. Diese wurde im VDZ-Modell2018 für das Referenzzementwerk mit der Annahme von +/- 0 abgebildet. Der thermische Energiebedarf ist letztlich jedoch abhängig von der Ausgangssituation des Werkes. So wird für den vollständigen Oxyfuel-Prozess im CSI/ECRA-Technology Paper Nr. 43 ein Bereich von -200 bis +90 MJ/t Klinker angegeben [ECRA].

Ergebnisse des EU-Forschungsprojekts CEMCAP zeigen die Möglichkeiten zur Nutzung von Restwärme in einem ORC-Prozess zur Stromerzeugung auf [CEM_f, CEM_g].

11.5.2 Auswirkungen auf die direkten CO₂-Emissionen

Der Oxyfuel-Prozess hat zunächst keine Auswirkung auf die bei der Zementklinkerherstellung erzeugte Menge an CO₂, sodass diese Angaben unverändert bleiben. Der vollständige Oxyfuel-Prozess ist in den Prozess zur Zementklinkerherstellung im Drehofen stark integriert. Durch die Vermeidung von Luftzutritt, die Nutzung von reinem Sauerstoff bei der Verbrennung und die teilweise Rezirkulation der Gase wird der CO₂-Gehalt im Abgas von ca. 20 % auf 80 % konzentriert.

Dies ermöglicht eine besonders energieeffiziente CO₂-Abscheidung, Aufbereitung und weitere Konzentration von CO₂ auf bis zu Nahe 100 % entsprechend dem Bedarf für die dauerhafte Speicherung oder Nutzung des CO₂. Insbesondere ermöglicht die CO₂-Abscheidung die Minderung der Emission an prozessbedingtem CO₂ aus der Entsäuerung von Kalkstein (Kalzinierung), das ca. 2/3 der gesamten CO₂-Emissionen bei der Klinkerherstellung ausmacht.

Unter der Voraussetzung, dass das abgeschiedene CO₂ dauerhaft gebunden oder sehr langfristig von der Atmosphäre ferngehalten wird, ist die abgeschiedene CO₂-Menge im Szenario 5 als vermiedene Emission berücksichtigt. Bei Abscheidung von 95 % der CO₂-Menge, die insgesamt ca. 10 % biogenes CO₂ enthält (64 von in Summe 698 kt CO₂, Anhang 3), ergibt sich in Bezug auf die ursprüngliche CO₂-Emissionen in die Atmosphäre zunächst eine Minderung von insgesamt -105 %. Es erfolgt somit ein geringer CO₂-Entzug aus der Atmosphäre anstelle der ursprünglichen CO₂-Emissionen. Hierbei ist die Abscheidung und dauerhafte Speicherung des biogenen CO₂-Anteils in Bezug auf die Atmosphäre als Technologie für CO₂-negative Emissionen (Negative Emission Technology, NET) berücksichtigt. Im Unterschied zu anderen Vorschlägen zum CCS in Biomassekraftwerken (BECCS) als Technologie für negative CO₂-Emissionen würde bei CCS und Nutzung alternativer Brennstoffe in der Zementindustrie die Biomasse nicht produziert, sondern vielmehr aus Abfallströmen eingebracht. Es entstehen somit i.d.R. keine wesentlichen zusätzlichen indirekten CO₂-Emissionen durch die Bereitstellung der Biomasse. Eine Realisierung würde allerdings auch die vollständige Vermeidung indirekter CO₂-Emissionen aus dem Einsatz von elektrischer Energie erfordern. Der Anteil von -5 % negativer CO₂-Emissionen entspricht im Fall des Referenzzementwerks einer Menge von -30 kt CO₂, die unter diesen Voraussetzungen aus der Atmosphäre netto entzogen werden könnten (* in Abbildung 31). Dieses Ergebnis ist gleichbedeutend mit einer vollständigen Minderung der direkten CO₂-Emissionen aus dem Prozess der Klinkerherstellung und eine anteilig darüber hinaus gehende Kohlenstoffsénke durch Entzug aus der Atmosphäre und Abscheidung von biogenem CO₂.

Dieser Effekt wird bei der Betrachtung des Lebenszyklus von Zement und seiner Nutzungs- und Nachnutzungsphase weiter verstärkt. Ursache hierfür ist, dass Beton zu einem begrenzten Anteil karbonisiert und dabei CO₂ aus der Atmosphäre aufnimmt [CEM_b]. Hierbei wird im Prinzip ein Teil des freigewordenen prozessbedingten CO₂ aus der Atmosphäre wieder aufgenommen und mineralisch dauerhaft eingebunden. Sofern die prozessbedingten CO₂-Mengen durch Abscheidung und dauerhafte Speicherung nicht als Emission in die Atmosphäre gelangen, ergibt sich hieraus ein begrenztes zusätzliches Potential für CO₂-negative Emissionen. Letzteres wurde in Szenario 5 jedoch nicht berücksichtigt.

11.5.3 Einbindung von CO₂ durch Karbonatisierung von Beton im Lebenszyklus

Die Einbindung von CO₂ durch Karbonatisierung im Verlauf des Lebenszyklus von Beton und der Nutzung von Zementprodukten, ist Gegenstand aktueller Entwicklungen von Methoden zu deren Abschätzung. Weder im Szenario 5 noch in den anderen Szenarien im VDZ-Modell2018 wird bisher die nachträgliche Einbindung von CO₂ als Rückführung eines Teils der ursprünglichen prozessbedingten CO₂-Mengen berücksichtigt. Diese Darstellung entspricht dem derzeitigen Vorgehen in nationalen Treibhausgasemissionsberichten gemäß den Regeln des IPCC. Gleichzeitig wird hierdurch eine langfristig wirkende Senke für einen Teil der ursprünglich prozessbedingt entstandenen CO₂-Emissionen außer Acht gelassen.

Für den Prozess der Karbonatisierung von Beton bestehen teilweise Ähnlichkeiten zu Technologien für Zemente auf Basis der Karbonatisierung (Abschnitt 6.3, Beispiel 6 im Abschnitt 12.1). Hierbei wäre die Einbindung von CO₂ durch Karbonatisierung einfach bei der Produktion oder im Lebenszyklus zu berücksichtigen.

11.5.4 Auswirkungen auf die indirekten CO₂-Emissionen

Entsprechend des nötigen Einsatzes an elektrischer Energie für den Oxyfuel-Prozess steigen die indirekten fossilen CO₂-Emissionen in Abhängigkeit von der Kohlenstoffintensität des eingesetzten Strommix. Im Szenario 5 wurde rechnerisch zunächst der gleiche Strommix im Jahr 2030 wie für die anderen Szenarien angenommen. Demnach verdoppeln sich die indirekten CO₂-Emissionen im Vergleich von Szenario 2 (52 kt CO₂) und Szenario 5 (106 kt CO₂) für das Referenzzementwerk.

Bei weiterer Reduktion der Kohlenstoffintensität könnten sich die indirekten Emissionen im Zeitraum 2030 bis 2050 deutlich absenken.

Bei einer fast vollständigen Reduzierung der indirekten CO₂-Emission aus der Strombereitstellung, könnte auch insgesamt für direkte und indirekte CO₂-Emission eine geringe Kohlenstoffsенke in Bezug auf die Atmosphäre entstehen (negative CO₂-Emissionen, NET).

11.5.5 Auswirkungen auf die direkten und indirekten CO₂-Emissionen

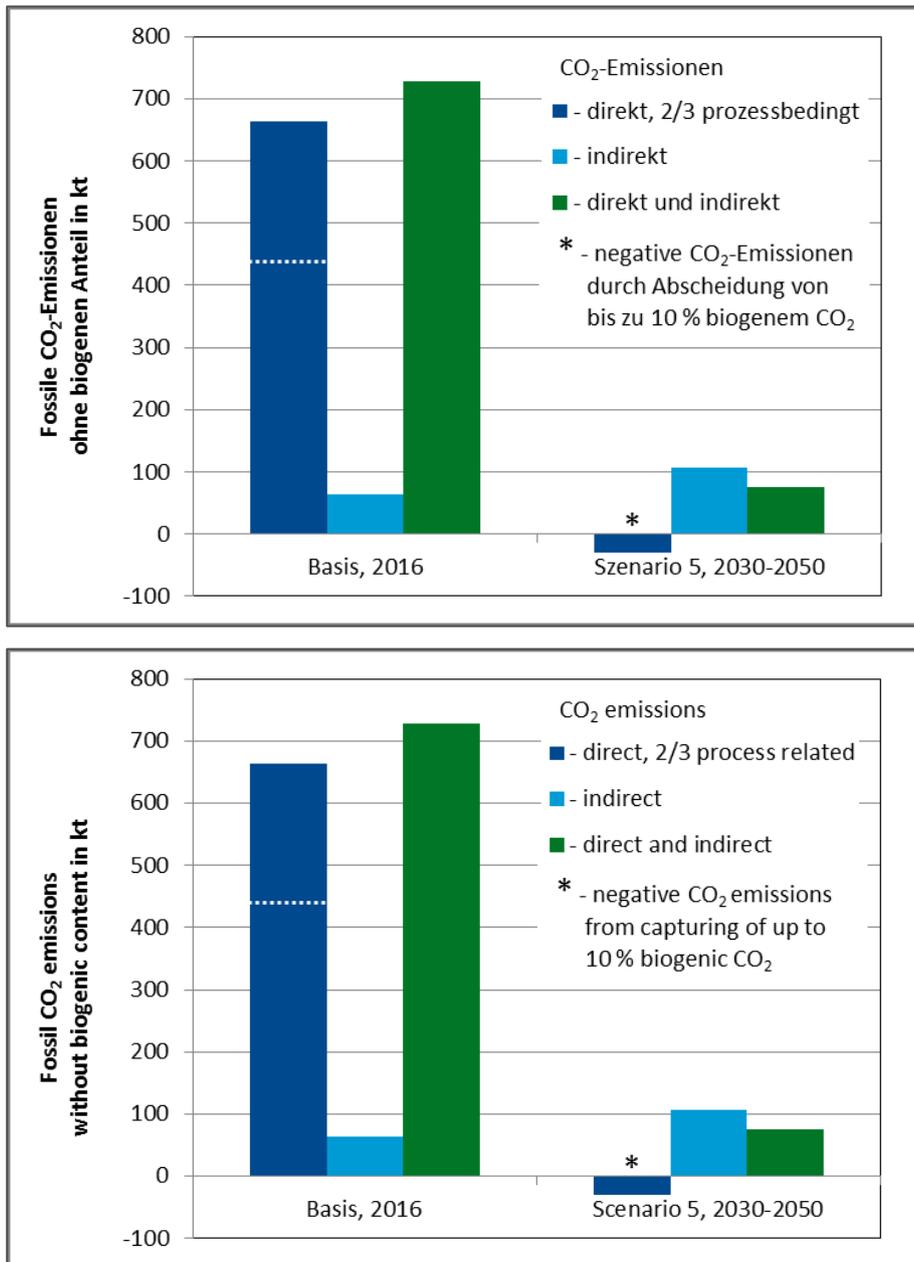
Von der 95 %igen CO₂-Abtrennung durch den Oxyfuel-Prozess im Referenzzementwerk verbleiben nach Bilanz mit der indirekten CO₂-Emissionen aus dem ca. verdoppelten Einsatz elektrischer Energie, -90 % CO₂-Emissionsminderung bezogen auf die Ausgangsbasis 2016 (Szenario 0).

Insgesamt werden im Szenario 5 durch

- ▶ Anlagenoptimierung,
- ▶ Nutzung alternativer Brennstoffe,
- ▶ umfängliche CO₂-Abscheidung im Referenzzementwerk in einem Oxyfuel-Prozess und
- ▶ dauerhafte CO₂-Speicherung,

die direkten und indirekten CO₂-Emissionen um -651 kt CO₂ gemindert (Abbildung 31).

Abbildung 31: Entwicklung der CO₂-Emissionen in einem Referenzzementwerk bei Anwendung des Oxyfuel-Prozesses mit 95 % CO₂-Abscheidung, Szenario 5, VDZ-Modell2018, in Deutsch und Englisch



Quelle: VDZ, eigene Darstellung, VDZ-Modell2018

11.5.6 Ausblick zur Anwendung von Technologien zur CO₂-Abscheidung im Zementherstellungsprozess und Bewertung der CO₂-Vermeidungskosten

Sowohl die hohen operativen Kosten aus dem verdoppelten Einsatz an elektrischer Energie als auch die hohen Investitionskosten, stellen aus heutiger Sicht eine große Hürde zur Anwendung der Oxyfuel-Prozesses dar. Die Kosten zur CO₂-Abscheidung werden für den Oxyfuel-Prozess zwischen 40 und 50 €/t CO₂ eingeschätzt [ECRAc; ECRAd].

Bei Anwendung anderer Technologien zur nachträglichen CO₂-Abscheidung (Post-combustion CO₂ capture) kommen in der Regel operative Kosten aus dem zusätzlichen Einsatz von thermischer Energie hinzu [CEMe].

Unabhängig von der Technologie zur Abscheidung von CO₂ im Zementherstellungsprozess sind die Kosten für den anschließenden CO₂-Transport und die CO₂-Speicherung mit zu berücksichtigen.

Die stoffliche Nutzung von CO₂ könnte bei einem begrenzten Umfang an Produkten mit einer hohen Wertschöpfung gegebenenfalls einen Beitrag zur Deckung der zusätzlichen Kosten erbringen.

Voraussetzungen sind in jedem Fall die erfolgreiche Demonstration der Technologien im industriellen Maßstab und die Schaffung ökonomischer und regulatorischer Voraussetzungen für den Einsatz von Technologien zur CO₂-Abscheidung sowie für die CO₂-Speicherung und Nutzung. Prinzipiell erforderlich sind hierfür effektive Methoden zur Vermeidung von Produktionsverlagerungen aufgrund einseitiger hoher CO₂-Vermeidungskosten (Carbon-Leakage-Schutz).

Eine Anwendung der Oxyfuel-Technologie kann entsprechend der Bewertung aus dem Projektworkshop allerdings nur unter der Voraussetzung eines effektiven und zuverlässigen Schutzes vor Carbon-Leakage und erst im Zeitraum 2030 bis 2050 erwartet werden.

12 Beispiele zu Einflüssen auf die Material- und Ressourceneffizienz

12.1 Beispiel 6: Zemente auf Basis der Karbonatisierung von Kalziumsilikaten

Einsatz neuer Bindemittel anhand des Beispiels der Karbonatisierung von Kalziumsilikaten, entsprechend Abschnitt 6.3, 8.2 und CSI/ECRA Technology Paper 2017 Nummer 39 „Cements based on carbonation of calciumsilicates“ [ECRA]

Zementprodukte auf der Basis der Karbonatisierung von Kalziumsilikaten könnten insbesondere in der Herstellung unbewehrter Fertigteilelementen angewendet werden. Somit würde sich ihr Einsatz auf ein spezielles Produktsegment beschränken.

Die Nutzung von CO₂ bei der Produktion würde zu dessen Einbindung in die mineralische Matrix des Baustoffs und damit zu seiner permanenten Speicherung führen. Hintergrund ist das Einbringen von CO₂ in die feinen Kapillarporen des Betons und die Reaktion unter Bildung von Kalziumcarbonat. Die aktive Karbonatisierung der Silikate in einer CO₂-reichen Atmosphäre bei Umgebungsgasdrücken dient somit als CO₂-Senke mit dauerhafter mineralischer CO₂-Speicherung in den hergestellten Bauprodukten. Es könnten etwa 200 bis 300 kg CO₂/t Zement gebunden werden [ECRA; SOL].

Je nach Rohstoff können kalkarme Kalziumsilikate (z.B. Wollastonit) bei um etwa 250 °C niedrigerer Brenntemperatur im Vergleich zum Portlandzementklinker gebrannt werden.

- ▶ Materialeinsatz ca. 1,38 t Rohmaterial mit niedrigerem Kalziumgehalt pro t Klinker
- ▶ Sintertemperatur von 1.200 °C
- ▶ Herstellung mit einem bis zu 30 % geringen Energieverbrauch und CO₂-Ausstoß gemäß Herstellerangaben [SOL]
- ▶ Keine Angaben zum elektrischen Energieeinsatz
- ▶ Einbindung von 200 bis 300 kg CO₂/t Zement

Beispiel 6 als Maximalansatz mit folgenden Annahmen:

- ▶ Bis zu 10 % des Zements wird auf der Basis einer neuen Technologieentwicklung zur Karbonatisierung von Kalziumsilikaten hergestellt und angewendet
- ▶ Einsparung von bis zu 240 kg CO₂/t Klinker bei der Herstellung und
- ▶ Einbindung von bis zu 240 kg CO₂/t Zement bei der Anwendung [SOL]

Beispielrechnung für das Referenzwerk in Bezug auf Szenario 2:

- ▶ Bei 10 % Anwendung ergibt sich eine maximale zusätzliche Minderung von -24 kt CO₂ (Abbildung 32)
- ▶ Dies entspricht -3,8 % der direkten oder -3,5 % der gesamten CO₂-Emissionen
- ▶ Würde ca. 1/3 der CO₂-Einbindung für die langfristige Karbonatisierung von Betonen (Abschnitt 11.5.3) und nicht als zusätzlich Minderung des neuen Bindemittels angerechnet, verbliebe eine zusätzliche Minderung von ca. -15 kt CO₂

12.2 Beispiel 7: Flugasche Einsatz im Beton

Flugasche Einsatz im Beton bei -50 % abnehmender Verfügbarkeit von Flugasche, in Bezug auf Szenario 3 und Abschnitt 7.3.1

Derzeit werden in Deutschland ca. 3 Mt Flugasche im Beton eingesetzt. Bei deutlich sinkender Verfügbarkeit der Flugasche ist davon auszugehen, dass auch der bisherige hauptsächliche Einsatz im Beton deutlich zurückgehen wird. In diesem Beispiel wird mit einem Rückgang der Flugaschemenge um 50 %, d.h. -1,5 Mt Flugasche, bis 2050 gerechnet. Die fehlenden 1,5 Mt Flugasche müssten durch Zemente des dann aktuellen Portfolios ersetzt werden.

Ein 1:1 Ersatz ist nicht 100 %ig richtig, da Flugasche mit einem k-Wert von 0,4 angerechnet wird. Es spielen aber auch Fragen des Leimgehaltes eine Rolle. Beides kann hier nicht genauer bewertet werden. Die folgende Beispielrechnung ist daher lediglich als grobe Einschätzung anzunehmen.

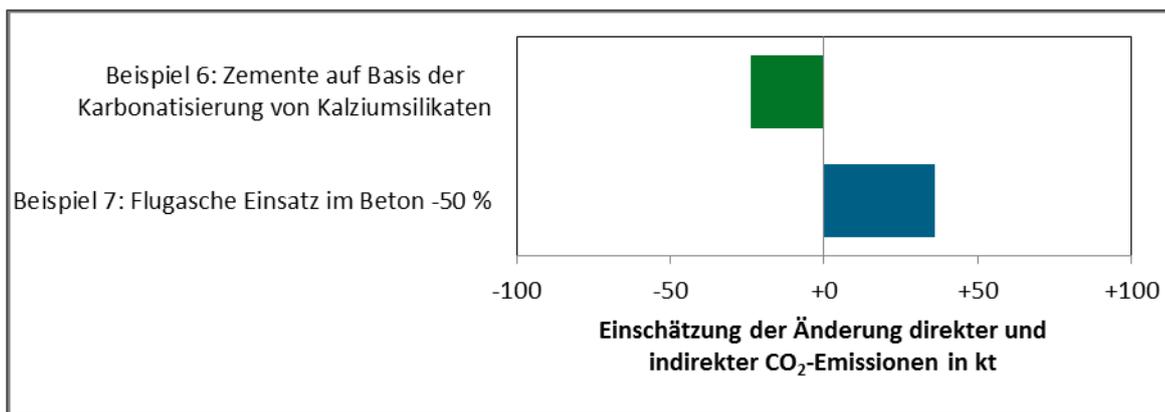
Beispiel 7 als grobe Einschätzung mit folgenden Annahmen:

- ▶ Bei halbiertes Verfügbarkeit von Flugasche erfolgt eine Steigerung der Zementproduktion in Deutschland von 33,0 Mt auf ca. 34,5 Mt in 2030

Beispielrechnung für das Referenzwerk in Bezug auf Szenario 3:

- ▶ Entsprechende anteilige Steigerung der Zementproduktion in einem Referenzzementwerk um ca. +4,5 %
- ▶ Entsprechende Erhöhung aller Material- und Energieeinsatzmengen und der CO₂-Emissionen um ca. +5,0 %
- ▶ Eine Abschätzungen mit Bezug auf das Szenario 3 liegt im Bereich von +4,5 bis +5,6 % CO₂-Emission, abhängig von der Verfügbarkeit der weiteren Hauptbestandteile
- ▶ Die zusätzlichen direkten CO₂-Emissionen im Referenzzementwerk belaufen sich auf +32 bis +40 kt CO₂ in 2030 (Abbildung 32)

Abbildung 32: Beispiele mit Einschätzung der Änderung direkter und indirekter CO₂-Emissionen



Quelle: VDZ, eigene Darstellung, Beispielrechnung, [ECRA]

12.3 Beispiel 8: Carbonbeton

Perspektiven für den Einsatz von Carbonbeton

Grundlagen

Beim Carbonbeton soll herkömmliche Stahlbewehrung durch Carbonbewehrung ersetzt werden. Ein wesentlicher Vorteil wird darin gesehen, schlankere Bauteile konstruieren zu können. Hier wäre für eine vergleichbare Leistungsfähigkeit des Bauteils perspektivisch ggf. weniger Beton erforderlich.

Das selbstgesteckte Ziel des Konsortiums zur Erforschung und Entwicklung von Carbonbeton C3 besagt, „dass wir in etwa 10 Jahren ca. 20 % des Stahlbetons durch Carbonbeton ersetzen können“. Zurzeit wird noch an Konstruktionsregeln gearbeitet und es fehlen z. T. baurechtliche Nachweise. Es gibt zudem kritische Stimmen im Hinblick auf die Recyclingfähigkeit. Es bleibt somit abzuwarten, welche Bedeutung der Carbonbeton in der Baupraxis einnehmen wird.

Perspektiven zum Einsatz von Carbonbeton

- ▶ Der im Carbonbeton verwendete Beton variiert von handelsüblichen Normalbetonen über hochfeste Feinbetone bis hin zu ultrahochfesten Spezialbetonen.
- ▶ Die Herstellung der Zemente für Spezialbeton erfordert in der Regel einen höheren Energieaufwand und schränkt die Nutzung von weiteren Hauptbestandteilen ein (Abschnitt 7.1.1). Der erforderliche verstärkte Einsatz an Klinker steht mit CO₂-Emissionen in Verbindung.

Mögliche Anwendungsfälle

Verstärken bestehender Betonbauwerke

- ▶ z. B. Brücken, Silos
- ▶ Anwendung ist praxiserprobt
- ▶ Bauaufsichtliche Zulassung liegt vor
- ▶ Verstärken mit Textilbeton nach abZ Z-31.10-182, DIBt, 2016

Entwicklung zur Anwendung in speziellen Bauteilen und im Neubau

- ▶ z. B. bei Stützen, Fassadenplatten, Brücken
- ▶ Entscheidende Entwicklungen (z.B. Carbonstäbe) und die Entwicklung geeigneter Regelwerke (z. B. Bemessung, Baustoffe, Bauausführung) stehen noch aus:
- ▶ <https://www.bauen-neu-denken.de/vorhaben/b1-bewehrung-beschichtung/>
- ▶ <https://www.bauen-neu-denken.de/vorhaben/v1-2-nachweis-und-pruefkonzepte-fuer-normen-und-zulassungen/>

Potentielle Materialeinsparung durch Carbonbeton

Mögliche Materialeinsparungen kann man nur am konkreten Bauteil darstellen. Je nach Art des Bauteils sind große Unterschiede möglich.

Derzeitige Beispiele:

- ▶ Bei einer Stütze wird die Materialeinsparung moderat ausfallen. Bewertung anhand einzelner ausgeführter Bauwerke stehen noch aus.
- ▶ Derzeitige Bauwerksanwendungen sind eine 15 m lange und mit 14 t sehr leichte Fußgängerbrücke und einzelne Pavillons mit leichter Dachkonstruktion zur Demonstrationszwecken: <https://www.bauen-neu-denken.de/wp-content/uploads/2016/12/C%C2%B3-Carbon-Concrete-Composite-e.-V.-Referenzobjekte-Stand-20170221.pdf>
- ▶ Bei einer Fassadenplatte als flächigem und nicht tragendem Bauelement könnte die Wandstärke z.B. von 8 cm auf 3 cm reduziert werden.
- ▶ Im speziellen Anwendungsbereich der Verstärkung von bestehenden Bauwerken scheinen Materialeinsparungen um die 80 % bezogen auf die Verstärkung möglich.

Derzeitige Bewertung der Anwendung von Carbonbeton

Eine belastbare Aussage hinsichtlich eines genauen Prozentsatzes der Betonersparung in Bezug auf die breite Anwendungen von Beton kann gegenwärtig und sicher auch in naher Zukunft nicht getroffen werden. Dazu müsste die Anwendung von Carbonbeton zunächst im breiten Markt ankommen und potentielle Massenwendungen etablieren. Zum Anteil verschiedener Bauteile an der Gesamtbetonproduktion liegen keine statistischen Daten vor. Eine belastbare Einschätzung zu Ersatzmöglichkeiten von Stahlbeton durch Carbonbeton erscheint daher derzeit nicht möglich.

- ▶ Eine umfassende Bewertung der Umweltwirkung, Energieeinsätze und damit verbundener direkter und indirekter CO₂-Emissionen des Einsatzes von Carbonbeton steht noch aus. Diese Aufgabe soll insbesondere im C3-Projekt, im Teilprojekt V2.10 Nachhaltigkeitsbewertung von Carbonbeton erfolgen.
- ▶ Im Zuge einer Lebenszyklusbetrachtung ist bei den Umweltwirkungen als wichtiger Aspekt die Möglichkeiten zur Entsorgung oder das Recycling von Carbonbeton mit zu berücksichtigen (Abschnitt 7.1.2).

Projektbeispiele

- ▶ Deutschland: Zulassung von Carbonbeton für Verstärkungen
- ▶ Schweiz: Einsatz vorgespannter Carbonbewehrung

12.4 Beispiel 9: R-Zement

Recycling von Brechsand zur weiteren Ressourceneffizienz in der Zementherstellung bezogen auf Kalk als Zementhauptbestandteil

Brechsand findet derzeit Anwendung in verschiedenen Verwertungswegen (Erdbaustoffe, Sandbetten, etc.). Zukünftig könnte sich die verfügbare Brechsandmenge bei der reinen Aufbereitung von Beton und Erhöhung des Anteils von rezyklierter Gesteinskörnung (RC) für die Betonindustrie erhöhen (Abschnitt 7.2.1).

Verfügbarkeit von Brechsanden

- ▶ Bei der Aufbereitung von Beton fallen rund 20 % Brechsand an.
- ▶ Bei der Aufbereitung von Mauerwerk rund 30 bis 40 % Brechsand an.
- ▶ Für Aussagen zu zukünftigen Gesamtmengen liegen allerdings keine belastbaren Statistiken vor.

Derzeitige Bewertung der Nutzung von Brechsanden

- ▶ In den Untersuchungen zum Einsatz von gemahlenem Brechsand als Hauptbestandteil im Zement (sogenannter R-Zement) wurden bis zu 10 bis 30 Masse-% Brechsand verwendet.
- ▶ In Abhängigkeit des Baumaterials, aus dem der Brechsand für die Laborversuche gewonnen wurde, sowie in Abhängigkeit des Brechsandanteils und der Klinkergranulometrie zeigten die Ergebnisse, dass Brechsande als Zementhauptbestandteil geeignet sind und Betone mit R-Zementen wesentliche dauerhaftigkeitsrelevante Zulassungskriterien erfüllen können [SEV; VDZ17b].
- ▶ Beim Einsatz im Zement könnte durch den Einsatz von Brechsanden der Einsatz von Kalkstein als Zementhauptbestandteil teilweise ersetzt werden.
- ▶ Als wesentliche Voraussetzung müssten Regelungen für den Einsatz von Betonbrechsanden in der Zementnorm (EN 197-1) entwickelt oder alternativ Bauaufsichtliche Anwendungszulassungen angestrebt werden.

Förderliche Aspekte:

- ▶ Normung von Brechsand als Hauptbestandteil
- ▶ Hierzu ist die Ergänzung der Regelwerke bereits vorgeschlagen

Hinderliche Aspekte:

- ▶ Zukünftig ggf. Konkurrenz der Stoffströme: Hauptbestandteil im Zement vs. Sandersatz im Beton, ggf. Unterteilung nach chemischer Zusammensetzung möglich bzw. sinnvoll

- ▶ Logistik der Materialströme, hierbei ist R-Beton wesentlich relevanter als R-Zement

Forschungsansätze:

- ▶ Aufbereitungsverfahren für hohe und gleichbleibende Qualität

Anmerkungen:

- ▶ Kalkstein im Rohmehl durch Brechsand ersetzen
- ▶ Kalkstein im Zement (Hauptbestandteil) durch Brechsand ersetzen ist ein erfolgversprechenderer Ansatz
- ▶ Recarbonatisierung optimal nutzen. Dabei muss der zusätzliche Energieaufwand berücksichtigt werden

Quellenverzeichnis

Abkürzung Beschreibung

- [ABA]: Abanades, Carlos. CO₂ emission reduction by using CO₂ from the cement industry : Myths and facts. In: VDZ, Ed. 8th International VDZ Congress 2018; Proceedings (Duesseldorf 26–28 September 2018) Duesseldorf, 2018, S.216-227
- [AGO]: Agora Energiewende, Hrsg. Der Klimaschutzbeitrag des Stromsektors bis 2040 : Entwicklungspfade für die deutschen Kohlekraftwerke und deren wirtschaftliche Auswirkungen; Studie, 2015 [Zugriff am: 22.01.2019] Verfügbar unter: https://www.agora-energiewende.de/fileadmin2/Projekte/2014/Kraftwerkspark-im-Einklang-mit-Klimazielen/Agora_Klimaschutzbeitrag_des_Stromsektors_2040_WEB.pdf
- [AKB]: Arbeitsgemeinschaft Kreislaufwirtschaftsträger Bau, Hrsg. 5. Monitoring-Bericht Bauabfälle : Erhebung: 2004. Berlin, 2007
- [BAU]: Schmidt, M.; Fehling, E.. Ultrahochfester Beton : Planung und Bau der ersten Brücke mit UHPC in Europa. Kassel, 2003 (Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau 2)
- [BAZ]: Bazzanella, Alexis M.; Ausfelder, Florian. Low carbon energy and feedstock for the European chemical industry : Technology study. Frankfurt / M., 2017 [Zugriff am: 13.11.2017] Verfügbar unter: http://dechema.de/dechema_media/Technology_study_Low_carbon_energy_and_feedstock_for_the_European_chemical_industry-p-20002750.pdf
- [BBS]: Bundesverband Baustoffe Steine und Erden, BBS, Hrsg. Mineralische Bauabfälle Monitoring 2014 : Bericht zum Aufkommen und zum Verbleib mineralischer Bauabfälle im Jahr 2016. Berlin, 2019 [Zugriff am: 25.01.2019] Verfügbar unter: <http://www.kreislaufwirtschaft-bau.de/arge/Bericht-11.pdf>
- [BCG] Gerbert, Philipp; Herhold, Patrick; Burchardt, Jens; Schönberger, Stefan; Rechenmacher, Florian; Kirchner, Almut; Kemmler, Andreas; Wünsch, Marco, Hrsg. Klimapfade für Deutschland. München, 2018 Verfügbar unter: <https://bdi.eu/publikation/news/klimapfade-fuer-deutschland/>
- [BET]: Informationszentrum Beton GmbH. http://www.beton-informationen.de/huettensandhaltige_zeemente/. aufgerufen am 11.05.2017
- [BMUB]: Weniger Rohstoffe für mehr Beton: Pressemitteilung vom 06.06.2017 [Zugriff am: 17.07.2017]. Verfügbar unter: <http://www.bmub.bund.de/pressemitteilung/weniger-rohstoffe-fuer-mehr-beton/>
- [BREF]: Schorcht, Frauke; Kourti, Ioanna; Scalet, Bianca M.; Roudier, Serge; Delgado Sanchez, Luis. Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Production of Cement, Lime and Magnesium Oxide : Industrial Emissions Directive 2010/75/EU (Integrated Pollution Prevention and Control), 2013 [Zugriff am: 24.01.2019] Verfügbar unter: http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/BREF/CLM_Published_def.pdf
- [CAL]: Beneficial reuse of CO₂ - The process [Zugriff am: 15.05.2017]. Verfügbar unter: <http://www.calera.com/beneficial-reuse-of-co2/process.html>
- [CALa]: CALyPSOL: Mit konzentrierter Solarstrahlung betriebenes Kalziumoxid-Looping [Zugriff am: 05.02.2019]. Verfügbar unter: https://www.dlr.de/sf/desktopdefault.aspx/tabid-9315/22259_read-53581/
- [CEM]: Hanstein, T.; Kleemann, F.; de Weldige, E.. Plant upgrade with the Köppern 2-Stage Koesep - a combined air classifier for high pressure grinding rolls applications. Cement International. 2017, 15(1), S.34-38

[CEMa]: DeCONOX-Anlage am 29. September 2016 feierlich eröffnet. [Zugriff am: 24.01.2019] Verfügbar unter: <http://www.kirchdorfer.at/blog/deconox-anlage-am-29-september-2016-feierlich-eroeffnet/>

[CEMb]: Cembureau, Hrsg. Building carbon neutrality in Europe : Engaging for concrete solutions ; #madewithcement Brüssel, 2018 [Zugriff am: 31.10.2018] Verfügbar unter: https://lowcarbon-economy.cembureau.eu/wp-content/uploads/2018/10/CEMBUREAU-BUILDING-CARBONNEUTRALITY-IN-EUROPE_WEB_PBP.pdf

[CEMc]: Cembureau, Hrsg. The role of CEMENT in the 2050 Low Carbon Economy: Executive Summary. Brüssel, 2013 Verfügbar unter: <https://lowcarboneyconomy.cembureau.eu>

[CEMd]: Abanades, Carlos; Cinti, Giovanni; Berstad, David; Hoenig, Volker; Hornberger, Matthias; Jordal, Kristin; Garcia Monteiro, Juliana; Gardarsdottir, Stefania; Ruppert, Johannes; Sutter, Daniel; Meer, Rob van der; Voldsund, Mari. D2.11 CEMCAP Strategic conclusions – progressing CO₂ capture from cement towards demonstration : WP2 WP Dissemination and exploitation, 2018 (CEMCAP 641185) Verfügbar unter: <https://zenodo.org/communities/cemcap/>

[CEMe]: Voldsund, Mari; Anantharaman, Rahul; Berstad, David; De Lena, Edoardo; Fu, Chao; Gardarsdottir, Stefania; Jamali, Armin; Pérez-Calvo, José-Francis; Romano, Matteo; Roussanaly, Simon; Ruppert, Johannes; Stallmann, Olaf; Sutter, Daniel. D4.6 CEMCAP comparative techno-economic analysis of CO₂ capture in cement plants : WP4: Comparative capture process analysis. Trondheim, 2018 (CEMCAP 641185) [Zugriff am: 15.11.2018] Verfügbar unter: <https://zenodo.org/communities/cemcap/>

[CEMf]: Jamali, Armin; Fleiger, Kristina; Ruppert, Johannes; Hoenig, Volker; Anantharaman, Rahul. D6.1 revision 1 Optimised operation of an oxyfuel cement plant : WP 6 - Oxyfuel modeling and optimisation. Düsseldorf: VDZ gGmbH, 2018 (CEMCAP 641185) [Zugriff am: 15.11.2018] Verfügbar unter: <https://zenodo.org/communities/cemcap/>

[CEMg]: CEMCAP, 2015 bis 2018. Projekt-Webseite und Ergebnisse. Verfügbar unter: <https://www.sintef.no/projectweb/cemcap/>

[CFK]: Umweltforschungsplan - Entsorgung von carbonfaserverstärkten Kunststoffen [Zugriff am: 25.07.2017]. Verfügbar unter: <http://www.teer.rwth-aachen.de/go/id/naic>

[CLE]: CLEANKER, Clean clinker production by oxyfuel and calcination and Calcium looping process. Projekt-Webseite. Verfügbar unter: <http://www.cleanker.eu/>

[DEW]: Dewald, U.; Achternbosch, M.; Nieke, E.; Sardemann, G.. Towards low-carbon alternatives for OPC? Implications from recent radical innovations (Novacem, Calera, Celitement) for cement research. In: China Building Materials Academy (Hrsg.): 14th International congress on the chemistry of cement, ICCS (Beijing 13.-16.10.2015). Beijing, 2015

[DIN EN 197-1]: Norm DIN EN 197-1 2011-11. Zement: Teil 1: Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien von Normalzement ; Deutsche Fassung EN 197-1:2011

[DIN EN 15403]: Norm DIN EN 15403 2011-05. Feste Sekundärbrennstoffe: Bestimmung des Aschegehaltes; Deutsche Fassung EN 15403:2011: Solid recovered fuels. Determination of ash content

[DIN EN 206-1]: Norm DIN EN 206-1 (2005-09): Beton: Teil 1: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität ; Deutsche Fassung EN 206-1:2000

[DIN 1045-2]: Norm DIN 1045-2 2008-08. Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton: Teil 2: Beton - Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität; Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1

[DIN EN 12620]: Norm DIN EN 12620 2008-07. Gesteinskörnungen für Beton: Deutsche Fassung EN 12620:2002+A1:2008

[ECO]: ECO-Binder - Development of insulating concrete systems based on novel low CO2 binders for a new family of eco-innovative, durable and standardized energy efficient envelope components, © 2015-2019 [Zugriff am: 25.01.2019] Verfügbar unter: <http://www.ecobinder-project.eu/en/>

[ECRA]: European Cement Research Academy, ECRA; Cement Sustainability Initiative (CSI), Hrsg. Development of State of the Art-Techniques in Cement Manufacturing : Trying to Look Ahead ; CSI/ECRA-Technology Papers 2017 ; A-2016/2305. Düsseldorf; Geneva: European Cement Research Academy, ECRA; Cement Sustainability Initiative (CSI), 2017 Verfügbar unter: <https://ecra-online.org/research/technology-papers/>

[ECRAa]: European Cement Research Academy, Hrsg. ECRA Future Grinding Technologies Project – Report about Phase I : Evaluation of roundtable event. Düsseldorf: ECRA, 2015 (Technical Report TR 127/2015). Verfügbar unter: <http://www.ecra-online.org/research/ccs>

[ECRAb]: Hoenig, Volker; Hoppe, Helmut; Koring, Kristina; Lemke, Jost. ECRA CCS Project : Report about Phase II. Düsseldorf, 2009 (Technical Report TR-ECRA-106/2009) [Zugriff am: 09.01.2019] Verfügbar unter: <http://www.ecra-online.org/research/ccs>

[ECRAc]: Hoenig, Volker; Hoppe, Helmut; Koring, Kristina; Lemke, Jost. ECRA CCS Project : Report on Phase III. Düsseldorf: ECRA, 2012 (Technical Report TR-ECRA-119/2012) [Zugriff am: 09.01.2019] Verfügbar unter: <http://www.ecra-online.org/research/ccs>

[ECRAd]: International Energy Agency, IEA; European Cement Research Academy, ECRA ; IEAGHG ; , Hrsg. Deployment of CCS in the Cement Industry : Report:2013/19 ; December 2013. Cheltenham: IEA, 2013 [Zugriff am: 29.07.2014] Verfügbar unter: http://www.ieaghg.org/docs/General_Docs/Reports/2013-19.pdf

[ECRAe]: ECRA, Hrsg. Presentations and Posters of the ECRA/CEMCAP/CLEANER Workshop 2018 on Carbon Capture Technologies in the Cement Industry (Brüssel 17.10.2018), 2018 Verfügbar unter: <https://ecra-online.org/research/ccs/presentations-and-posters/>

[ECRAf]: CCS - Carbon Capture and Storage: Projekt-Webseite Verfügbar unter: <https://ecra-online.org/research/ccs/>

[ECRAg]: Cement industry launches an industrial-scale carbon capture project [Zugriff am: 25.01.2019]. Verfügbar unter: https://ecra-online.org/fileadmin/ecra/press_releases/Cement_Industry_Launches_Industrial-Scale_Carbon_Capture_Project.pdf

[EDEFU]: Verein Deutscher Zementwerke, VDZ, Hrsg. Biomass gasification in the cement clinker production - Technoeconomic analysis of future market development : Report on the main energy efficiency; EDEFU No. 8.5, grant agreement no. 246335, 2014

[EHR]: Ehrenberg, Andreas. Granulated blast furnace slag - From laboratory into practice. In: China Building Materials Academy (Hrsg.): 14th International congress on the chemistry of cement, ICCB (Beijing 13.-16.10.2015). Beijing, 2015

[ETR]: European Tyre and Rubber Manufacturers' Association, Hrsg. End-of-life Tyre REPORT 2015, 2016 [Zugriff am: 25.01.2019] Verfügbar unter: <http://www.etrma.org/uploads/Modules/Documentsmanager/elt-report-v9a---final.pdf>

[FEHS]: Institut für Baustoffforschung. <http://www.fehs.de/eisenhuettenschlacken/stahlwerksschlacke/>. aufgerufen am 11.05.2017

[FLE]: Fleiger, Philipp M.. Herausforderungen in der Zementmahlung: Energie- und ressourceneffiziente Produktion. In: ProcessNet-Fachgruppe Zerkleinerung und Klassieren: Jahrestreffen 2014 (Kaiserslautern 18.-19.03.2014)

[GAR]: Garbev, Krassimir; Beuchle, Günter; Schweike, Uwe; Merz, Daniela; Dregert, Olga; Stemmermann, Peter. Preparation of a Novel Cementitious Material from Hydrothermally Synthesized C–S–H Phases . American Ceramic Society: Journal. 2014, 97(7), S.2298-2307

[HOEa]: Hoenig, Volker; Klaus, Cornelia. Use of alternative fuels and raw materials in the German Cement Industry – legal requirements, environmental benefits and practical experience : Technical Report TR-UBt 0003/2010/V. Düsseldorf: Verein Deutscher Zementwerke, VDZ, 2010

[HOEb]: Hoenig, Volker. Prozessstabilisierung bei hohem Sekundärbrennstoffeinsatz durch Sauerstofffeindüsung bei Drehofenanlagen der Zementindustrie : Schlussbericht zu dem IGF-Vorhaben 16980 N. Düsseldorf: Forschungsinstitut der Zementindustrie GmbH, 2015 (IGF-Forschungsvorhaben ; AIF-Forschungsvorhaben 16980 N). Verfügbar unter: <https://www.vdz-online.de/research/completed-projects/stabilisation-of-processes-with-high-second-ary-fuel-use-through-the-injection-of-oxygen-in-rotary-kiln-plants-in-the-cement-industry/>

[HOEc]: Hoenig, V.; Koring, K.; Fleiger, P.; Müller, Ch.; Palm, S.; Reiners, J.. Energieeffizienz bei der Zementherstellung: Teil 1; Teil 2. Cement International. 2013, 11(3/4), S.50-67/S.46-65

[HOL]: HOLCIM Deutschland, Hrsg., Homepage der HOLCIM Deutschland AG. ©2018. Verfügbar unter: <http://www.holcim.de/de.html>

[IEA]: World Business Council for Sustainable Development, WBCSD; International Energy Agency, IEA, Hrsg. Cement Technology Roadmap 2009 : Carbon emissions reductions up to 2050. Conches-Geneva: World Business Council for Sustainable Development, WBCSD, 2009

[IEAa]: International Energy Agency, IEA, Hrsg. Low-Carbon Transition in the Cement Industry : Technology Roadmap. Paris: International Energy Agency, IEA, 2018. Verfügbar unter: [TechnologyRoadmapLowCarbonTransitionintheCementIndustry.pdf](#)

[IGB]: Industriegewerkschaft Bauen-Agrar-Umwelt; Industriegewerkschaft Bergbau, Chemie, Energie; Sozialpolitische Arbeitsgemeinschaft der Deutschen Zementindustrie; Verein Deutscher Zementwerke, VDZ, Hrsg. Nachhaltigkeit und Zementindustrie : Dokumentation von Beiträgen und Handlungsoptionen. Düsseldorf: Verl. Bau und Technik, 2013. Verfügbar unter: <https://www.vdz-online.de/publikationen/nachhaltigkeit-zementindustrie/>

[IND]: Cement Sustainability Initiative (CSI), Hrsg. Existing and potential technologies for carbon emissions reductions in the Indian cement industry : A set of technical papers produced for the project "Low carbon technology roadmap for the Indian cement industry". Washington: World Bank, 2013 Verfügbar unter: <http://www.wbcscement.org/index.php/en/key-issues/climate-protection/technology-roadmap/india-roadmap>

[JOR]: Jordal, Kristin. CEMCAP - Technological achievements and key conclusions: ECRA/CEM-CAP/CLEANER Workshop Brussels, 17 October 2018. In: European Cement Research Academy, ECRA; Research Group CEMCAP; Research Group CLEANER, Ed. Presentations and Posters of the ECRA/CEM-CAP/CLEANER Workshop 2018 on Carbon Capture Technologies in the Cement Industry (Brussels 17 October 2018). , 16 S. Verfügbar unter: <https://ecra-online.org/research/ccs/presentations-and-posters/>

[KAR]: Karthaus, Lisa; Schall, Albrecht; Hoenig, Volker. Electrical clinker production - Literature study : Technical Report P-2018/0285. Düsseldorf, 2018

[KAS]: Muster, Frank. Rotschlamm : Reststoff aus der Aluminiumoxidproduktion - Ökologischer Rucksack oder Input für Produktionsprozesse? 2007. Kassel, Univ., Diss., 2007 [Zugriff am: 02.05.2017] Verfügbar unter: <http://www.uni-kassel.de/upress/online/frei/978-3-89958-359-5.volltext.frei.pdf>

[KLA]: Kläusli, Thomas M (2016): Kann HTC die Verwertung von Klärschlamm in der Industrie sicherstellen? In: Fachtagung Zement-Verfahrenstechnik (Düsseldorf 04.02.2016)

- [KLE]: Klein, Henning; Hoenig, Volker. Model calculations of the fuel energy requirement for the clinker burning process: Modellrechnung zum Brennstoffenergiebedarf des Klinkerbrennprozesses. Cement International. 2006, 4(3), S.44-63
- [KRB]: Bundesverband Baustoffe –Steine und Erden e.V., (2017). Kreislaufwirtschaft Bau „Mineralische Bauabfälle Monitoring 2012“. Berlin
- [LEI]: Leibinger, Helmut; Rechberger, Katharina. Stromerzeugung aus der Abgaswärme der Drehofenanlage im Zementwerk Rohrdorf, 2012 [Zugriff am: 25.01.2019] Verfügbar unter: https://www.umweltinnovationsprogramm.de/sites/default/files/benutzer/36/dokumente/endbericht_final.pdf
- [LEIa]: LEILAC, Low Emissions Intensity Lime And Cement, Projekt-Webseite. Verfügbar unter: <https://www.project-leilac.eu/>
- [LEN]: HeidelbergCement Technology Center, Hrsg. Niedertemperaturverstromung mittels einer ORC-Anlage im Werk Lengfurt der Heidelberger Zement AG : Auswertung der Messergebnisse aus vier Messkampagnen zur Untersuchung der Anlageneffizienz, 2001 [Zugriff am: 25.01.2019] Verfügbar unter: <https://docplayer.org/49578700-Niedertemperaturverstromung-mittels-einer-orc-anlage-im-werk-lengfurt-derheidelberger-zement-ag.html>
- [LOC]: Locher, Friedrich W.. Zement : Grundlagen der Herstellung und Verwendung. Düsseldorf, 2000
- [MUD]: Mudersbach, Dirk; Motz, Heribert. Zukunftstechnologien für Energie- und Bauwirtschaft – am Beispiel der Schlacken aus der Elektrostahlerzeugung. In: Heußén, M.; Motz, H., Hrsg. Schlacken aus der Metallurgie: Bd. 2 Ressourceneffizienz und Stand der Technik. Neuruppin, 2012 [Zugriff am: 25.01.2019]. Verfügbar unter: http://www.vivis.de/phocadownload/Download/2012_sam/2012_SaM_151_168_Mudersbach_Motz.pdf
- [MUE]: Müller, Christoph; Reiners, Jochen; Palm, Sebastian. Closing the loop : What type of concrete-reuse is the most sustainable option?. Düsseldorf: ECRA, 2015 (A-2015/1860) Verfügbar unter: <https://www.theconcreteinitiative.eu/newsroom/publications/165-closing-the-loop-what-type-of-concrete-re-use-is-the-most-sustainable-option>
- [MUEa]: Müller, Anette. Überblick über Chancen und Grenzen von Betonrecycling. In: Oesterheld, René, Hrsg. 3. Betonfachtagung Nord : Das Bauen mit Beton aus dem Blickwinkel der Dauerhaftigkeit und neuer Regelwerke (Braunschweig 29.-30.09.2011). Düsseldorf, 2011, S.121-138
- [MVA]: VDZ, Hrsg. Entwicklung eines Verfahrens zur Verwertung von MVA-Schlacken als Rohstoffkomponente bei der Zementherstellung. Entwurf des Schlussberichts zum IGF-Vorhaben 18533 N (09.04.2019). Düsseldorf[NOR]: Carbon capture – a part of our zero vision [Zugriff am: 25.01.2019]. Verfügbar unter: https://www.norcem.no/en/carbon_capture
- [NOX]: Edelkott, Detlef; Thormann, Jürgen; Hoenig, Volker; Hoppe, Helmut; Oerter, Martin; Seiler, Cornelia. Abschlussbericht zum Vorhaben Minderung von NOx-Emissionen in einer Drehofenanlage der Zementindustrie mittels SCR-Technologie (High-Dust) : KfW-Aktenzeichen MB e1 -. Ulm, 2014 (BMU-Umweltinnovationsprogramm) [Zugriff am: 01.02.2015] Verfügbar unter: http://www.umweltinnovationsprogramm.de/sites/default/files/benutzer/36/dokumente/zement_schwenk_ab_scr_high_dust_2014.pdf
- [OER]: Oerter, Martin. Hochwertige Verwertung von Abfällen: Der Beitrag der Zementindustrie zu einer modernen Kreislaufwirtschaft. In: Flamme, Sabine; Gellenbeck, Klaus; Rotter, Susanne; Kranert, Martin; Nelles, Michael; Quicker, Peter Georg, Hrsg. 15. Münsteraner Abfallwirtschaftstage (Münster). Münster , 2017 (Münsteraner Schriften zur Abfallwirtschaft: 17), S.109-117

[PRO]: Prognos; Univ. Köln, EWI; Gesellschaft für wirtschaftliche Strukturforchung, GWS, Hrsg. Entwicklung der Energiemärkte – Energiereferenzprognose : Endbericht Projekt Nr. 57/12, 2014 [Zugriff am: 25.01.2019] Verfügbar unter: https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Studien/entwicklung-der-energiemaerkte-energiereferenzprognose-endbericht.pdf?__blob=publicationFile&v=7

[RBE]: Bundesministerium für Bildung und Forschung, BMF, Hrsg. Ressourcenschonender Beton - Werkstoff der nächsten Generation : R-Beton [Zugriff am: 30.10.2018] Verfügbar unter: <https://www.r-beton.de/>

[RBEa]: RC-Gesteinskörnung - Anwendung im Zement, Ökobilanzierung der Zement- und Betonherstellung, Bewertung der Alkaliempfindlichkeit : Teilvorhaben 5 R-Beton, 2018 Verfügbar unter: <https://www.r-beton.de/teilverhaben/teilverhaben-5/>

[ROH]: Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH, Hrsg. Rohstoffversorgung und Ressourcenproduktivität in der deutschen Zementindustrie : Analyse des Status quo und Perspektiven. Wuppertal, 2015

[RUE]: Scur, Peter. Entwicklung, technische Erprobung und Optimierung der rückstandsfreien Zementherstellung als ganzheitlicher Prozess bei gleichzeitiger Verwertung verschiedener Reststoffe : Schlußbericht. 2001 (Förderkennzeichen 01 ZH 943 C/6) [Zugriff am: 17.07.2017] Verfügbar unter: <http://edok01.tib.uni-hannover.de/edoks/e01fb02/343933926.pdf>

[RUP]: Ruppert, Johannes; Treiber, Kevin. Flexibilitätspotentiale und -perspektiven der Roh- und Zementmahlung. In: Ausfelder, Florian; Roon, Serafin von; Seitz, Antje, Hrsg. Flexibilitätsoptionen in der Grundstoffindustrie: Methodik, Potenziale, Hemmnisse. Frankfurt a.M., 2018, S.133-170 Verfügbar unter: <https://www.vdz-online.de/forschung/aktuelle-projekte/synergie/>

[RUPa]: Ruppert, J.; Lorea, C. (2017): Cement CO₂ emission share. Task Force Low Carbon Economy, CEMBUREAU, Brussels, 11.9.2017

[SAP]: SAPEA, Hrsg. Novel carbon capture and utilisation technologies : Research and climate aspects. (SAPEA Evidence Review Report 2) [Zugriff am: 27.06.2018] Verfügbar unter: <https://www.sapea.info/wp-content/uploads/CCU-report-May2018-3.pdf>

[SCA]: Scheuer, A.. Utilization of alternative fuels and raw materials (AFRS) in the cement industry. In: Verein Deutscher Zementwerke, Hrsg. Process Technology of Cement Manufacturing : 5th International VDZ Congress 2002 (Düsseldorf 23.-27.09.2002). Düsseldorf, 2003, S.322-337

[SCH]: Schneider, Martin. The cement industry on the way to a low carbon future: Innovation and Technical Trends in Cement Production. In: VDZ, Hrsg. 8th International VDZ Congress 2018; Proceedings (Düsseldorf 26.-28.09.2018) Düsseldorf, 2018, S.55-72

[SCHb]: Schüler, Susanne; Algermissen, David; Markus, Hans P.; Mudersbach, Dirk; Drissen, Peter. Einfluss der Metallurgie auf die Umweltverträglichkeit von Elektroofenschlacke. In: Heußén, M.; Motz, H. Hrsg. Schlacken aus der Metallurgie 3. Neuruppin, 2014 Verfügbar unter: http://vivis.die-taktiker.de/phocadownload/2014_sam/2014_sam_107-126_Schueler_Algermissen.pdf

[SCR]: Scrivener, Karen L.; John, Vanderley M.; Gartner, Ellis M.. Eco-efficient cements : Potential, economically viable solutions for a low-CO₂, cement-based materials industry. Paris, 2016 [Zugriff am: 06.03.2017] Verfügbar unter: <http://www.nanocem.org/resources/unep-report>

[SEK]: Secklehner, Anton. Installation einer DeCONOX-Anlage im Zementwerk Kirchdorf. Loeben, 2016

[SEV]: Severins, Katrin; Müller, Christoph. Brechsand als Hauptbestandteil im Zement. Beton. 2017, 67(9), S.323-326 Verfügbar unter: <https://www.vdz-online.de/forschung/abgeschlossene-projekte/rc-gesteinskoernung/>

[SOL]: Solidia Technologies Wins \$3 Million from Emissions Reduction Alberta for Transforming CO₂ from Waste to Asset: Pressemitteilung, Calgary 03.03.2017 [Zugriff am: 25.01.2019]. Verfügbar unter: <http://solidiatech.com/wp-content/uploads/2017/03/ERA-CCEMC-Grand-Challenge-Round-2-FINAL-3.2.17-2.pdf>

[TGI]: Umweltbundesamt, UBA, Hrsg. Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2018 : Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990 - 2016, 2018 (Climate Change 12/2018)

[THI]: Thienel, K.-Ch.. Baustoffkreislauf Eisenhüttenschlacken und Hüttensand : Herbststrimester 2010, 2010 [Zugriff am: 25.01.2019] Verfügbar unter: <http://docplayer.org/25577661-Baustoffkreislauf-eisenhuettenschlacken-und-huettensand.html>

[TRE]: Trenkwalder, J.. Waste heat recovery for the drying of sewage sludge. Cement International. 2010, 8(4), S.48-53

[UBA]: Keßler, H.. Urban Mining – Ressourcenschonungspotenziale einer hochwertigen Nutzung des anthropogenen Lagers im Gebäudebestand. In: K. Wiemer, M. Kern, Hrsg. Bio- und Sekundär-rohstoffverwertung VI: stofflich – energetisch, Witzenhausen, 2011

[UBAa]: Umweltbundesamt, UBA, Hrsg. Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 - 2016, 2017 (Climate Change 15/2017). Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/entwicklung-der-spezifischen-kohlendioxid-4>

[UBT] Seiler, Cornelia; Bodendiek, Nils; Hoppe, Helmut; Hoenig, Volker. Einsatz alternativer Rohstoffe im Zementherstellungsprozess - Hintergrundwissen, technische Möglichkeiten und Handlungsempfehlungen : Technischer Bericht A-2015/0117-2, 2015 (Technischer Bericht A-2015/0117-2)

[UMW]: Institut Bauen und Umwelt; Verein Deutscher Zementwerke, VDZ, Hrsg. Umwelt-Produktdeklaration nach ISO 14025 und ISO 15804 : Zement ; EPD-VDZ-20170026-IAG1-DE; Ausstellungsdatum 01.03.2017 ; Gültig bis 28.02.2022. Königswinter: Institut Bauen und Umwelt, 2017

[VDZ08]: VDZ, Hrsg. Zement-Taschenbuch 2008. 51. Aufl. Düsseldorf, 2008

[VDZ13]: VDZ, Hrsg. Verminderung der CO₂-Emissionen: Monitoring-Abschlußbericht 1990-2012; Beitrag der deutschen Zementindustrie; 11. aktualisierte Erklärung zur Klimavorsorge. Düsseldorf, 2013. Verfügbar unter: <https://www.vdz-online.de/publikationen/co2-monitoring-berichte/>

[VDZ15]: VDZ, Hrsg. Tätigkeitsbericht / Activity Report 2012-2015. Düsseldorf, 2015 Verfügbar unter: <https://www.vdz-online.de/publikationen/taetigkeitsberichte/>

[VDZ16]: VDZ, Hrsg. Zahlen und Daten : 2016 ; Stand: August 2016 ;Zementindustrie in Deutschland. Düsseldorf, 2016 Verfügbar unter: <https://www.vdz-online.de/publikationen/zahlen-und-daten/>

[VDZ16a]: VDZ, Hrsg. Umweltdaten der deutschen Zementindustrie 2015 / Environmental data of the German cement industry 2015. Düsseldorf, 2016 Verfügbar unter: <https://www.vdz-online.de/publikationen/umweltdaten/>

[VDZ16b]: VDZ, Hrsg. Zementindustrie im Überblick : 2016/2017. Berlin, 2016

[VDZ17]: VDZ, Hrsg. Zahlen und Daten; Stand: August 2017;Zementindustrie in Deutschland. Düsseldorf, 2017 Verfügbar unter: <https://www.vdz-online.de/publikationen/zahlen-und-daten/>

[VDZ17a]: VDZ, Hrsg. Umweltdaten der deutschen Zementindustrie 2016 / Environmental data of the German cement industry 2016. Düsseldorf, 2017 Verfügbar unter: <https://www.vdz-online.de/publikationen/umweltdaten/>

[VDZ17b]: RC-Gesteinskörnung - Anwendung im Zement, Bewertung der Alkaliempfindlichkeit, Ökobilanzierung der Zement- und Betonherstellung [Zugriff am: 24.11.2018]. Verfügbar unter: <https://www.vdz-online.de/forschung/abgeschlossene-projekte/rc-gesteinskoernung/>

[VDZM]: Grüne Zemente für einen blauen Planeten - Was ist dran? Calera und Novacem werben mit neuen Technologien zur Herstellung „kohlendioxid-negativer“ Zemente. VDZ-Mitteilungen. 2010 (142), S.3

[VET]: Deutsche Emissionshandelsstelle , DEHSt, Hrsg. Treibhausgasemissionen 2016: Emissionshandelspflichtige stationäre Anlagen und Luftverkehr in Deutschland (VET-Bericht 2016). Berlin, 2017

[VGB]: VGB PowerTech, Hrsg. Statistik zur Vermarktung von Baustoffen aus Kohlekraftwerken (KNP) 2004-2014. Essen, 2015

[VÖZ]: Berger, Helmut; Hoenig, Volker. Energieeffizienz der österreichischen Zementindustrie. Wien, 2010

[WAT]: Watanabe, Tatsuya. FAKS - Fludised bed advanced cement kiln system. Global Cement and Lime Magazine. 2006, (08-09), S.11-16

[WIL]: Wilhelmsson, Bodil; Kollberg, Claes; Larsson, Johan; Eriksson, Jan; Eriksson, Magnus. CemZero: A feasibility study evaluating ways to reach sustainable cement production via the use of electricity, 2018

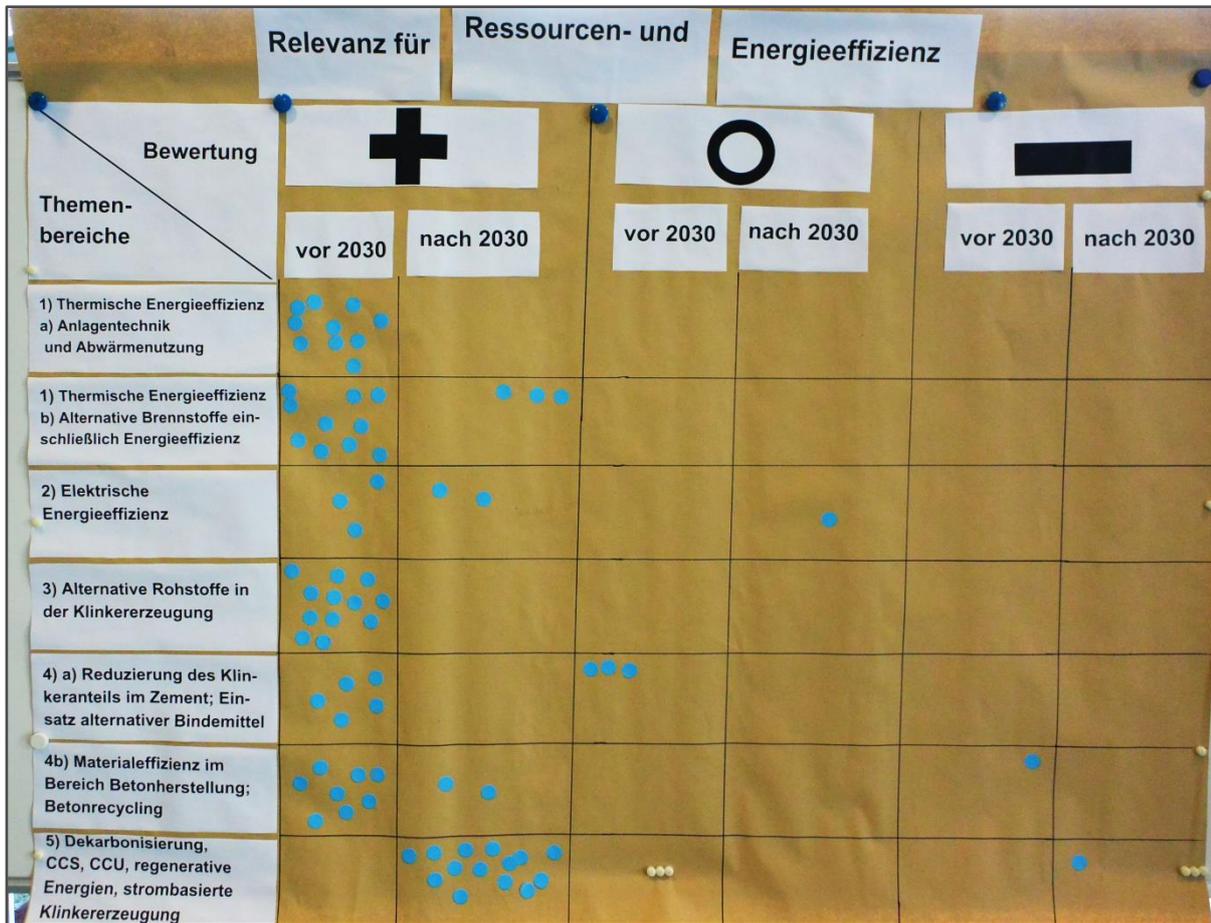
[WUP]: Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH, Hrsg. Rohstoffversorgung und Ressourcenproduktivität in der deutschen Zementindustrie : Analyse des Status quo und Perspektiven. Wuppertal, 2015. Verfügbar unter: <https://www.vdz-online.de/publikationen/nachhaltigkeit-zementindustrie/>

[YAO]: Yao, Z.T.; Ji, X.S.; Sarker, P.K.; Tanga, J.H.; Ge, L.Q.; Sia, M.S.; Xia, Y.Q.. A comprehensive review on the applications of coal fly ash. Earth-Science Reviews. 2015, 141, S.105-121

[ZKG13]: Wulfert, Holger; Keyssner, Michael; Ludwig, Horst-Michael; Adamczyk, Burkart. Metallgewinnung und Umwandlung von LD-Schlacke in hochreaktive Zementkomponenten. Zement-Kalk-Gips. 2013, 66(9), S.34-40

Anhang 1 – Relevanz für Ressourcen- und Energieeffizienz

Abbildung 33: Bewertungsmatrix aus dem Projektworkshop am 21.09.2017 im VDZ (Arbeitspaket 2)



Quelle: VDZ, eigene Darstellung

Anhang 2 – Fördermöglichkeiten

- ▶ Förderportal des Bundes, <http://foerderportal.bund.de/>: „Das Förderportal bietet einen Zugang zu ausgewählten Themen im Bereich der Projektförderung des Bundes. Sie finden hier z.B. Informationen zu Förderangeboten, Datenbanken mit aktuellen Forschungsvorhaben, Zugang zu Formularen und mehr.“ Insbesondere sei hier auf die beim BMWI angesiedelte Förderdatenbank (www.foerderdatenbank.de) aufmerksam gemacht, die auch über das Förderportal erreichbar ist.
- ▶ Förderberatung des Bundes, <https://www.foerderinfo.bund.de/>
- ▶ Wegweiser zur Forschungs- und Innovationsförderung: <https://www.foerderinfo.bund.de/de/profil-752.php>
- ▶ Umweltinnovationsprogramme, www.umweltinnovationsprogramm.de: Förderprogramm aus dem Geschäftsbereich des BMU, mit dem die großtechnische Umsetzung innovativer, umweltbezogener Projekte unterstützt werden soll. Das UBA übernimmt in diesem Förderprogramm die fachliche Bewertung der Anträge und die fachliche Begleitung der Projekte. Neben dem UBA sind das BMU und die KfW in den prozeduralen Ablauf eingebunden.
- ▶ Förderrichtlinie: http://www.umweltinnovationsprogramm.de/sites/default/files/benutzer/784/dokumente/2016_foerderrichtlinie_web.pdf.
- ▶ Übersicht über den Verfahrensablauf: http://www.umweltinnovationsprogramm.de/sites/default/files/benutzer/36/dokumente/ablaufschema_uip_2015.pdf
- ▶ Förderprogramme des BMWi zum Thema Energie- und Abwärmenutzung: <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Meldung/2017/20170901-bmwi-fuehrt-direkten-zuschuss-fuer-abwaerme-investitionen-ein.htm> und <http://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Artikel/Industrie/klimaschonende-produktionsprozesse.html>.
- ▶ Europäische Förderprogramme: <https://www.welcomeurope.com/list-european-funds.html> und https://ec.europa.eu/growth/industry/innovation/funding_en.

Anhang 3 – Modellergebnisse in Tabellen

Tabelle 5: VDZ-Modell2018 für ein Referenzzementwerk nach Szenario 1: Basis 2030

VDZ-Modell2018 Szenario 1: Basis 2030	2016	2030	Einheit	absolute Änderung 2030 - 2016	Balken von -100 bis +100	relative Änderung 2030 /2016	Balken von -50 % bis +50 %
Einsatzstoffe und Produkte							
Rohmaterial	1 346	1 294	kt	-52		-4 %	
- alternative Rohmaterialien	23	23	kt	-1		-4 %	
Zementklinker	816	784	kt	-32		-4 %	
Zementproduktion							
Klinker-Zement-Faktor	72,0	69,2	%	-3		-4 %	
weitere Zementbestandteile	317	349	kt	+32		+10 %	
- Hüttensand	210	232	kt	+22		+10 %	
- Flugasche	3	3	kt				
- Kalkstein	51	59	kt	+8		+16 %	
Brennstoffe, gesamt							
Primäre Brennstoffe	45	25	kt	-20		-43 %	
Alternative Brennstoffe	111	136	kt	+25		+23 %	
- Fluff	49	60	kt	+11		+23 %	
- Altreifen	7	8	kt	+2		+23 %	
- Klärschlamm	16	19	kt	+4		+23 %	
Energieeinsatz							
- thermisch	3 131	3 118	TJ	-13		-0 %	
- elektrisch	448	473	TJ	+25		+6 %	
CO₂-Mengen							
- prozessbedingt	441	424	kt CO ₂	-17		-4 %	
- brennstoffbedingt, fossil	222	209	kt CO ₂	-14		-6 %	
- brennstoffbedingt, biogen	55	67	kt CO ₂	+12		+22 %	
CO₂-Emissionen ohne biogenen Anteil							
- direkt	663	632	kt CO ₂	-31		-5 %	
- indirekt	64	51	kt CO ₂	-13		-21 %	
- direkt und indirekt	727	683	kt CO ₂	-44		-6 %	

Tabelle 6: VDZ-Modell2018 für ein Referenzzementwerk nach Szenario 2: Anlagenoptimierung

VDZ-Modell2018 Szenario 2: Anlagenoptimierung	2016	2030	Einheit	absolute Änderung 2030 - 2016	Balken von -100 bis +100	relative Änderung 2030 /2016	Balken von -50 % bis +50 %
Einsatzstoffe und Produkte							
Rohmaterial	1 346	1 294	kt	-52		-4 %	
- alternative Rohmaterialien	23	23	kt	-1		-4 %	
Zementklinker	816	784	kt	-32		-4 %	
Zementproduktion	1 133	1 133	kt				
Klinker-Zement-Faktor	72,0	69,2	%	-3		-4 %	
weitere Zementbestandteile	317	349	kt	+32		+10 %	
- Hüttensand	210	232	kt	+22		+10 %	
- Flugasche	3	3	kt				
- Kalkstein	51	59	kt	+8		+16 %	
Brennstoffe, gesamt	156	156	kt	-0		-0 %	
Primäre Brennstoffe	45	24	kt	-20		-46 %	
Alternative Brennstoffe	111	131	kt	+20		+18 %	
- Fluff	49	58	kt	+9		+18 %	
- Altreifen	7	8	kt	+1		+18 %	
- Klärschlamm	16	19	kt	+3		+18 %	
Energieeinsatz							
- thermisch	3 131	3 003	TJ	-128		-4 %	
- elektrisch	448	480	TJ	+32		+7 %	
CO₂-Mengen							
- prozessbedingt	441	424	kt CO ₂	-17		-4 %	
- brennstoffbedingt, fossil	222	201	kt CO ₂	-22		-10 %	
- brennstoffbedingt, biogen	55	64	kt CO ₂	+9		+17 %	
CO₂-Emissionen ohne biogenen Anteil							
- direkt	663	625	kt CO ₂	-39		-6 %	
- indirekt	64	52	kt CO ₂	-13		-20 %	
- direkt und indirekt	727	676	kt CO ₂	-51		-7 %	

Tabelle 7: VDZ-Modell2018 für ein Referenzzementwerk nach Szenario 3: HÜS ca. -25 %

VDZ-Modell2018 Szenario 3: HÜS ca. -25 %	2016	2030	Einheit	absolute Änderung 2030 - 2016	Balken von -100 bis +100	relative Änderung 2030 /2016	Balken von -50 % bis +50 %
Einsatzstoffe und Produkte							
Rohmaterial	1 346	1 365	kt	+19		+1 %	
- alternative Rohmaterialien	23	24	kt	+0		+1 %	
Zementklinker	816	827	kt	+11		+1 %	
Zementproduktion	1 133	1 133	kt				
Klinker-Zement-Faktor	72,0	73,0	%	+1		+1 %	
weitere Zementbestandteile	317	306	kt	-11		-4 %	
- Hüttensand	210	159	kt	-52		-25 %	
- Flugasche	3	0	kt	-3		-100 %	
- Kalkstein	51	92	kt	+42		+82 %	
Brennstoffe, gesamt	156	164	kt	+8		+5 %	
Primäre Brennstoffe	45	26	kt	-19		-43 %	
Alternative Brennstoffe	111	139	kt	+28		+25 %	
- Fluff	49	61	kt	+12		+25 %	
- Altreifen	7	9	kt	+2		+25 %	
- Klärschlamm	16	20	kt	+4		+25 %	
Energieeinsatz							
- thermisch	3 131	3 167	TJ	+36		+1 %	
- elektrisch	448	487	TJ	+39		+9 %	
CO₂-Mengen							
- prozessbedingt	441	447	kt CO ₂	+6		+1 %	
- brennstoffbedingt, fossil	222	212	kt CO ₂	-11		-5 %	
- brennstoffbedingt, biogen	55	68	kt CO ₂	+13		+24 %	
CO₂-Emissionen ohne biogenen Anteil							
- direkt	663	659	kt CO ₂	-4		-1 %	
- indirekt	64	52	kt CO ₂	-12		-19 %	
- direkt und indirekt	727	711	kt CO ₂	-16		-2 %	

Tabelle 8: VDZ-Modell2018 für ein Referenzzementwerk nach Szenario 4: BAT-Mahlung

VDZ-Modell2018 Szenario 4: BAT-Mahlung	2016	2030	Einheit	absolute Änderung 2030 - 2016	Balken von -100 bis +100	relative Änderung 2030 /2016	Balken von -50 % bis +50 %
Einsatzstoffe und Produkte							
Rohmaterial	1 346	1 294	kt	-52		-4 %	
- alternative Rohmaterialien	23	23	kt	-1		-4 %	
Zementklinker	816	784	kt	-32		-4 %	
Zementproduktion	1 133	1 133	kt				
Klinker-Zement-Faktor	72,0	69,2	%	-3		-4 %	
weitere Zementbestandteile	317	349	kt	+32		+10 %	
- Hüttensand	210	232	kt	+22		+10 %	
- Flugasche	3	3	kt				
- Kalkstein	51	59	kt	+8		+16 %	
Brennstoffe, gesamt	156	156	kt	-0		-0 %	
Primäre Brennstoffe	45	24	kt	-20		-46 %	
Alternative Brennstoffe	111	131	kt	+20		+18 %	
- Fluff	49	58	kt	+9		+18 %	
- Altreifen	7	8	kt	+1		+18 %	
- Klärschlamm	16	19	kt	+3		+18 %	
Energieeinsatz							
- thermisch	3 131	3 003	TJ	-128		-4 %	
- elektrisch	448	421	TJ	-27		-6 %	
CO₂-Mengen							
- prozessbedingt	441	424	kt CO ₂	-17		-4 %	
- brennstoffbedingt, fossil	222	201	kt CO ₂	-22		-10 %	
- brennstoffbedingt, biogen	55	64	kt CO ₂	+9		+17 %	
CO₂-Emissionen ohne biogenen Anteil							
- direkt	663	625	kt CO ₂	-39		-6 %	
- indirekt	64	45	kt CO ₂	-19		-30 %	
- direkt und indirekt	727	670	kt CO ₂	-57		-8 %	

Tabelle 9: VDZ-Modell2018 für ein Referenzementwerk nach Szenario 5: Oxyfuel 95 % CO₂-Abscheidung, Start ab 2030 bis 2050

VDZ-Modell2018 Szenario 5: Oxyfuel 95 % CO ₂ -Abscheidung, Start ab 2030 bis 2050	2016	2030 bis 2050	Einheit	absolute Änderung 2030 bis 2050 - 2016	Balken von -100 bis +100	relative Änderung 2030 bis 2050 /2016	Balken von -50 % bis +50 %
Einsatzstoffe und Produkte							
Rohmaterial	1 346	1 294	kt	-52		-4 %	
- alternative Rohmaterialien	23	23	kt	-1		-4 %	
Zementklinker	816	784	kt	-32		-4 %	
Zementproduktion	1 133	1 133	kt				
Klinker-Zement-Faktor	72,0	69,2	%	-3		-4 %	
weitere Zementbestandteile	317	349	kt	+32		+10 %	
- Hüttensand	210	232	kt	+22		+10 %	
- Flugasche	3	3	kt				
- Kalkstein	51	59	kt	+8		+16 %	
Brennstoffe, gesamt	156	156	kt	-0		-0 %	
Primäre Brennstoffe	45	24	kt	-20		-46 %	
Alternative Brennstoffe	111	131	kt	+20		+18 %	
- Fluff	49	58	kt	+9		+18 %	
- Altreifen	7	8	kt	+1		+18 %	
- Klärschlamm	16	19	kt	+3		+18 %	
Energieeinsatz							
- thermisch	3 131	3 003	TJ	-128		-4 %	
- elektrisch	448	989	TJ	+541		+121 %	
CO₂-Mengen							
- prozessbedingt	441	424	kt CO ₂	-17		-4 %	
- brennstoffbedingt, fossil	222	201	kt CO ₂	-22		-10 %	
- brennstoffbedingt, biogen	55	64	kt CO ₂	+9		+17 %	
CO₂-Emissionen ohne biogenen Anteil							
- direkt	663	-30	kt CO ₂	-693		-105 %	
- indirekt	64	106	kt CO ₂	+42		+66 %	
- direkt und indirekt	727	76	kt CO ₂	-651		-90 %	

Anhang 4 – Modellergebnisse als spezifische Werte in Tabellen

Tabelle 10: VDZ-Modell2018 für ein Referenzzementwerk nach Szenario 1: Basis 2030 – spezifische Werte bezogen auf Zement

VDZ-Modell2018 Szenario 1: Basis 2030	2016	2030	Einheit	absolute Änderung 2030 - 2016	Balken von -100 bis +100	relative Änderung 2030 /2016	Balken von -50% bis +50%
spezifischer Energieeinsatz							
- thermisch	2 763	2 751	MJ/t Zement	-12		-0%	
- elektrisch	395	417	MJ/t Zement	+22		+6%	
- elektrisch	110	116	kWh/t Zement	+6		+6%	
spezifische CO₂-Mengen							
- prozessbedingt	389	374	kg CO ₂ /t Zement	-15		-4%	
- brennstoffbedingt, fossil	196	184	kg CO ₂ /t Zement	-12		-6%	
- brennstoffbedingt, biogen	48	59	kg CO ₂ /t Zement	+11		+22%	
spezifische CO₂-Emissionen							
- direkt	585	558	kg CO ₂ /t Zement	-27		-5%	
- indirekt	57	45	kg CO ₂ /t Zement	-12		-21%	
- direkt und indirekt	642	603	kg CO ₂ /t Zement	-39		-6%	

Tabelle 11: VDZ-Modell2018 für ein Referenzzementwerk nach Szenario 2: Anlagenoptimierung – spezifische Werte bezogen auf Zement

VDZ-Modell2018 Szenario 2: Anlagen-opti- mierung	2016	2030	Einheit	absolute Änderung 2030 - 2016	Balken von -100 bis +100	relative Änderung 2030 /2016	Balken von -50% bis +50%
spezifischer Energieeinsatz							
- thermisch	2 763	2 650	MJ/t Zement	-113		-4%	
- elektrisch	395	424	MJ/t Zement	+28		+7%	
- elektrisch	110	118	kWh/t Zement	+8		+7%	
spezifische CO₂-Mengen							
- prozessbedingt	389	374	kg CO ₂ /t Zement	-15		-4%	
- brennstoffbedingt, fossil	196	177	kg CO ₂ /t Zement	-19		-10%	
- brennstoffbedingt, biogen	48	57	kg CO ₂ /t Zement	+8		+17%	
spezifische CO₂-Emissionen							
- direkt	585	551	kg CO ₂ /t Zement	-34		-6%	
- indirekt	57	46	kg CO ₂ /t Zement	-11		-20%	
- direkt und indirekt	642	597	kg CO ₂ /t Zement	-45		-7%	

Tabelle 12: VDZ-Modell2018 für ein Referenzzementwerk nach Szenario 3: HÜS ca. -25 % – spezifische Werte bezogen auf Zement

VDZ-Modell2018 Szenario 3: HÜS ca. -25 %	2016	2030	Einheit	absolute Änderung 2030 - 2016	Balken von -100 bis +100	relative Änderung 2030 /2016	Balken von -50% bis +50%
spezifischer Energieeinsatz							
- thermisch	2 763	2 794	MJ/t Zement	+31	+31	+1%	
- elektrisch	395	429	MJ/t Zement	+34	+34	+9%	
- elektrisch	110	119	kWh/t Zement	+9	+9	+9%	
spezifische CO₂-Mengen							
- prozessbedingt	389	394	kg CO ₂ /t Zement	+5	+5	+1%	
- brennstoffbedingt, fossil	196	187	kg CO ₂ /t Zement	-9	-9	-5%	
- brennstoffbedingt, biogen	48	60	kg CO ₂ /t Zement	+11	+11	+24%	
spezifische CO₂-Emissionen							
- direkt	585	581	kg CO ₂ /t Zement	-4	-4	-1%	
- indirekt	57	46	kg CO ₂ /t Zement	-10	-10	-19%	
- direkt und indirekt	642	627	kg CO ₂ /t Zement	-14	-14	-2%	

Tabelle 13: VDZ-Modell2018 für ein Referenzzementwerk nach Szenario 4: BAT-Mahlung – spezifische Werte bezogen auf Zement

VDZ-Modell2018 Szenario 4: BAT-Mahlung	2016	2030	Einheit	absolute Änderung 2030 - 2016	Balken von -100 bis +100	relative Änderung 2030 /2016	Balken von -50% bis +50%
spezifischer Energieeinsatz							
- thermisch	2 763	2 650	MJ/t Zement	-113		-4%	
- elektrisch	395	372	MJ/t Zement	-24		-6%	
- elektrisch	110	103	kWh/t Zement	-7		-6%	
spezifische CO₂-Mengen							
- prozessbedingt	389	374	kg CO ₂ /t Zement	-15		-4%	
- brennstoffbedingt, fossil	196	177	kg CO ₂ /t Zement	-19		-10%	
- brennstoffbedingt, biogen	48	57	kg CO ₂ /t Zement	+8		+17%	
spezifische CO₂-Emissionen							
- direkt	585	551	kg CO ₂ /t Zement	-34		-6%	
- indirekt	57	40	kg CO ₂ /t Zement	-17		-30%	
- direkt und indirekt	642	591	kg CO ₂ /t Zement	-51		-8%	

Tabelle 14: VDZ-Modell2018 für ein Referenzzementwerk nach Szenario 5: Oxyfuel 95 % CO₂-Abscheidung, Start ab 2030 bis 2050 – spezifische Werte bezogen auf Zement

VDZ-Modell2018 Szenario 5: Oxyfuel 95 % CO ₂ -Abscheidung, Start ab 2030 bis 2050	2016	2030 bis 2050	Einheit	absolute Änderung 2030 bis 2050 - 2016	Balken von -100 bis +100	relative Änderung 2030 bis 2050 /2016	Balken von -50% bis +50%
spezifischer Energieeinsatz							
- thermisch	2 763	2 650	MJ/t Zement	-113		-4%	
- elektrisch	395	872	MJ/t Zement	+477		+121%	
- elektrisch	110	242	kWh/t Zement	+133		+121%	
spezifische CO₂-Mengen							
- prozessbedingt	389	374	kg CO ₂ /t Zement	-15		-4%	
- brennstoffbedingt, fossil	196	177	kg CO ₂ /t Zement	-19		-10%	
- brennstoffbedingt, biogen	48	57	kg CO ₂ /t Zement	+8		+17%	
spezifische CO₂-Emissio- nen							
- direkt	585	-26	kg CO ₂ /t Zement	-612		-105%	
- indirekt	57	94	kg CO ₂ /t Zement	+37		+66%	
- direkt und indirekt	642	67	kg CO ₂ /t Zement	-574		-90%	

Tabelle 15: VDZ-Modell2018 Brennstoffparameter für Szenarien 1 bis 5

Brennstoff	unterer Heizwert, Hu in MJ/kg	CO ₂ -Emis- sionsfaktor, EF in kg CO ₂ /MJ	biogener Kohlen- stoffanteil, bio- gen C/TC
Alternative Brennstoffe gesamt	18,3	0,086	31 %
Fluff, aufbereitete Fraktionen aus Industrie-, Gewerbe- und Sied- lungsabfällen	20,1	0,087	30 %
Altreifen	28,2	0,088	27 %
Klärschlamm , mechanisch entwässerter und getrockneter Klärschlamm	2,6	0,135	81 %
Sonstige alternative Brennstoffe	21,6	0,083	30 %
Primäre fossile Brennstoffe gesamt	24,5	0,096	0 %
Braunkohle	22,1	0,098	0 %
Steinkohle	26,9	0,095	0 %
Sonstige fossile Brennstoffe	35,0	0,089	0 %