

Dekarbonisierung der Zementindustrie

1 Allgemeine Informationen

Die Herstellung von Zement erfolgt in zwei wesentlichen Schritten:

- ▶ Brennen des Rohmaterials (im Wesentlichen Kalkstein) zu Zementklinker (Materialtemperatur 1.450 °C),
- ▶ Vermahlen des Zementklinkers mit unterschiedlichen Zumahlstoffen und Klinkerersatzstoffen, z.B. Gips, Kalkstein, Hüttensand und Flugasche, zu Zement.

In Deutschland sind derzeit 34 Zementwerke mit eigener Zementklinkererzeugung in Betrieb. Darüber hinaus werden 19 reine Mahlwerke (ohne eigene Klinkererzeugung, d.h. ohne Ofen) betrieben (VDZ 2019). Die insgesamt 53 Werke verteilen sich auf 21 Unternehmen.

Nach (VDZ 2019) wurden 2018 bezogen auf die Zementproduktion in Deutschland ca. 5 % der inländischen Zementbedarfs importiert, während etwa 20 % des in Deutschland hergestellten Zements (einschließlich Klinker) exportiert wurden. Konjunkturelle Schwankungen besonders in der Baubranche beeinflussen die Zementindustrie direkt.

2 CO₂-Emissionen (aktueller Stand)

Die Zementindustrie war 2018 für etwa 20 Mio. t CO₂-Äquivalente (direkte Emissionen ohne biogenen Anteil) in Deutschland verantwortlich (DEHSt 2019, S. 38). Die Emissionen entstehen im Wesentlichen bei der Herstellung des Zementklinkers. Etwa zwei Drittel davon werden durch die Freisetzung von CO₂ aus den eingesetzten Rohmaterialien und ein Drittel durch die Verbrennung der Brennstoffe verursacht. Der größte Anteil der rohmaterialbedingten Emissionen entsteht durch die Kalzinierung von Kalkstein ab einer Temperatur von rund 850 °C nach der Reaktion $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$.

Der Anteil der direkten Emissionen der Zementindustrie an den Gesamtemissionen aller im Emissionshandel erfassten Anlagen beträgt 2018 etwa 5 %. Der Anteil an den erfassten Industrieemissionen lag bei 16 % (DEHSt 2019, S. III).

Darüber hinaus entstehen indirekte CO₂-Emissionen in Höhe von etwa 1,8 Mio. t CO₂¹ bei der Erzeugung des für die Zementproduktion benötigten Stroms, z.B. für Mahl- und Förderprozesse, Emissionsminderungstechniken sowie den Antrieb der Öfen.

¹ Berechnet mit einem CO₂-Emissionsfaktor von 474 g/kWh für den deutschen Strommix (ohne Berücksichtigung von Vorketten) und einem Stromverbrauch der deutschen Zementindustrie von 3,78 Mio. MWh in 2018. Quellen:

CO₂-Emissionsfaktor: Icha, P. und G. Kuhs (2019). Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990-2018: Aktualisierung auf Basis von Climate Change 15/2017. Climate Change / Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau: 1.

Stromverbrauch: VDZ (2019). Umweltdaten der deutschen Zementindustrie 2018. Düsseldorf, VDZ (Verein Deutscher Zementwerke e.V.).

3 Möglichkeiten der CO₂-Minderung, aktueller Stand der Technik, Perspektiven und ggf. Cross-Media-Effekte

3.1 CO₂-Minderung innerhalb bestehender Produktionsrouten/-prozesse

3.1.1 Steigerung der thermischen Energieeffizienz durch Abwärmenutzung

Derzeit wird in allen Zementwerken Abwärme zur Trocknung des Rohmaterials eingesetzt. Darüber hinaus wird in einigen Zementwerken Abwärme zur (Mahl-)Trocknung von Brennstoffen oder anderen Stoffströmen, wie Hüttensand, eingesetzt. In zwei Zementwerken wird Abwärme verstromt (Organic Rankine Cycle-Verfahren bzw. über Dampfturbine).

Die noch für eine weitergehende Nutzung zur Verfügung stehende Abwärme variiert von Werk zu Werk und kann derzeit nicht beziffert werden. Grundsätzlich lässt sich zu den verschiedenen Abwärmequellen Folgendes sagen:

- a) In einigen Werken wird ein Teil des Ofenabgases (ca. 360 – 420 °C) derzeit mit Verdampfungskühlern auf < 150 – 180 °C gekühlt (z. T. nur im Direktbetrieb) und stünde grundsätzlich für eine andere Nutzung zur Verfügung.
- b) Strahlungswärme des Drehrohrofens ist derzeit technologisch noch nicht nutzbar.
- c) Klinkerkühlerabluft wird z.T. schon genutzt.

3.1.2 Reduzierung des Klinkerfaktors

Der Klinkerfaktor² kann durch die Steigerung des Einsatzes von sekundären Rohstoffen, wie Hüttensand und Flugasche, bei der Vermahlung des Klinkers zu Zement reduziert werden. Er betrug im Jahr 2018 durchschnittlich 0,73 (VDZ 2019). Es gibt zahlreiche Forschungsprojekte zu diesem Thema. Die Zementindustrie hat ein großes Eigeninteresse an der Umsetzung von Maßnahmen in diesem Bereich. Das Potenzial ist allerdings endlich, da für die Material- und Verarbeitungseigenschaften des Zementes ein gewisser Klinkeranteil benötigt wird. Nach (Hoenig, Müller et al. 2013) wurde für 2050 mithilfe verschiedener Szenarien eine Absenkung auf max. 0,67 prognostiziert. Die Ausschöpfung dieses Potenzials ist ambitioniert und zudem von der Verfügbarkeit geeigneter Klinkerersatzstoffe abhängig.

Durch Verfahrensumstellungen bzw. Anlagenstilllegungen in anderen Sektoren, wie der Stahlindustrie und Kraftwerken, sind perspektivisch die derzeit als Klinkersubstitute eingesetzten alternativen Rohstoffe, wie Hüttensand oder Flugasche, nur noch begrenzt oder gar nicht mehr verfügbar. Mögliche Alternativen wären der verstärkte Einsatz von Kalkstein oder vorkalzinierten Tone als Klinkerersatzstoff. Das Potenzial ist derzeit noch schwer abschätzbar. Im ungünstigsten Fall stiege der Klinkerfaktor im Vergleich zu heute sogar an. Die Auswirkungen einer geringeren Verfügbarkeit dieser Stoffströme auf den Klinkerfaktor und die CO₂-Emissionen wurde z.B. in (Ruppert, Wagener et al. 2019) untersucht.

3.1.3 Brennstoffwechsel

Der Brennstoffmix der deutschen Zementwerke setzt sich derzeit aus 31 % Kohle und Koks, 0,9 % Heizöl, 0,6 % Erdgas und 67,5 % Sekundärbrennstoffen (biogene Anteile beinhaltend) zusammen (VDZ 2019). Neben der Umstellung auf regenerative Energieträger (Strom aus erneuerbaren Energien, grüner Wasserstoff, Methan aus Power-to-Gas-Anlagen unter Nutzung von Strom aus erneuerbaren Energien) lässt sich die Emissionsintensität auch durch einen Wechsel

² Der Klinkerfaktor ist das Verhältnis von Klinkermenge zu Zementmenge. Ein Klinkerfaktor von 0,73 bedeutet, dass in einer Tonne Zement 730 kg Zementklinker enthalten sind.

im Brennstoffmix senken, indem abfallstämmige Brennstoffe mit einem höheren biogenen Anteil (z.B. Klärschlamm) eingesetzt werden.

Dieser Wechsle kann aufgrund eines ggf. höheren Wassergehalts zu einer Erhöhung des spezifischen Energieverbrauchs beitragen und darüber hinaus auch zu Schadstoffeinträgen führen. Dies ist bei der Ausführung entsprechend zu beachten.

Bei einer zukünftig angestrebten verstärkten stofflichen Nutzung von Reststoffen könnte sich das Angebot an sekundären Brennstoffen aufgrund des dann möglicherweise sinkenden Abfallaufkommens und der veränderten Abfallqualität für die Zementindustrie perspektivisch reduzieren. Diesbezügliche Prognosen sind allerdings schwierig.

3.1.4 Umstellung auf strombasierte Produktionsverfahren

Die Umstellung auf strombasierte Öfen steht derzeit nicht im Fokus. Sie erfordert auch wesentlich mehr Veränderungen im Prozess bzw. mehr Aufwand als die Umstellung auf andere gasförmige regenerative Energieträger, wie Methan aus Power-to-Gas-Anlagen unter Nutzung von Strom aus erneuerbaren Energien, und wird daher auch jenseits aller offenen technologischen Fragen von der Zementindustrie aktuell nicht als vorrangige Option gesehen. Nichts-destotrotz ist die direkte Nutzung von Strom zumindest für Teilprozesse, wie die Kalzinierung im Vorwärmer bzw. Kalzinator, eine ernsthafte Zukunftsoption, deren Entwicklung weiterer Forschungsanstrengungen bedarf.

3.1.5 Einsatz energieeffizienterer Anlagenkomponenten

Durch den Einsatz energieeffizienterer Anlagenkomponenten, wie Pumpen, Ventilatoren oder Mühlen, könnten durch Reduzierung des Stromverbrauchs die indirekten CO₂-Emissionen gesenkt werden. Das Potenzial ist aber begrenzt (Ruppert, Wagener et al. 2019).

3.2 CO₂-Minderung durch modifizierte Produktionsrouten/-prozesse

Die Entwicklung neuartiger Bindemittel bzw. neuer Herstellungsverfahren bietet ein unbestimmtes Potenzial, die CO₂-Emissionen der Zementindustrie zu senken. Beispielhaft seien hier folgende Ansätze genannt:

- ▶ „Grüne Zemente“ (novel low carbon cements): mehrere Vorhaben im Versuchsstadium (z.B. Celitement: Die Klinkerphasenbildung erfolgt im Autoklav bei einer deutlich niedrigeren Temperatur; dadurch niedrigerer Energieverbrauch, aber ggf. geänderte Materialeigenschaften);
- ▶ Rohmaterialsubstitution hin zu CO₂-ärmeren Rohstoffen (ggf. geänderte Materialeigenschaften);
- ▶ Einsatz von Flussmitteln zur Absenkung der Brenntemperatur um ca. 200 °C, was zu Einsparungen von bis zu 5 % des Energiebedarfs führt (Locher 2006).

Das Thema ist breit gefächert. Eine abschließende Bewertung der ökologischen Vorteilhaftigkeit der unterschiedlichsten Ansätze (insbesondere bei Verfahren, bei denen es um die Einbindung von CO₂ geht, z.B. bei Solidia Cement), steht noch aus.

3.4 CO₂-Minderung in der Anwendung der Produkte

3.4.1 Reduzierung des Zementanteils im Beton

Hierunter versteht man die Weiterentwicklung von Hochleistungszementen, bei deren Einsatz der Zementanteil im Beton reduziert werden kann. Damit verbunden ist ggf. ein höherer Chemikalienbedarf (Ruppert, Wagener et al. 2019).

3.4.2 Reduzierung der eingesetzten Betonmenge

Neben Maßnahmen zur Minderung des CO₂-Fußabdrucks bei der Zementklinker- und Zementherstellung sind weitere CO₂-reduzierende Maßnahmen entlang der Wertschöpfungskette des Zementes denkbar. Beispielfhaft seien folgende Ansätze genannt:

- ▶ Carbonfaserbeton: Ersatz von Stahlbewehrungen, Reduzierung des Betoneinsatzes aufgrund von Festigkeit und Korrosionsbeständigkeit; Recyclingstrategie für Carbonfaserbetone derzeit noch unklar.
- ▶ Betonrecycling: Inwieweit sich durch den verstärkten Einsatz von Recyclingbeton ggf. die Zementproduktion reduziert oder bestimmte Fraktionen als Zuschlagstoffe einsetzbar sind, was zu einer direkten Einsparung von CO₂-Emissionen führen könnte, ist noch unklar.
- ▶ Substitution: Partiiell kann Beton im Hochbau durch weniger emissionsintensive Baustoffe wie Ziegel oder Holz ersetzt werden. Von einer vollständigen Substitution von Beton durch Holz wird derzeit nicht ausgegangen, da die dafür nötigen Hölzer nicht in ausreichender Menge zur Verfügung stehen.

3.5 Möglichkeiten zur Anwendung von CCU

Der Einsatz von CCU³ als Maßnahme, den direkten CO₂-Ausstoß der Zementherstellung zu mindern, wird in der Zementindustrie derzeit intensiv diskutiert. Bereits auf einer Veranstaltung der europäischen Zementindustrie im November 2016 in Mons (Belgien) wurden verschiedene Ansätze für eine mögliche Abscheidung von CO₂ vorgestellt (s.a. <http://hosting.ums.ac.be/html/ecrachair/event2016.htm>). Dabei geht es in den meisten Projekten vordergründig darum, das CO₂ im Abgas auf bis zu 80 Vol-% anzureichern (z.B. Oxyfuel-Verfahren, separierte Vorkalzinerung des eingesetzten Kalksteins), um die Abscheideeffizienz zu erhöhen.

Das abgeschiedene CO₂ kann dann physikalisch, stofflich oder energetisch genutzt werden. Die CO₂-Speicherung im Sinne von CCS ist im europäischen und internationalen Kontext weiterhin in der Diskussion. Eine Speicherung des gasförmigen CO₂ untertage, z.B. in alten Erdgasspeichern, wird vom UBA allerdings aktuell kritisch bewertet.

3.6 Fazit

Für die weitestgehende Dekarbonisierung der Zementindustrie bedarf es anders als in anderen Industriesektoren Maßnahmen entlang der gesamten Wertschöpfungskette.

Eine deutliche Reduzierung der durch die Zementproduktion selbst verursachten brennstoffbedingten CO₂-Emissionen ist durch Umstellung auf regenerative Energieträger grundsätzlich möglich. Dies ist von der Verfügbarkeit regenerativer Energieträger abhängig und bedarf gleichzeitig geeigneter wirtschaftlicher Rahmenbedingungen.

³ Carbon Capture and Utilization; CO₂-Abscheidung und -Verwendung.

Da aber eine vollständige Vermeidung rohstoffbedingter Emissionen aus der Zementklinkerproduktion nicht möglich ist, ist auch in Zukunft mit CO₂-Emissionen aus der Zementindustrie zu rechnen. Deren direkte Freisetzung kann aktuell nur durch Abscheidung vermieden werden. Das abgeschiedene CO₂ kann dann physikalisch, stofflich oder energetisch genutzt werden. Die Abscheidung allerdings verhindert nicht, dass das CO₂ ggf. an anderer Stelle freigesetzt wird und im Sinne eines geschlossenen Kohlenstoffkreislaufs dann wieder abgeschieden werden müsste. Für die Bewertung von CCU-Maßnahmen sind der erforderliche Energiebedarf, die damit verbundenen CO₂-Emissionen (insbesondere in einem noch nicht voll-ständig auf erneuerbare Energien umgestellten Energiesystem) und der Verwertungspfad von besonderer Bedeutung.

Die CO₂-Speicherung im Sinne von CCS ist im europäischen und internationalen Kontext weiterhin in der Diskussion. Eine Speicherung des gasförmigen CO₂ untertage, z.B. in alten Erdgasspeichern, wird vom UBA allerdings aktuell kritisch bewertet.

Die Umstellung auf regenerative Energieträger und die Abscheidung und Nutzung von CO₂ wird erhebliche Investitionen in die Techniken selbst, aber auch Investitionen in die Infrastruktur erfordern.

4 Transformationshindernisse

Als Transformationshindernisse sind aktuell vor allem zu benennen: Fehlende technische Lösungen, mangelnde Verfügbarkeit erneuerbarer Energieträger oder alternativer Rohmaterialien, hoher Investitionsbedarf, lange Investitionszyklen, Gefahr eines Carbon leakage, Erhöhung der Betriebskosten, Umsetzung von Maßnahmen nicht wirtschaftlich

5 Aktuelle Forschungsprojekte und weiterer Handlungsbedarf

Ein vom UBA vergebenes Forschungsvorhaben, das im Jahr 2019 abgeschlossen wurde, untersuchte die Ressourceneffizienzpotenziale der deutschen Zementindustrie (Ruppert, Wagener et al. 2019). Dabei wurden sowohl Aspekte der Material- als auch der Energieeffizienz adressiert. Ebenfalls berücksichtigt wurden innovative Herstellungsverfahren und neue Produktentwicklungen.

Während in einem im Jahr 2016 vom UBA vergebenen (und noch laufenden) Forschungsvorhaben auch Abwärmepotenziale für die Zementindustrie abgeschätzt werden, geht es in einem im Jahr 2019 gestarteten Vorhaben darum, Möglichkeiten zur strombasierten Prozesswärmeerzeugung zu untersuchen. Dabei werden auch Optionen für die Zementindustrie betrachtet.

In einem weiteren noch laufenden Forschungsvorhaben lässt das UBA derzeit Möglichkeiten und Grenzen der Entsorgung carbonfaserverstärkter Kunststoffabfälle in thermischen Prozessen unter Berücksichtigung möglicher Risiken im Umgang mit den prozessspezifischen Reststoffen untersuchen. Daraus lassen sich ggf. auch Anregungen für das Recycling von Carbonfaserbetonen ableiten.

Die Erreichung der Ziele einer weitestgehenden CO₂-Minderung bedarf großer Veränderungen in einem traditionellen Sektor. Für die Akzeptanz der Ziele und der Notwendigkeit intrinsischer Veränderungen bedarf es eines intensiven Dialogprozesses mit der Industrie selbst und relevanten Stakeholdern (z.B. Anlagenbauern und Forschungseinrichtungen). Im Ergebnis dieses Dialogs sollte eine Roadmap mit klar definierten Zwischenzielen erarbeitet sein. Die Eckpunkte

einer mit einem klaren Zeitplan versehenen Roadmap für die Zementindustrie will das UBA im Rahmen eines Anfang 2020 startenden Forschungsvorhabens erarbeiten lassen.

Auch wenn CCU und CCS für die Zementindustrie aktuell (zumindest öffentlich) im Fokus stehen, sollten insbesondere die Möglichkeiten und Fragen zur Umstellung der Produktion auf strombasierte und andere alternative Produktionsverfahren untersucht werden.

6 Quellenverzeichnis

DEHSt (2019). Treibhausgasemissionen 2018 - Emissionshandelspflichtige stationäre Anlagen und Luftverkehr in Deutschland (VET-Bericht 2018). VET-Bericht. Berlin, Deutsche Emissionshandelsstelle im Umweltbundesamt: 1-124.

Hoening, V., et al. (2013). "Energieeffizienz in der Zementindustrie; Teil 1." Cement International 11(3/2013): 50-67.

Icha, P. und G. Kuhs (2019). Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990-2018: Aktualisierung auf Basis von Climate Change 15/2017. Climate Change / Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau: 1.

Locher, F. W. (2006). Cement: principles of production and use. Düsseldorf, Verlag Bau + Technik GmbH.

Ruppert, J., et al. (2020). Prozesskettenorientierte Ermittlung der Material- und Energieeffizienzpotentiale in der Zementindustrie: Abschlussbericht (UFOPLAN FKZ 3716 36 320 0) - in Veröffentlichung. Dessau-Roßlau, Umweltbundesamt: 1-150.

VDZ (2019). Umweltdaten der deutschen Zementindustrie 2018. Düsseldorf, VDZ (Verein Deutscher Zementwerke e.V.).

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
[f/umweltbundesamt.de](https://www.facebook.com/umweltbundesamt.de)
[t/umweltbundesamt](https://twitter.com/umweltbundesamt)

Autorenschaft, Institution

Fachgebiet III 2.2

Stand: 02/2020