

# Energiewende in der Industrie

Potenziale und Wechselwirkungen mit dem Energiesektor

## Branchensteckbrief der Zement- und Kalkindustrie

**Bericht an:**

**Bundesministerium für Wirtschaft und Energie**

**von:**

Tobias Hübner, FfE  
Andrej Guminski, FfE  
Serafin von Roon, FfE  
Elsa Rouyre, FfE

**in Zusammenarbeit mit:**

Navigant Energy Germany GmbH  
Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung  
BBG und Partner

Vorhaben: I C 4 – 80 14 38/42; Projekt-Nr. 42/17  
Projektnummer: SISDE17915  
27.08.2019

*Aus Gründen der besseren Lesbarkeit wird auf die gleichzeitige Verwendung männlicher und weiblicher Sprachformen verzichtet. Sämtliche Personenbezeichnungen gelten gleichermaßen für beiderlei Geschlecht.*

## INHALTSVERZEICHNIS

<b>1. Zement- und Kalkindustrie .....</b>	<b>1</b>
1.1 Übersicht über die Zement- und Kalkindustrie .....	1
1.2 Produktionsprozesse in der Zement- und Kalkindustrie .....	6
1.2.1 Klinker- und Zementproduktion .....	7
1.2.2 Kalkherstellung .....	10
1.3 Chancen und Herausforderungen durch die Energiewende.....	12
<b>2. Literaturverzeichnis .....</b>	<b>14</b>

## ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

AbLaV	Abschaltbare Lastenverordnung
BAT	Best Available Techniques
BWS	Bruttowertschöpfung
CAGR	Jährliche Wachstumsrate (engl. compound annual growth rate)
CaO	Kalciumoxid
CaCO <sub>3</sub>	KalciumCarbonats
CCS	Carbon Capture and Storage
CCU	Carbon Capture and Utilisation
CO <sub>2</sub>	Kohlenstoffdioxid
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetzes
EU	Europäische Union
EU-ETS	EU-Emissionshandelssystem
GJ	Gigajoule
GGR	Gegenstrom-Regenerativ-Öfen
kWh	Kilowattstunde
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
NACE	System zur Klassifizierung von Wirtschaftszweigen (frz. Nomenclature statistique des activités économiques dans la Communauté européenne)
ORC	Organic-Rankine-Cycle
TWh	Terawattstunde

## 1. ZEMENT- UND KALKINDUSTRIE

Die Zement- und Kalkindustrie werden nach NACE Klassifikation dem übergeordneten Wirtschaftszweig der Herstellung von Glas und Glaswaren, Keramik, Verarbeitung von Steinen und Erden zugeordnet.

Der Zementindustrie in Deutschland werden 22 Unternehmen zugeordnet, die an 53 Standorten produzieren.<sup>1</sup> Zement ist ein anorganisches, fein gemahltes, hydraulisch wirkendes Bindemittel zur Herstellung von Mörtel und Beton.<sup>2</sup> Für die Produktion von Zement ist das Zwischenprodukt Klinker erforderlich. Klinker wiederum ist ein durch Brennen und Mahlen hergestellter hydraulischer Stoff aus Kalkstein und Ton.<sup>3</sup> In Deutschland wird an 34 der 53 Produktionsstandorte zugleich Klinker und Zement produziert (integrierte Werke). Bei 19 der 53 Werke handelt es sich um Zementwerke ohne eigene Klinkerproduktion.<sup>4</sup>

Kalk (Kalziumoxid) entsteht durch das Brennen von Kalkstein (Kalziumkarbonat). Dieses auch als Branntkalk bezeichnete Produkt kann stückig oder gemahlen als ungelöschter Kalk oder durch Behandlung mit Wasser als gelöschter Kalk (Kalkhydrat) genutzt werden.<sup>5</sup> Kalk wird überwiegend in der Stahlindustrie (35 Prozent), in der Bauwirtschaft (21 Prozent) und zum Umweltschutz (20 Prozent) eingesetzt.<sup>6</sup> Kalk wird in Deutschland an 42 Standorten von 22 Unternehmen hergestellt.<sup>7</sup>

Tabelle 1-1. Daten der Zement- und Kalkindustrie für 2015

	Zement (2017)	Kalk (2016)
Produktionsstandorte	53	42
Beschäftigte	8.037	3.556
Bruttowertschöpfung (BWS)	1,05 Mrd. € (2016)	0,2 Mrd. € (2016)
CAGR BWS	-0,9 % (2008-2016)	8,6 % (2008-2016)
Jährliche Produktionsmengen	Tabelle 1-2	Tabelle 1-2
Gesamtenergieverbrauch in TWh	30,7	8,0
Stromverbrauch in TWh	3,8	0,7
Thermischer Energieverbrauch in TWh	26,9 <sup>1</sup>	7,3
Erdgasverbrauch in TWh	0,1	1,0
Kohleverbrauch in TWh	8,9 <sup>1</sup>	5,9
Erdöl (Heizöl) in TWh	0,3	0,4
Gesamtemissionen in Mio. t CO <sub>2</sub> e <sup>1</sup>	20,5	7,2 (2017)
Anteil der Emissionen im EU-ETS	100 %	98 % (Kalk)
Eigenproduktions- & KWK-Anteil	k.A. 0 %	0 % k.A. <sup>1</sup>



### 1.1 Übersicht über die Zement- und Kalkindustrie

**Branche.** Die Zementindustrie in Deutschland erwirtschaftete im Jahr 2017 einen Umsatz von gut 2,7 Mrd. Euro.<sup>8</sup> Hierzu wurden etwa 24,8 Mio. t Klinker und 34 Mio. t Zement produziert.<sup>9</sup> Ca. 80 Prozent der heimischen Zementproduktion wurde im Inland verbraucht. Trotz des im europäischen Vergleich niedrigen Eigenverbrauchs, besitzt Deutschland damit den derzeit größten Markt für Zement in der Europäischen Union (EU). Mit einem Anteil von etwa 19 Prozent an der europäischen Zementproduktion liefert Deutschland wichtige Baumaterialien für die Entwicklung Europas.<sup>10</sup> Der

<sup>1</sup> Verein Deutscher Zementwerke e.V. (2018).

<sup>2</sup> Bosold/Pickhardt/Betonmarketing West GmbH (2014).

<sup>3</sup> Bosold/Pickhardt/Betonmarketing West GmbH (2014).

<sup>4</sup> Buttermann/Baten (2013).

<sup>5</sup> Szednyj/et al. (2007).

<sup>6</sup> Brunke (2016); BVK (2018c).

<sup>7</sup> BVK (2018d); BVK (2018a).

<sup>8</sup> Verein Deutscher Zementwerke e.V. (2018).

<sup>9</sup> Verein Deutscher Zementwerke e.V. (2018).

<sup>10</sup> Verein Deutscher Zementwerke e.V. (2018).

Versand deutschen Zements in Länder außerhalb Europas nach Asien, Amerika und Afrika liegt hingegen unter einem Prozent gemessen an der Zementproduktion.<sup>11</sup> Gleichwohl wird Zement aus anderen europäischen Ländern per Schiff auch in Länder außerhalb der EU exportiert.

2017 lag der Umsatz der Kalkindustrie (gebrannte und ungebrannte Produkte (Kalkstein, Kalksteinmehle)) bei ca. 0,7 Mrd. Euro<sup>12</sup>. Branntkalk (ungelöschter und gelöschter Kalk) bildet allein ca. zwei Drittel des Umsatzes<sup>13</sup>. Gemessen an der Produktionsmenge stellt ungelöschter Kalk das bedeutendste Branntkalkprodukt der Kalkindustrie dar. Insgesamt wurden im Jahr 2017 etwa 6,3 Mio. t. abgesetzt und dadurch ein Umsatz von etwa 480 Mio. Euro generiert. Ein Großteil des Umsatzes wird inländisch erreicht.<sup>14</sup> Deutschland ist mit Abstand der größte Kalkproduzent in der EU.<sup>15</sup> Insgesamt beschäftigte die Kalkindustrie 2017 ca. 3.000 Arbeitskräfte.<sup>16</sup>

**Energiebilanz.** In der Zementindustrie wird überwiegend thermische Energie eingesetzt. Der Anteil am Gesamtenergieverbrauch beträgt etwa 88 Prozent. Thermische Energie ist vor allem für die Befuerung des Drehrohrofens zur Produktion des Zwischenprodukts Klinker und zur Trocknung des Rohmaterials in der Rohmühle erforderlich (Integrierte Zementwerke). Hierbei werden mit einem Anteil von etwa 65 Prozent am thermischen Energieverbrauch überwiegend alternative Brennstoffe wie Altreifen, Altöl, Tiermehl und Kunststoffabfälle eingesetzt.<sup>17</sup> Erdgas und Erdöl werden hingegen kaum eingesetzt. Zweitgrößter Energieträger zur Erzeugung von thermischer Energie stellt hingegen Kohle dar, wobei Braun- und Steinkohle sowie Petrolkoks verwendet wird.<sup>18</sup> Der Strombedarf ist in integrierten Zementwerken bei der Zementherstellung im Vergleich zum thermischen Energiebedarf vergleichsweise gering. Dennoch werden für die Herstellung einer Tonne Zement im Durchschnitt rund 110 kWh eingesetzt.<sup>19</sup> In Zementwerken ohne Klinkerproduktion überwiegt hingegen der elektrische Energieverbrauch, da für die Mahlprozesse kaum thermische Energie erforderlich ist.

Die Eigenerzeugung von Strom spielt in der Zementindustrie eine untergeordnete Rolle. Demgemäß wird diese in den einschlägigen Studien kaum berücksichtigt. Die Abwärmenutzung zur prozessintegrierten Trocknung von Rohmaterialien spielt in integrierten Werken eine wichtige Rolle. Aufgrund des niedrigen Temperaturniveaus der verbleibenden Restwärme wird diese nur in geringem Umfang zur Stromproduktion (Wasserdampf- oder ORC-Anlagen) oder zur Einspeisung in Wärmenetze genutzt.<sup>20</sup> Aufgrund der prozessbedingt hohen Temperaturen und der direkten thermischen Nutzung im Drehrohrofen werden keine KWK-Anlagen zur Eigenproduktion von Strom und Wärme benötigt.

Der Energieverbrauch in der Kalkindustrie ist zum Großteil auf das Kalkbrennen zurückzuführen.<sup>21</sup> Hierbei wird überwiegend Kohle eingesetzt. 75 Prozent des gesamten Energieverbrauchs der Kalkindustrie sind auf Braunkohle (59 Prozent) bzw. Steinkohle, Anthrazit und Koks (16 Prozent) zurückzuführen. Ein Großteil hiervon wird nicht nur energetisch, sondern auch stofflich in den Öfen genutzt.<sup>22</sup> Der elektrische Energieeinsatz spielt in der Kalkindustrie eine untergeordnete Rolle und weist dementsprechend lediglich 8 Prozent des gesamten Energieverbrauchs auf.<sup>23</sup> Um den Kohleverbrauch und die demgemäß hohen brennstoffbedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen in der Kalkindustrie zu mindern, werden bei neuinstallierten Brennanlagen meist Gegenstrom-Regenerativ-Öfen (GGR-

<sup>11</sup> Verein Deutscher Zementwerke e.V. (2018).

<sup>12</sup> Ungelöschter und gelöschter Kalk sowie Kalkhydrat.

<sup>13</sup> Umsatz für die Kalkbranche wurde ohne Lieferungen an andere Mitgliedswerke und ohne Kalkeinsatz für Zementproduktion im eigenen Unternehmen berechnet.

<sup>14</sup> BVK (2018d).

<sup>15</sup> USGS (2018).

<sup>16</sup> BVK (2018d).

<sup>17</sup> Mohr (2017).

<sup>18</sup> Verein Deutscher Zementwerke e.V. (2016).

<sup>19</sup> Verein Deutscher Zementwerke e.V. (2016).

<sup>20</sup> Löckener (2013).

<sup>21</sup> Fleiter (2013).

<sup>22</sup> Destatis (2016).

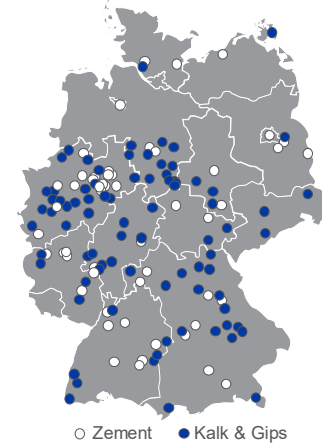
<sup>23</sup> Destatis (2016).

Öfen) eingesetzt, die Erdgas statt Kohle verwenden. Dementsprechend ist eine Erhöhung des Erdgasanteils, der aktuell bei etwa 15 Prozent liegt, zu erwarten.<sup>24</sup>

**Zuordnung zur amtlichen Statistik.** In der amtlichen Statistik ist die Herstellung von Zement durch den NACE Code 23.51 gekennzeichnet und bildet eine Unterkategorie der Herstellung von Glas und Glaswaren, Keramik, Verarbeitung von Steinen und Erden (23) und der Herstellung von Zement, Kalk und gebranntem Gips (23.5).

Die Kalkproduktion ist dem NACE Code 23.52 Herstellung von Kalk und gebranntem Gips angegliedert. Unter diesem Code fallen die Produktion von Luftkalk, hydraulischem Kalk, gebrannter Gips und Dolomitmalk.

**Geographische Aufteilung.**<sup>25</sup> Die Zementindustrie ist entsprechend der für die Produktion notwendigen Kalksteinvorkommen in Deutschland verteilt. Die meisten Werke finden sich in Nordrhein-Westfalen, Baden-Württemberg und Bayern.<sup>26</sup>



**Abbildung 1-1.**  
Ausgewählte Standorte  
für die Herstellung von  
Zement und Kalk<sup>25</sup>

Produktionsstätten für Kalk sind hauptsächlich in Nordrhein-Westfalen, im Harz sowie Bayern zu finden. Um die Transportstrecken des Rohmaterials gering zu halten, befindet sich die Kalkproduktion meist in der Nähe von Kalksteinvorkommen.<sup>27</sup>

**Branchenstruktur.** In Deutschland werden nach der DIN EN 197-1 fünf Hauptzemente unterschieden, die in 27 Zementarten münden. Diese werden in die Klassen CEM I-V unterteilt.<sup>28</sup> Als besonders bedeutend sind die Zementarten CEM I-III hervorzuheben. Zusammengenommen wiesen diese im Jahr 2017 einen Marktanteil von etwa 99 Prozent am Zementinlandsversand auf.<sup>29</sup> Wegen der folglich geringen Bedeutung der Zementarten CEM IV-V, werden nachstehend nur die Zementarten CEM I-III näher beschrieben. Diese Zementarten unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Hauptbestandteile. CEM I Zemente werden aus nur einem Hauptbestandteil (Zementklinker) und einem Sulfatträger hergestellt und allgemein auch als Portlandzemente bezeichnet.<sup>30</sup> Portlandkompositzemente (CEM II) sowie Hochofenzemente (CEM III) hingegen beinhalten weitere Hauptbestandteile wie Hüttensand oder Flugasche.<sup>31</sup> Am Markt werden verstärkt Zemente mit mehreren Hauptbestandteilen nachgefragt.<sup>32</sup> Demgemäß weisen Portlandkompositzemente (CEM II) mit 47 Prozent den höchsten Marktanteil aller Zementarten auf.<sup>33</sup>

Bis 2015 konnten die deutschen Zementstandorte hinsichtlich des jeweiligen Inlandsversands unterschieden werden. Hierbei wird deutlich, dass insbesondere Zementwerke mit einem Inlandsversand zwischen 0,5 und 1 Mio. t am Markt aktiv sind. Nur wenige Werke in Deutschland produzieren mehr als 1 Mio. t Zement pro Jahr.<sup>34</sup> Abschließend ist festzuhalten, dass vor allem mittelständische und große Unternehmen in der Zementindustrie zu finden sind.<sup>35</sup>

<sup>24</sup> Anonym (2017).

<sup>25</sup> Verein Deutscher Zementwerke e.V. (2016); BVK (2018e); Bundesverband der Gipsindustrie e.V. (2018).

<sup>26</sup> Mohr (2017); Hübner (2017).

<sup>27</sup> BVK (2018e).

<sup>28</sup> Bosold/Pickhardt/Betonmarketing West GmbH (2014); Verein Deutscher Zementwerke e.V. (2008).

<sup>29</sup> Verein Deutscher Zementwerke e.V. (2016).

<sup>30</sup> Bosold/Pickhardt/Betonmarketing West GmbH (2014); Schneider (2012).

<sup>31</sup> HeidelbergCement AG (2015); Schneider (2012).

<sup>32</sup> Schneider (2012); VaZ (2013).

<sup>33</sup> Verein Deutscher Zementwerke e.V. (2016).

<sup>34</sup> Verein Deutscher Zementwerke e.V. (2016).

<sup>35</sup> Scheven/Hartkopf/Prelle (2012).

In der Kalkindustrie ist eine Konzentration der Bruttowertschöpfung auf wenige Unternehmen zu beobachten. Dies wird in (Brunke, 2016) anhand einer Auswertung aus dem Jahr 2014 deutlich: Etwa 14 Prozent der Unternehmen besitzen 66 Prozent der identifizierten Brennöfen, während 71 Prozent der Unternehmen lediglich 20 Prozent der identifizierten Brennöfen ihr Eigentum nennen. Das größte Kalkwerk in Deutschland ist zugleich das größte Kalkwerk in Europa und produziert allein etwa 1,8 Mio. t gebrannten Kalk pro Jahr.

Deutlich wird, dass in den aufwendigen Brennprozessen besonders kapitalintensiver Branchen wie der Herstellung von Zement und Kalk größere Mittelständler und Großunternehmen deutlich stärker vertreten sind als etwa in den Bereichen der reinen Rohstoffgewinnung.

**Wertschöpfungskette.** In der Zementindustrie existieren integrierte Zementwerke, welche die Produktionskette vom Steinbruch bis zum Zementversand abdecken, wohingegen die Standorte ohne Klinkerproduktion den erforderlichen Klinker von anderen Standorten beziehen.<sup>36</sup> Die Zementindustrie deckt dabei den Produktionsprozess bis hin zum fertigen Zement sowie der Lieferung an Transportbeton-, Beton-, Bauteil- (konstruktive Fertigteile und Betonwaren), Putz-, Mörtel- und Estrichhersteller sowie den Handel ab.

Kalk ist meist ein Zwischenprodukt und wird zur Immobilisierung von Schadstoffen, zur Verschlackung von unerwünschten Roheisenbestandteilen, zur Festigkeitsbildung in Baustoffen und viele weitere Anwendungen eingesetzt. Dabei sind die hergestellten Produkte keinesfalls homogen, die durch die Auswahl des Rohkalksteines, das Brennverfahren, die Art der eingesetzten Brennstoffe, die Ofenführung, die Aufbereitung, sowie gegebenenfalls die Weiterbehandlung zu Kalkhydrat nach Abnehmerbranchen zugeschnitten und für die speziellen Kundenanforderungen angepasst sind.<sup>37</sup> Die einzelnen Prozessschritte unterscheiden sich hierbei jedoch kaum.



Abbildung 1-2. Vereinfachte Wertschöpfungskette der Zement- und Kalkindustrie

**Flexibilität.** In der Zementindustrie sind vor allem Anlagen zum Mahlen von Rohmaterial und Zement für die Flexibilisierung der elektrischen Energieversorgung bedeutend.<sup>38</sup> Die Roh- und Zementmühlen sind für etwa 65 Prozent des elektrischen Energieverbrauchs in einem Zementwerk verantwortlich.<sup>39</sup> Die flexible Betriebsweise hängt maßgeblich von der Produktionskapazität, der saisonalen Nutzung der Produktionskapazität, der Produktnachfrage sowie der Produktspeicherkapazität in Silos ab. In der Vergangenheit wurden Zementmühlen meist so ausgelegt, dass sie nur in Zeiten niedriger Strompreise, meist nachts, betrieben werden konnten (Nutzung von Preis-Spreads und Off-Peak-Tarifen). Zwar ist die Nutzung von Nachtstrom heute nicht mehr relevant, allerdings ergeben sich so ggf. andere Möglichkeiten für einen flexiblen Betrieb. Dies gibt heute ggf. weitere Möglichkeiten, einen flexibleren Betrieb umzusetzen. Dies wird aktuell in einem umfangreichen Forschungsvorhaben in Deutschland untersucht.<sup>40</sup> Andere große Energieverbraucher wie der Drehrohrofen sind nicht für die Lastflexibilisierung relevant, da es sich um einen kontinuierlichen, überwiegend mit fossilen Brennstoffen befeuerten thermischen Prozessschritt mit sehr hoher Auslastung handelt.<sup>41</sup> Aufgrund der Charakteristik des Produktionsprozesses ist es vielen Zementwerken in begrenztem Umfang

<sup>36</sup> Scheven/Hartkopf/Prelle (2012); Harder (2005).

<sup>37</sup> Wolter (2007).

<sup>38</sup> Scheven/Hartkopf/Prelle (2012).

<sup>39</sup> Buttermann/Baten (2013); Löckener (2013); Schneider (2015); Verein Deutscher Zementwerke e.V. (2016); Orioli (2016).

<sup>40</sup> Bundesministerium für Bildung und Forschung (2016).

<sup>41</sup> VdZ (2013); Scheven/Hartkopf/Prelle (2012); Bringezu u. a. (2015).



möglich, die Lastabnahme in Hochlastzeiten zu reduzieren (atypische Netznutzung). Allerdings hängt die Möglichkeit der Lastabsenkung von den jeweiligen Gegebenheiten im Werk und der Konjunktur ab.

In der Kalkindustrie wird im Vergleich zur Zementindustrie weniger Strom eingesetzt, deshalb sind große Flexibilitätspotenziale für die elektrische Energieinfrastruktur nicht zu erwarten.<sup>42</sup>

**Kreislaufwirtschaft.** Das Bindemittel Zement wird überwiegend für die Betonherstellung benötigt, bildet jedoch auch die Grundlage für die Verwendung in Putzen, Mörteln und Estrich sowie für Produkte der Bauchemie.<sup>43</sup>

Ein Recycling von Zement ist grundsätzlich nicht möglich, da der erhärtete Zementstein seine hydraulischen Eigenschaften weitgehend verloren hat. Dagegen können aber Beton und andere mineralische Baumaterialien wiederverwertet werden. Die Verwertungsmöglichkeiten sind umso besser, je sortenreiner die einzelnen Fraktionen selektiv rückgewonnen bzw. getrennt werden können. Sortenreiner Betonbruch kann so als recycelte Gesteinskörnung wieder bei der Betonherstellung eingesetzt werden. Der Großteil der mineralischen Bauabfälle fällt jedoch als gemischte Fraktion an und wird auch als Gemisch verwertet. Von den knapp 82 Mio. Tonnen körniger mineralischer Bauabfälle, die durchschnittlich im Jahr anfallen, werden über 92 Prozent wiederverwertet – dadurch werden primäre Ressourcen wie Kies, Sand und Naturstein, die andernfalls im Straßen-, Wege-, Deponie- oder Erdbau benötigt würden, geschont.<sup>44</sup>

Um die Wiederverwertung weiter zu steigern, arbeiten u. a. Forscher vom Fraunhofer-Institut für Bauphysik an einem neuen Recycling-Verfahren, bei dem sortenrein vorliegender Altbeton in seine Bestandteile Zementstein und Zuschlagstoffe aufgespalten werden kann. Diese Methodik, bei der elektrische Impulse zur Bestimmung des geringsten Widerstands im Beton eingesetzt werden, befindet sich jedoch noch in der Forschungsphase.<sup>45</sup>

Eine direkte Wiederverwertung von Kalk ist meist unmöglich, da Kalk nur ein Zwischenprodukt ist, welcher mit anderen Produkten verwendet/umgewandelt wird. Im Hochofen wird Kalkstein beispielsweise zur Bindung mineralischer Verunreinigungen des Eisenerzes eingesetzt. Als Baustoff kann Kalk aber auch direkt als Mörtel zum Verputzen, als Kalksandstein im Bau eingesetzt werden, oder er wird dem Beton zugemischt, um die Festigkeit zu erhöhen.<sup>46</sup> Es ist deshalb vor allem die Wiederverwertung der aus Kalk entstehenden Produkte zu prüfen.

<sup>42</sup> Destatis (2016).

<sup>43</sup> VdZ (2013).

<sup>44</sup> Kreislaufwirtschaft Bau (2017); Baustoff Recycling Bayern e.V. (2018).

<sup>45</sup> Krauß/Werner (2016).

<sup>46</sup> Brunke (2016).



## 1.2 Produktionsprozesse in der Zement- und Kalkindustrie

In Tabelle 1-2 sind die im Steckbrief untersuchten Produktionsprozesse zusammengefasst. Diese werden nachfolgend detaillierter untersucht.

**Tabelle 1-2. Übersicht der wichtigsten Zwischen- und Endprodukte in der Zement-, Kalk-, und Gipsindustrie für das Jahr 2015, wenn nicht anders vermerkt<sup>47</sup>**

Produkt	Produktionsmenge Deutschland in Mio. t.	Emissionen in Mio. t CO <sub>2</sub>	Energieverbrauch in TWh/a	Beinhaltete Prozessschritte
<b>Klinker (2017)</b>	24,8	20,5	30,7	Rohmaterial gewinnen, Material brechen und transportieren, Material homogenisieren, Zerkleinern in Rohmühle, Filtern, In Drehrohrofen zu Klinker verarbeiten
<b>Zement (2017)</b>	34			Mahlen von Zement, Lagern, und Verladen von Zement
<b>Kalk (2017)</b>	6,4	7,2	8,0	Rohmaterial aufbereiten, Brennen, Mahlen

In der Zementindustrie werden neben den in Tabelle 1-2 zusammengefassten Produktionsprozessen nahezu keine sonstigen Produkte produziert. Demgemäß werden nachfolgend nur die Klinker- und die Zementherstellung untersucht. Beide Prozesse werden dabei integriert betrachtet. Auf diese Weise wird ein integriertes Zementwerk mit sowohl Klinker- als auch Zementproduktion abgebildet.

Dies gilt ebenfalls für Kalk. Trotz unterschiedlicher Kalkprodukte werden hierfür selbige Produktionsprozesse eingesetzt, die nachfolgend näher beschrieben werden.

<sup>47</sup> Verein Deutscher Zementwerke e.V. (2016); DEHSt (2018); Pfluger/Tersteegen/Franke (2017); BBS (2018); Destatis (2016); BVK (2018d); BVK (2018c); BVK (2018b); Umweltbundesamt (2017).

### 1.2.1 Klinker- und Zementproduktion

Die Klinker- und Zementherstellung wird in acht Prozessschritte untergliedert und ist in Abbildung 1-3 dargestellt.

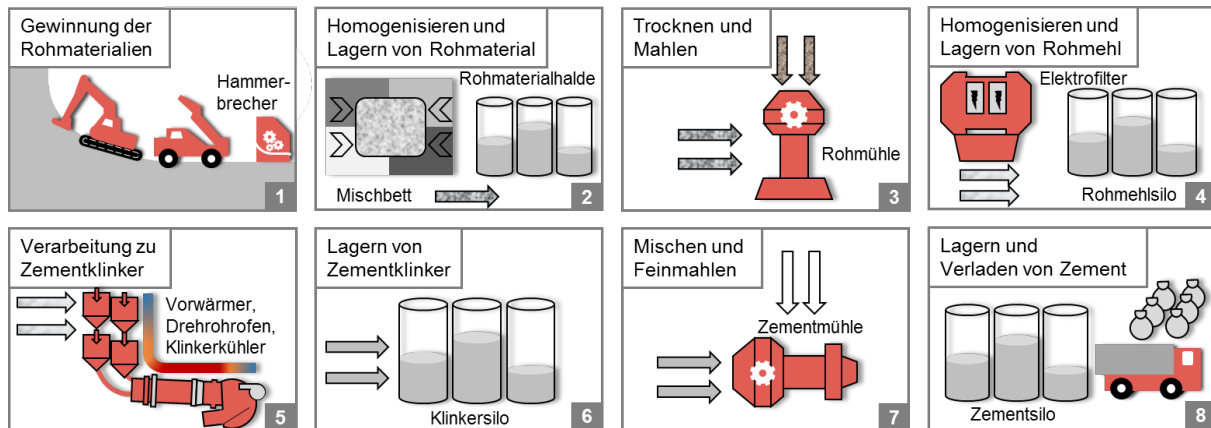


Abbildung 1-3. Herstellungsprozess der Zementindustrie<sup>48</sup>

**Prozess.** In Prozessschritt 1 werden die erforderlichen Rohstoffe gewonnen und in Brechern zu Schotter weiterverarbeitet.<sup>49</sup> Der Vorgang des Brechens weist einen verhältnismäßig geringen elektrischen Energieverbrauch auf. Dieser liegt bei weniger als 5 Prozent des gesamten elektrischen Energieverbrauches der Zementherstellung.<sup>50</sup> Anschließend erfolgt in Prozessschritt 2 die Vorhomogenisierung des gewonnenen Rohmaterials.<sup>51</sup> Hierbei wird das Rohmaterial eines Sprengvorganges mit dem Rohmaterial vorangegangener Sprengungen systematisch in Mischbetten aufgeschichtet und gelagert.<sup>52</sup> Dieser Vorgang wird ohne mechanische Mischanlagen durchgeführt.<sup>53</sup> Bei der systematischen Mischung wird wenig bis keine elektrische Energie verbraucht.<sup>54</sup> Darauf folgt das Rohmaterial durch Trocknen und Mahlen in der Rohmahlung (Prozessschritt 3) zu Rohmehl weiterverarbeitet.<sup>55</sup> Die Trocknung des Rohmaterials in der Rohmühle wird meist mit Heißgasen aus dem Drehrohrofen bewirkt.<sup>56</sup> Für den Betrieb der Rohmühlen werden große elektrische Leistungen bezogen.<sup>57</sup> Hierbei werden ca. 20 Prozent des gesamten elektrischen Energieverbrauches der Zementherstellung aufgewendet.<sup>58</sup> Anschließend wird das Rohmehl in Prozessschritt 4 in Rohmehlsilos verbracht.<sup>59</sup> Im darauffolgenden Prozessschritt 5 wird das aufbereitete Rohmaterial im Drehrohrofen zu Zementklinker weiterverarbeitet.<sup>60</sup> Prozessschritt 5 kann in die folgenden drei Teilprozesse untergliedert werden: Das Vorwärmen des Rohmehls, das Brennen und die anschließende Abkühlung des Zementklinkers.<sup>61</sup> Bei der Klinkerherstellung handelt es sich um einen kontinuierlichen thermischen Prozess mit sehr hoher Auslastung.<sup>62</sup> Die thermische Energie

<sup>48</sup> Eigene Darstellung nach Verein Deutscher Zementwerke e.V. (2008).

<sup>49</sup> Bosold/Pickhardt/Betonmarketing West GmbH (2014); Bringezu u. a. (2015).

<sup>50</sup> Schneider (2015).

<sup>51</sup> Bossenmayer (2017).

<sup>52</sup> Bosold/Pickhardt/Betonmarketing West GmbH (2014).

<sup>53</sup> Verein Deutscher Zementwerke e.V. (2008).

<sup>54</sup> Bürger o.V. (2017).

<sup>55</sup> Bosold/Pickhardt/Betonmarketing West GmbH (2014); Bossenmayer (2017).

<sup>56</sup> Verein Deutscher Zementwerke e.V. (2008).

<sup>57</sup> Schneider (2015).

<sup>58</sup> Buttermann/Baten (2013); Hübner (2017); Verein Deutscher Zementwerke e.V. (2016).

<sup>59</sup> Bosold/Pickhardt/Betonmarketing West GmbH (2014); Hübner (2017).

<sup>60</sup> Verein Deutscher Zementwerke e.V. (2008); Bossenmayer (2017).

<sup>61</sup> Buttermann/Baten (2013).

<sup>62</sup> Scheven/Hartkopf/Prelle (2012).

für die Klinkerherstellung in Deutschland wird im Durchschnitt heute zu 65 Prozent durch alternative Brennstoffe mit zum Teil hohen Biomassegehalten bereitgestellt (z. B. Altreifen, Klärschlamm, Tiermehl, Kunststoffabfälle).<sup>63</sup> Zur Herstellung von Zementklinker werden die Rohstoffe bei Temperaturen von bis zu 1.450 °C in einem Hochtemperaturprozess gebrannt. Die Ofenabgase des Drehrohrofens werden genutzt, um das Rohmaterial in der Rohmühle zu trocknen.<sup>64</sup> Nach dem Vorwärmen, Brennen und Kühlen, wird der Klinker in Klinkerrundlagern oder -silos gelagert (Prozessschritt 6).<sup>65</sup> Diese Lagerung gewährleistet analog zum Rohmehlsilo eine ausreichende Verfügbarkeit von Klinker für die Zementproduktion. Zudem stellen die Klinkerlager die kontinuierliche Produktion des Drehrohrofens bei Stillstand der Zementmühlen anderweitiger Betriebsweise des Folgeprozesses sicher. In Prozessschritt 7 wird der grobe Klinker aus den Silos entnommen und anschließend feingemahlen.<sup>66</sup> Hierbei wird die Vermahlung entweder in einer oder in mehreren Zementmühlen durchgeführt.<sup>67</sup> Bei einer mehrstufigen Mahlung werden verschiedene Mühlentypen, beispielsweise zur Steigerung der Energieeffizienz, eingesetzt.<sup>68</sup> Bei der Zementmahlung wird ca. 45 Prozent des elektrischen Energieverbrauchs der gesamten Zementherstellung aufgewendet.<sup>69</sup> Der spezifische elektrische Energieverbrauch und der Durchsatz der Roh- und Zementmühlen hängen hauptsächlich vom eingesetzten Mahlgut<sup>70</sup>, dem Mahlsystem<sup>71</sup> und der gewünschten Qualität des Zementes ab.<sup>72</sup> In Prozessschritt 8 wird der Zement in Silos gefördert und anschließend an die Kunden versandt.<sup>73</sup> Zement wird nahezu zu gleichen Teilen für den Tiefbau, den Wohnungsbau und den Bau von Nicht-Wohngebäuden eingesetzt.<sup>74</sup>

**Bedarf an Rohstoffen.** Der Rohstoffeinsatz in der Zementindustrie richtet sich stark nach der produzierten Zementsorte.<sup>75</sup> Im Jahr 2017 wurden für die Produktion überwiegend Kalkstein, Mergel oder Kreide und Hüttensand eingesetzt.<sup>76</sup> Hüttensand fällt als Nebenprodukt in der Stahlherstellung an. Zusammengekommen wiesen diese Rohstoffe im Jahr 2017 einen Anteil von rund 90 Prozent am gesamten Rohstoffeinsatz in der Zementindustrie auf. Neben Kalkstein, Mergel oder Kreide und Hüttensand werden u. a. Gips, Ton, Sand, Steinkohlenflugasche und gebrannter Schiefer eingesetzt.<sup>77</sup> Die Flugasche wird überwiegend von Steinkohlekraftwerken bezogen. Insgesamt wurden in der Zementindustrie im Jahr 2017 ca. 52 Mio. t an Rohstoffen eingesetzt.

**Brennstoffbedarf.** Der thermische Energieeinsatz zur Zementherstellung betrug im Jahr 2017 etwa 790 kWh/t Zement. In der Zementindustrie wurden 26,9 TWh an thermischer Energie im Jahr 2017 eingesetzt. Der Anteil des thermischen Energiebedarfs am Gesamtenergiebedarf betrug etwa 88 Prozent. Da thermische Energie in der Zementindustrie ausschließlich durch Brennstoffe bereitgestellt wird, folgt hieraus der Brennstoffbedarf.<sup>78</sup> Die Kosten für den Brennstoffeinsatz der deutschen Zementindustrie beliefen sich auf rund 270 Mio. Euro. im Jahr 2012. Die Kosten teilten sich auf den Bezug von Sekundärbrennstoffen im Wert von ca. 94 Mio. Euro und fossilen Energieträgern in Höhe von ca. 176 Mio. Euro auf.<sup>79</sup>

<sup>63</sup> Verein Deutscher Zementwerke e.V. (2016).

<sup>64</sup> Schneider (2015).

<sup>65</sup> Verein Deutscher Zementwerke e.V. (2008); Bossenmayer (2017).

<sup>66</sup> Bossenmayer (2017); Verein Deutscher Zementwerke e.V. (2016).

<sup>67</sup> Bosold/Pickhardt/Betonmarketing West GmbH (2014); Bossenmayer (2017).

<sup>68</sup> Hübner (2017).

<sup>69</sup> Hübner (2017); Orioli (2016); Bürger o.V. (2017).

<sup>70</sup> Buttermann/Baten (2013); Hübner (2017).

<sup>71</sup> Schneider (2012); VdZ (2005).

<sup>72</sup> Schneider (2015); Bartsch (1999).

<sup>73</sup> Bosold/Pickhardt/Betonmarketing West GmbH (2014); Hübner (2017); Bossenmayer (2017).

<sup>74</sup> Schneider/VdZ (2016).

<sup>75</sup> Schneider/et al. (2017).

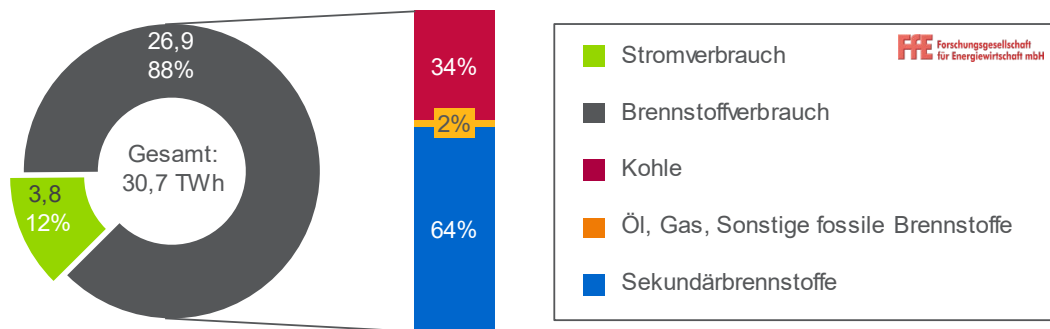
<sup>76</sup> Verein Deutscher Zementwerke e.V. (2016).

<sup>77</sup> Verein Deutscher Zementwerke e.V. (2016).

<sup>78</sup> Verein Deutscher Zementwerke e.V. (2016).

<sup>79</sup> Buttermann/Baten (2013).

**Strombedarf.** Der elektrische Energieeinsatz hingegen betrug 110 kWh/t Zement.<sup>80</sup> Insgesamt wurden in der Zementindustrie im Jahr 2017 etwa 3,8 TWh an elektrischer Energie eingesetzt.<sup>81</sup> Die Stromkosten betragen im Jahr 2012 kumuliert 245 Mio. Euro für die gesamte deutsche Zementindustrie.<sup>82</sup> Trotz eines Stromanteils von lediglich 12 Prozent am Gesamtenergieverbrauch, belaufen sich die Stromkosten somit auf knapp 50 Prozent der gesamten Energiekosten.<sup>83</sup> In Abbildung 1-4 wird der Strom- und Brennstoffverbrauch visualisiert, sowie der Brennstoffverbrauch nach Energieträger aufgeschlüsselt.



**Abbildung 1-4. Brennstoff- und Stromverbrauch in der Zementindustrie im Jahr 2017. Aufschlüsselung des Brennstoffverbrauchs nach Energieträger<sup>84</sup>**

Zusammengenommen kann für die Zementproduktion ein spezifischer Energieverbrauch von 900 kWh/t Zement und ein Gesamtenergieverbrauch von etwa 30,7 TWh/a für 2017 angegeben werden.<sup>85</sup> In diesem Zusammenhang ist das Verhältnis zwischen eingesetztem Klinker und produzierten Zement (Klinker-Zementfaktor) maßgeblich, um den spezifischen Energieverbrauch der Zementherstellung zu reduzieren.<sup>86</sup> Nimmt der Klinker-Zementfaktor ab, ist auch von einer Reduktion des spezifischen Energieverbrauchs auszugehen.<sup>87</sup> 2017 lag der durchschnittliche Klinker-Zementfaktor bei etwa 71 Prozent, was bedeutet, dass der hergestellte Zement im Schnitt zu 71 Prozent aus Klinker bestand.<sup>88</sup> Durch den Ersatz von Klinker durch weitere Hauptbestandteile wie Hüttensand (Stahlindustrie) oder Flugasche (Energie/Umwandlung) können Brennstoffe für die Herstellung von Klinker im Drehrohrofen eingespart werden.<sup>89</sup> Die Energiekosten der Zementindustrie in Deutschland beliefen sich im Jahr 2012 auf 514 Mio. Euro und machten somit 20 Prozent der Gesamtkosten aus.<sup>90</sup>

**Emissionen.** In der Zementindustrie wurden laut VET-Bericht der Deutschen Emissionshandelsstelle (DEHSt) im Jahr 2017 ca. 20,5 Mio. t CO<sub>2</sub> emittiert.<sup>91</sup> Von diesen Emissionen sind etwa 60 Prozent rohstoffbedingt, die sich aus diversen chemischen Umwandlungsprozessen in der Zementproduktion

<sup>80</sup> Zusammengenommen kann somit für die Zementproduktion ein spezifischer Energieverbrauch von 3,2 GJ/t Zement angegeben werden. *Verein Deutscher Zementwerke e.V.* (2016).

<sup>81</sup> *Verein Deutscher Zementwerke e.V.* (2016).

<sup>82</sup> *Buttermann/Baten* (2013).

<sup>83</sup> *Schneider/VdZ* (2016).

<sup>84</sup> *Verein Deutscher Zementwerke e.V.* (2016).

<sup>85</sup> *Verein Deutscher Zementwerke e.V.* (2016).

<sup>86</sup> *Bringezu u. a.* (2015).

<sup>87</sup> *Schneider/VdZ* (2016).

<sup>88</sup> *Verein Deutscher Zementwerke e.V.* (2016).

<sup>89</sup> *Schneider/VdZ* (2016).

<sup>90</sup> *Buttermann/Baten* (2013).

<sup>91</sup> *DEHSt* (2018).

ergeben.<sup>92</sup> Insbesondere bei der Entsäuerung des Kalksteins zur Klinkerherstellung im Drehrohrföfen fallen hohe CO<sub>2</sub>-Emissionen an.

**KWK.** KWK-Anlagen werden in der Zementindustrie nicht betrieben.

### 1.2.2 Kalkherstellung

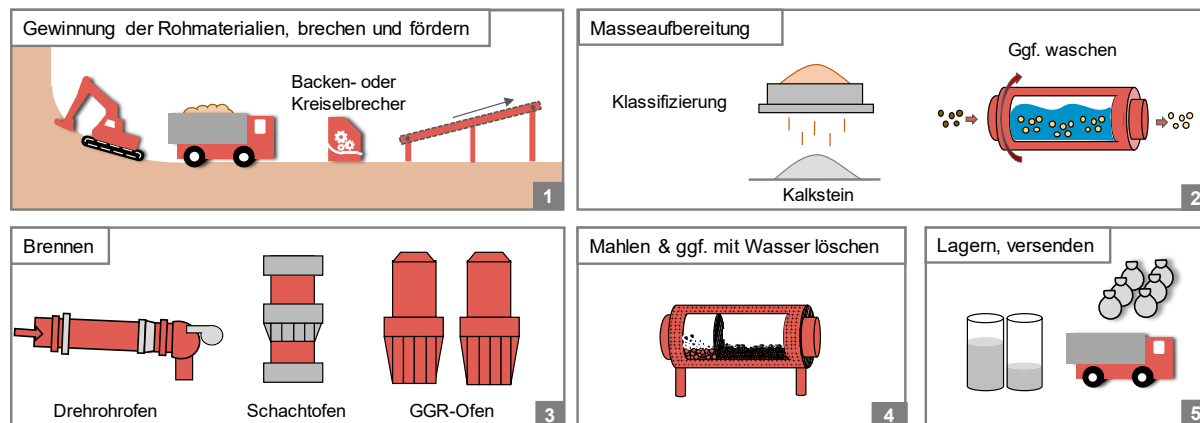


Abbildung 1-5. Herstellungsprozess der Kalkindustrie<sup>93</sup>

**Prozess.** Im ersten Prozessschritt wird das im Steinbruch gewonnene grobe Rohmaterial in teilweise mehrere hintereinander geschaltete Bracken-, Kreis- und Kniehebelbrechern zerkleinert.<sup>94</sup> Durch Sieben und Waschen wird das gebrochene Rohmaterial in der Masseaufbereitung (Prozessschritt 2) vom Rohgestein getrennt und sortiert.<sup>95</sup> Anschließend wird der gereinigte und aufbereitete Kalkstein in Rohmaterialsilos gelagert. Ein Teil des Rohmaterials wird direkt als ungebrannter Kalkstein verkauft, das Gros des Rohmaterials wird jedoch im anschließenden Brennprozess weiterverarbeitet.<sup>96</sup> Hierfür werden in Prozessschritt 3 hauptsächlich Drehrohr-, Schachtföfen (z. B. Gleichstrom-Gegenstrom-Regenerativ (GGR)-Öfen) eingesetzt.<sup>97</sup> Durch die Wärmezufuhr muss ein Temperaturniveau zwischen 900 bis 1.200 °C in den Öfen erreicht werden<sup>98</sup>, um die Dissoziation des Calciumkarbonats (CaCO<sub>3</sub>) in Calciumoxid (CaO) und Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) zu gewährleisten. Bei der Dissoziation des Kalksteins entstehen prozessbedingte Emissionen, die mit den Ofenabgasen ausgetragen werden.<sup>99</sup> Ein Teil des entstehenden Branntkalks (ungelöschter Kalk) wird nun direkt verkauft. Der Rest wird mit Wasser zum Kalkhydrat gelöscht oder in Kugelmöhlen feingemahlen (Prozessschritt 4).<sup>100</sup> In Prozessschritt 5 wird das Mahlgut wiederum in Silos gelagert oder direkt an die Kunden versandt.

**Bedarf an Rohstoffen.** Kalkprodukte werden aus Kalkstein hergestellt, der zum allergrößten Teil aus Calciumkarbonat (CaCO<sub>3</sub>) besteht.<sup>101</sup> Enthält der Kalkstein einen größeren Anteil Magnesium, wird

<sup>92</sup> Verein Deutscher Zementwerke e.V. (2016).

<sup>93</sup> Eigene Darstellung nach Brunke (2016).

<sup>94</sup> Fleiter (2013).

<sup>95</sup> RWI/Schmidt (2013); Saure (2013).

<sup>96</sup> Fleiter (2013).

<sup>97</sup> Brunke (2016).

<sup>98</sup> Fleiter (2013); RWI/Schmidt (2013); Saure (2013).

<sup>99</sup> RWI/Schmidt (2013); Saure (2013).

<sup>100</sup> Fleiter (2013); Saure (2013).

<sup>101</sup> RWI/Schmidt (2013).

dieser auch als Dolomitstein bezeichnet.<sup>102</sup> Je nach Region und Steinbruch kann die Zusammensetzung des Kalksteins variieren.

**Brennstoffbedarf.** Im Schnitt weisen Kalköfen einen spezifischen Brennstoffbedarf von etwa 4,1 GJ/t Kalk auf (2017). Etwa 66 Prozent hiervon sind auf den Einsatz von Braunkohle zurückzuführen (2,7 GJ/t Kalk). Erdgas spielt mit einem Anteil von 12 Prozent derzeit noch eine untergeordnete Rolle. Durch die zunehmende Verbreitung von GGR-Öfen könnte dieser Anteil jedoch auch aufgrund von Klimaschutzbestrebungen zukünftig steigen. Der durchschnittliche spezifische Brennstoffbedarf von Kalköfen ist zwischen 2011 und 2017 um etwa 7 Prozent gesunken.<sup>103</sup>

**Strombedarf.** Bei der Kalkindustrie fallen unabhängig vom brennstoffintensiven Brennvorgang Mahlvorgänge an, die sich durch ihre vergleichsweise hohe Stromintensität auszeichnen. In Europa liegt der Strombedarf je nach Ofentyp zwischen 14 bis 120 kWh/t Kalk.<sup>104</sup>

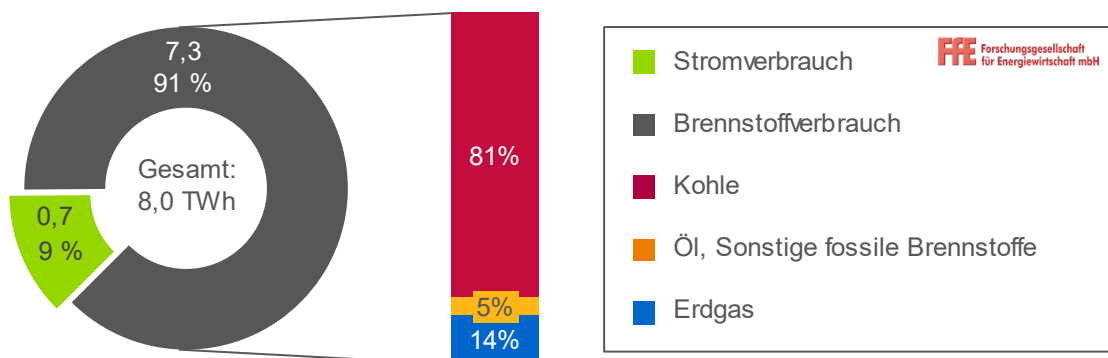


Abbildung 1-6. Strom- und Brennstoffverbrauch der Kalkindustrie<sup>105</sup>

**Emissionen.** Neben den energiebedingten Emissionen, die hauptsächlich auf den Kohle- und Erdgaseinsatz zurückzuführen sind (0,38 t CO<sub>2</sub>/t Kalk), entstehen bei der Kalkherstellung prozessbedingte Emissionen. Diese sind durch die Dissoziation des Kalksteins im Brennprozess bedingt. Würde reiner Kalkstein verwendet, lägen die spezifischen prozessbedingten Emissionen bei ca. 0,78 t CO<sub>2</sub>/t Kalk. Da jedoch weitere Komponenten im in der Kalkindustrie eingesetzten Kalkstein vorhanden sind, liegt der Wert mit etwa 0,73 t CO<sub>2</sub>/t Kalk leicht darunter (2017).<sup>106</sup> Es ergeben sich spezifische Gesamtemissionen von 1,1 t CO<sub>2</sub> / t Kalk.

**KWK.** In der Kalkindustrie ist der Einsatz von KWK-Anlagen zur Deckung des Wärmebedarfs nicht verbreitet. Prinzipiell ist jedoch eine Abwärmenutzung mit ORC-Anlagen zur Stromerzeugung möglich.<sup>107</sup>

<sup>102</sup> Saure (2013).

<sup>103</sup> BVK (2018a).

<sup>104</sup> Schorcht et al. (2013).

<sup>105</sup> Destatis (2016).

<sup>106</sup> BVK (2018a).

<sup>107</sup> Eikmeier (2011).



### 1.3 Chancen und Herausforderungen durch die Energiewende

Die deutsche Zement- und Kalkindustrie wird als energie- und emissionsintensive Branche in besonderem Maße von der Energiewende beeinflusst. Hierbei ergeben sich sowohl Chancen als auch Herausforderungen. Durch die Nutzung erneuerbarer Energien bietet sich die Chance, indirekte Emissionen deutlich zu reduzieren. Bei der Reduktion der direkten brennstoffbedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen konnte in den letzten Jahren durch den kontinuierlichen Ersatz fossiler Brennstoffe bei der Klinkerproduktion im Drehrohrofen durch bilanziell kohlenstofffreie Substitutionsbrennstoffe (Altreifen, Altöl, Kunststoffabfälle) bereits ein Teilerfolg erzielt werden.<sup>108</sup> Der Anteil alternativer Brennstoffe am gesamten Energieeinsatz in der Zementindustrie ist hierdurch auf über 60 Prozent angewachsen und nimmt von Jahr zu Jahr weiter zu.<sup>109</sup> Alternative Brennstoffe enthalten zudem in unterschiedlichen Anteilen Biomasse (bis zu 100 Prozent z. B. bei Klärschlamm). Die Reduktion von CO<sub>2</sub>-Emissionen kann in diesem Zusammenhang wirtschaftlich eine Erfolgsbilanz sein, wenn die Energiekosten sinken und weniger Emissionszertifikate zugekauft werden müssen.<sup>110</sup> Langfristig könnte auch der Einsatz synthetischer Brennstoffe eine Möglichkeit zur Verbesserung der CO<sub>2</sub>-Bilanz bieten. Eine wirtschaftliche Relevanz ist hier jedoch heute noch nicht erkennbar. Synthetische Brennstoffe könnten auch in der Kalkindustrie eingesetzt werden. Sekundärbrennstoffe können bei der Kalkindustrie kaum eingesetzt werden, da sie Einfluss auf die Produkteigenschaften haben. Den CO<sub>2</sub>-Einsparmöglichkeiten in der Zement- und Kalkindustrie sind zudem chemisch-physikalische Grenzen gesetzt, da prozessbedingte Emissionen bei der Umwandlung der Ausgangsprodukte (z. B. Kalkstein) ab einer Temperatur von etwa 450 °C entstehen.<sup>111</sup>

Zur Vermeidung prozessbedingter Emissionen ist Carbon Capture and Storage bzw. Use (CCS bzw. CCU) aus heutiger Sicht besonders vielversprechend, wenngleich noch grundlegende Fragen zu klären sind. So werden beim Einsatz dieser Technologie absehbar der Stromverbrauch und damit die Stromkosten erheblich steigen. Auch für Transport sowie Speicherung bzw. Verwertung sind noch keine abschließenden Lösungen verfügbar. Neben dem Auffangen und Speichern bzw. Verwerten von CO<sub>2</sub> bieten auch weitere Technologieentwicklungen grundsätzlich die Chance, Treibhausgase im Rahmen der Energiewende zu reduzieren.<sup>112</sup> In der Zementindustrie ist beispielsweise durch innovative, neue Bindemittel theoretisch eine deutliche Verminderung der spezifischen THG-Emissionen möglich. Diese Zemente befinden sich jedoch aktuell noch im Forschungsstadium, eine breite Marktdurchdringung ist derzeit nicht absehbar. Dies liegt vor allem an der aus bautechnischer Sicht begrenzten Einsetzbarkeit neuer Bindemittel. Zwar ist deren Wirtschaftlichkeit ebenfalls noch nicht gegeben, dieses Problem ist zum jetzigen Zeitpunkt jedoch zweitrangig. Bei herkömmlichen Zementarten mit unterschiedlichen Klinkeranteilen dagegen könnte eine Kennzeichnung der jeweils anfallenden CO<sub>2</sub>-Emissionen beim Kunden ein Umdenken zugunsten CO<sub>2</sub>-ärmeren Zementen bewirken. Diesen würde so ein Marktvorteil gegeben werden.<sup>113</sup>

Als stromintensive Branche bietet die Zementindustrie grundsätzlich die Möglichkeit zu einer flexiblen Lastabnahme. Je nach lokalen Gegebenheiten im Werk kann die Abschaltung bzw. Zuschaltung von Mahlanlagen allerdings zu erheblichen Produktionseinbußen und Verschleißrisiken führen. Sowohl technisch als auch wirtschaftlich sind einer Nutzung der Flexibilitäten daher Grenzen gesetzt. Eine Teilnahme am Regelleistungsmarkt ist daher unter den gegenwärtigen Bedingungen üblicherweise nicht wirtschaftlich. Auch die abschaltbare Lastenverordnung (AbLaV) sieht in der aktuellen Fassung noch zu hohe Hürden für eine breite Beteiligung der Zementindustrie vor.

Die deutsche Zement- und Kalkindustrie ist als energieintensive Branche besonders auf wettbewerbsfähige und stabile energiepolitische Rahmenbedingungen angewiesen. Für die

<sup>108</sup> Verein Deutscher Zementwerke e.V. (2016).

<sup>109</sup> Verein Deutscher Zementwerke e.V. (2016).

<sup>110</sup> Köpf (2018).

<sup>111</sup> Köpf (2018).

<sup>112</sup> *Climate Strategies* (2014); *European Cement Association* (2013); *International Energy Agency/World Business Council for Sustainable Development* (2009).

<sup>113</sup> *European Cement Association* (2013).



brennstoff- und stromintensiven Produktionsverfahren sind stabile Energiepreise essentiell. Infolge der Energiewende entstehen demgemäß nicht nur Chancen, es ergeben sich auch Herausforderungen, die es zu bewältigen gilt. Besonderes Augenmerk liegt derzeit auf dem Anstieg der Stromnetzentgelte in Folge der Energiewende. Für die Zement- und Kalkindustrie ist hierbei eine wirksame Kostenbremse zum Schutz der internationalen Wettbewerbsfähigkeit bedeutend. In diesem Zusammenhang ist auch die Aufrechterhaltung der im Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG) verankerten „Besonderen Ausgleichsregelung“ für energieintensive Industrien entscheidend.<sup>114</sup> Zudem steigt der Stromverbrauch in der Zementindustrie bereits heute durch Umwelt- und Klimaschutzmaßnahmen an und wird sich durch CCS/U absehbar weiter erhöhen. Steigende CO<sub>2</sub>-Preise werden somit künftig auch zu einer erheblichen indirekten CO<sub>2</sub>-Kostenbelastung führen.

Durch den hohen Anteil und der aus heutiger Sicht ohne CCS nicht zu vermeidenden prozessbedingten Emissionen bei der Zement- und Kalkproduktion, sind zukünftige Produktionskosten zudem maßgeblich von der Ausgestaltung des EU-Emissionshandels abhängig. Technische Produktbenchmarks stellen die Zement- und Kalkindustrie vor Herausforderungen. Beide Branchen verzeichnen in Deutschland bereits seit 2013 eine jährliche Unterdeckung mit Zertifikaten. Sofern die Benchmarks auf Biomasse basieren, ist zudem zu berücksichtigen, dass Biomasse in Deutschland nicht für das Brennen von Kalk zur Verfügung steht. Eine weitere deutliche Verschärfung der Benchmarks ab 2021 steht zu erwarten. Dieser Carbon-Leakage-Schutz ist dabei für die Zement- und Kalkindustrie unabdingbar, um dem internationalen Konkurrenzdruck Rechnung zu tragen.<sup>115</sup> Weitere Verschärfungen für Emissionshandelssektoren sind vor diesem Hintergrund nicht verkraftbar. Insbesondere im Rahmen der Energiewende und des Kohleausstiegs sind Doppelregulierungen durch nationale und europäische Vorgaben zur Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen für Emissionshandelssektoren unbedingt zu vermeiden.<sup>116</sup> Darüber hinaus hat die Energiesystemstabilität für die Zement- und Kalkindustrie oberste Priorität. Alle in der Zement- und Kalkindustrie eingesetzten kontinuierlichen Prozesse erfordern eine unterbrechungsfreie, sichere und bezahlbare Brennstoff- und Stromversorgung.<sup>117</sup> Besonders bei Öfen und Brennern kann jede unvorhergesehene Unterbrechung schwere Schäden verursachen und zu mehrmonatigen Stilllegungen und Produktionsausfällen führen.

Eine weitere Herausforderung neben hohen Energiekosten, regulatorischen Rahmenbedingungen und Systemstabilität sind die langen Investitionszyklen von mehr als 60 Jahren in der Zement- und Kalkindustrie.<sup>118</sup> Neuinvestitionen stehen erhebliche technische, wirtschaftliche und ressourcenbedingte Hindernisse gegenüber. In der Zementindustrie bewirkt zudem selbst eine flächendeckende Modernisierung des Anlagenparks in Deutschland nur verhältnismäßig geringe Treibhausgaseinsparungen, da Zementwerke bereits heute sehr hohe Effizienzgrade sowohl beim thermischen als auch beim elektrischen Energieeinsatz aufweisen. Die Erforschung und Implementierung disruptiver Technologien ist hier vielversprechender, erfordert jedoch wesentliche personelle und finanzielle Ressourcen sowie die Unterstützung durch die Politik.<sup>119</sup>

<sup>114</sup> Schneider/et al. (2017).

<sup>115</sup> Schneider/et al. (2017).

<sup>116</sup> RWI/Schmidt (2013); Schneider/VdZ (2016).

<sup>117</sup> RWI/Schmidt (2013).

<sup>118</sup> RWI/Schmidt (2013); Schneider/VdZ (2016).

<sup>119</sup> RWI/Schmidt (2013).

## 2. LITERATURVERZEICHNIS

- Anonym* (2017): Telefonat - Öfen in der Kalkindustrie, Anonym
- Bartsch, Thomas* (1999): Entwicklung eines modellgestützten Prozeßführungssystems zur Optimierung des Zementmahlkreislaufes: Reihe 8 Meß-, Steuerungs- und Regelungstechnik, Düsseldorf: VDI Verlag GmbH, 1999
- Baustoff Recycling Bayern e. V.* (2018): Mineralische Abfälle, <<https://www.baustoffrecycling-bayern.de/node/320>> [Zugriff 2018-06-14]
- BBS* (2018): bbs-Zahlenspiegel 2018 - Struktur- und Konjunkturdaten der Baustoff-, Steine-und-Erden-Industrie., Berlin
- Bosold, Diethelm/Pickhardt, Roland/Betonmarketing West GmbH* (2014): Zemente und ihre Herstellung: Merkblatt der deutschen Zementindustrie, <<https://www.baunetzwissen.de/beton/tipps/planungshilfen/b--1--zemente-und-ihre-herstellung-151306>>
- Bossenmayer, Horst* (2017): Umwelt-Produktdeklaration, <<https://epd-online.com/Epd/PdfDownload/5564>>
- Bringezu, Stefan u. a.* (2015): Rohstoffversorgung und Ressourcenproduktivität Zementindustrie: Analyse des Status quo und Perspektiven, Wuppertal, <[https://www.zement-verbindet-nachhaltig.de/images/studien/Studie\\_Rohstoffversorgung\\_Ressourcenproduktivitaet\\_C3%A4t\\_Zementindustrie.pdf](https://www.zement-verbindet-nachhaltig.de/images/studien/Studie_Rohstoffversorgung_Ressourcenproduktivitaet_C3%A4t_Zementindustrie.pdf)>
- Brunke, Jean Christian Ulf* (2016): Energieeinsparpotenziale von energieintensiven Produktionsprozessen in Deutschland: Eine Analyse mit Hilfe von Energieeinsparkostenkurven, Dissertation, 134. Aufl., Stuttgart
- Bundesministerium für Bildung und Forschung* (Hrsg.) (2016): Industrieprozesse - Kopernikus-Projekt SynErgie, Bonn, <<https://www.kopernikus-projekte.de/projekte/industrieprozesse>> [Zugriff 2017-05-01]
- Bundesverband der Gipsindustrie e. V.* (Hrsg.) (2018): GIPS: Über uns - Mitglieder., <<http://www.gips.de/meta/ueber-uns/bundesverband-gips/struktur/mitglieder/>> [Zugriff 2018-09-19]
- Bürger o. V.* (2017): Telefoninterview - flexibilitätsrelevante Aspekte der Zementindustrie; Experteninterview, HeidelbergCement, Ennigerloh
- Buttermann, Hans Georg/Baten, Tina* (2013): Wettbewerbs. Stromkosten: Voraussetzung für die Zementherstellung am Standort Deutschland, <[https://www.vdz-online.de/fileadmin/gruppen/vdz/3LiteraturRecherche/Wettbewerbsfaehige\\_Stromkosten/EEFA-Studie\\_Wettbewerbsfaehige\\_Stromkosten\\_fuer\\_die\\_Zementherstellung.pdf](https://www.vdz-online.de/fileadmin/gruppen/vdz/3LiteraturRecherche/Wettbewerbsfaehige_Stromkosten/EEFA-Studie_Wettbewerbsfaehige_Stromkosten_fuer_die_Zementherstellung.pdf)>
- BVK* (2018a): Auszug Ofenumfrage Kalkverband, Köln
- (2018b): CO<sub>2</sub>-Prozentrechnen in der Kalkindustrie., Köln
- (2018c): Geschäftsbericht 2017/2018 des Bundesverbandes der Deutschen Kalkindustrie e.V., der Forschungsgemeinschaft Kalk und Mörtel e. V., des Instituts für Kalk- und Mörtelforschung e. V., Köln
- (2018d): Kalk - Statistisches Jahreshft 2018, Köln
- (2018e): Mitgliedsunternehmen des Verbands., Köln, <<https://www.kalk.de/verband/mitgliedsunternehmen/>> [Zugriff 2018-09-12]
- Climate Strategies* (Hrsg.) (2014): Carbon Control and Competitiveness Post 2020: The Cement Report, London
- DEHSt* (2018): Treibhausgasemissionen 2017 - Emissionshandlungspflichtige stationäre Anlagen und Luftverkehr in Deutschland (VET-Bericht 2017)., Berlin
- Destatis* (2016): Erhebung über die Energieverwendung der Betriebe des Verarb. Gewerbes sowie des Bergbaus und der Gewinnung von Steinen und Erden: Tabelle 2: Energieverbrauch nach Energieträgern
- (2018): Beschäftigte, Umsatz, Produktionswert und Wertschöpfung der Unternehmen im Verarbeitenden Gewerbe: Deutschland, Wirtschaftszweige (WZ2008 2-4-Steller Hie-rarchie) - 2008 und 2015, Wiesbaden, <[https://www-genesis.destatis.de/genesis/online/data.jsessionid=57AC42A2DC554486C7F03F27D15A117E.tomcat\\_GO\\_2\\_2?operation=begriffsRecherche&suchanweisung\\_language=de&suchanweisung=42251](https://www-genesis.destatis.de/genesis/online/data.jsessionid=57AC42A2DC554486C7F03F27D15A117E.tomcat_GO_2_2?operation=begriffsRecherche&suchanweisung_language=de&suchanweisung=42251)>
- Eikmeier, Bernd et al.* (2011): Potenzialerhebung von Kraft-Wärme- Kopplung in Nordrhein-Westfalen., Bremen, München, Karlsruhe, Essen:
- European Cement Association* (Hrsg.) (2013): The role of CEMENT in the 2050 LOW CARBON ECONOMY., Brüssel, Belgien:
- Fleiter, Tobias* (Hrsg.) (2013): Energieverbrauch und CO<sub>2</sub>-Emissionen industrieller Prozesstechnologien: Einsparpotenziale, Hemmnisse und Instrumente, Stuttgart: Fraunhofer-Verl., 2013
- Harder, Joachim* (2005): Ausblick auf die Zementindustrie in 2010, in: ZKG International; 1 (2005)
- HeidelbergCement AG* (Hrsg.) (2015): Wachstum in Metropolen - Geschäftsbericht 2015., Heidelberg
- Hübner, Tobias* (2017): Simulation von Referenzprozessen zur Bestimmung von Flexibilitäts-potenzialen und der Auswirkungen von Effizienzmaßnahmen in der Grundstoffindustrie: Herausgegeben durch Technische Universität München, betreut durch die Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH, Masterarbeit, München
- International Energy Agency/World Business Council for Sustainable Development* (Hrsg.) (2009): Cement Technology Roadmap 2009: Carbon emissions reductions up to 2050, Paris, Genf
- Köpf, Matthias* (2018): In Rohrdorf steht eins der saubersten Zementwerke der Welt., München, <<http://www.sueddeutsche.de/bayern/wirtschaft-in-rohrdorf-steht-eins-der-saubersten-zementwerke-der-welt-1.4046554-2>> [Zugriff 2018-07-17]
- Krauß, Oliver/Werner, Thomas* (2016): Potenziale eines hochwertigen Recyclings im Baubereich: Kurzanalyse Nr. 8, Berlin 3. Auflage, <<https://wdvs.enbausa.de/wp-content/uploads/2014/07/2014-Kurzanalyse-08-Recycling-im-Baubereich.pdf>>
- Kreislaufwirtschaft Bau* (2017): Mineralische Bauabfälle Monitoring 2014: Bericht zum Aufkommen und zum Verbleib mineralischer Bauabfälle im Jahr 2014
- Löckener, Ralf* (2013): Nachhaltigkeit und Zementindustrie, <[https://www.vdz-online.de/fileadmin/gruppen/bdz/Themen/Nachhaltigkeit/Dokumentation\\_Nachhaltigkeit\\_Zementindustrie\\_2013.pdf](https://www.vdz-online.de/fileadmin/gruppen/bdz/Themen/Nachhaltigkeit/Dokumentation_Nachhaltigkeit_Zementindustrie_2013.pdf)>
- Mohr, Manuel* (2017): Zementwerke in Deutschland, <<https://www.vdz-online.de/zementindustrie/brancheneueberblick/zementwerke-in-deutschland/>> [Zugriff 2017-05-29]
- Orioli, Victoria* (2016): Potentials of Industrial Demand Side Management., Dresden:
- Pfluger, Benjamin/Tersteegen, Bernd/Franke, Bernd* (2017): Langfristzenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland: Modul 3, <[https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/B/berichtsmodul-3-referenzszenario-und-basisszenario.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=4](https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/B/berichtsmodul-3-referenzszenario-und-basisszenario.pdf?__blob=publicationFile&v=4)>
- RWI/Schmidt, Christoph M.* (2013): Die Klimavorsorgeverpflichtung der deutschen Wirtschaft – Monitoringbericht 2011 und 2012, Essen, <[http://www.rwi-essen.de/media/content/pages/publikationen/rwi-projektberichte/PB\\_CO2-Monitoring-2010.pdf](http://www.rwi-essen.de/media/content/pages/publikationen/rwi-projektberichte/PB_CO2-Monitoring-2010.pdf)>

- Saure, Heiko* (2013): Kalk: Produktion und Anwendungen., Wülfrath:
- Scheven, Alexander von/Hartkopf, Thomas/Prelle, Martin* (2012): Lastmanagementpotenziale stromintensiven Industrien zur Maximierung des Anteils regenerativer Energien im bezogenen Strommix, Darmstadt
- Schneider, Martin* (2012): Tätigkeitsbericht 2009 – 2012, Düsseldorf
- (2015): Tätigkeitsbericht 2012-2015, <[https://www.vdz-online.de/fileadmin/gruppen/vdz/3LiteraturRecherche/TB12-15/VDZ-Taetigkeitsbericht\\_2012-2015.pdf](https://www.vdz-online.de/fileadmin/gruppen/vdz/3LiteraturRecherche/TB12-15/VDZ-Taetigkeitsbericht_2012-2015.pdf)>
- Schneider, Martin/et al.* (2017): Zementindustrie im Überblick 2017/2018., Düsseldorf
- Schneider, Martin/VdZ* (2016): Zementindustrie im Überblick 2016-2017, <[https://www.vdz-online.de/fileadmin/gruppen/vdz/3LiteraturRecherche/Zementindustrie\\_im\\_Ueberblick/VDZ\\_Zementindustrie\\_im\\_Ueberblick\\_2016\\_2017.pdf](https://www.vdz-online.de/fileadmin/gruppen/vdz/3LiteraturRecherche/Zementindustrie_im_Ueberblick/VDZ_Zementindustrie_im_Ueberblick_2016_2017.pdf)>
- Schorcht et al.* (2013): 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)., Sevilla:
- Szednyj, Ilona/et al.* (2007): Stand der Technik zur Kalk-, Gips und Magnesiaherstellung: Beschreibung von Anlagen in Österreich, Wien
- Umweltbundesamt* (2017): Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2017 Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990 – 2015: 1990-2015, Dessau-Roßlau, <[https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2017-04-26\\_climate-change\\_13-2017\\_nir-2017\\_unfccc\\_de.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2017-04-26_climate-change_13-2017_nir-2017_unfccc_de.pdf)> [Zugriff 2019-02-18]
- USGS* (2018): Mineral commodity summaries 2018, Reston (Virginia):
- VdZ* (2005): Tätigkeitsbericht 2003 – 2005., Düsseldorf:
- (2013): Verminderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen: Beitrag der deutschen Zementindustrie, 11. Aufl., <[https://www.vdz-online.de/fileadmin/gruppen/vdz/3LiteraturRecherche/UmweltundRessourcen/co2monitoring/Monitoring\\_Bericht\\_Zement\\_1990-2012.pdf](https://www.vdz-online.de/fileadmin/gruppen/vdz/3LiteraturRecherche/UmweltundRessourcen/co2monitoring/Monitoring_Bericht_Zement_1990-2012.pdf)>
- Verein Deutscher Zementwerke e.V.* (2008): Zement Taschenbuch: 51. Ausgabe, 51. Aufl., Düsseldorf
- (2016): Umweltdaten der deutschen Zementindustrie: Environmental Data of the German Cement Industry., Düsseldorf, <[https://www.vdz-online.de/fileadmin/gruppen/vdz/3LiteraturRecherche/Umweltdaten/VDZ-Umweltdaten\\_2015.pdf](https://www.vdz-online.de/fileadmin/gruppen/vdz/3LiteraturRecherche/Umweltdaten/VDZ-Umweltdaten_2015.pdf)>
- Verein Deutscher Zementwerke e.V.* (Hrsg.) (2018): Zahlen und Daten 2018 - Zementindustrie in Deutschland, Düsseldorf
- Wolter, Albrecht et al.* (2007): Spezifische CO<sub>2</sub>-Emission und Einsatzgebiete von Kalkbrenn-öfen., Clausthal, Köln: