



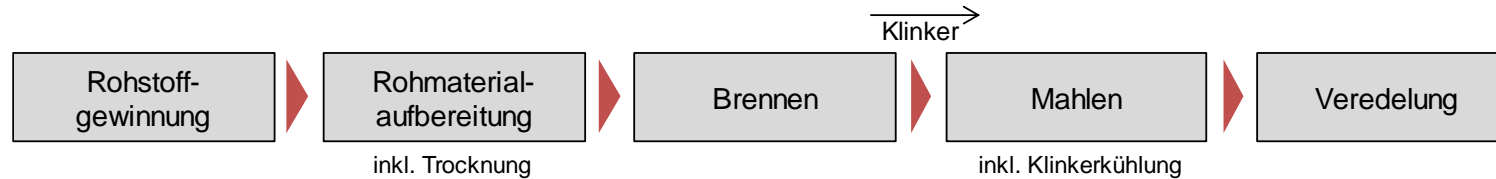
FFE

CO₂-Verminderung in der Zementherstellung

Andrej Guminski, Elsa Rouyrre, Manuel Wiener
27.11.2019

2019

Prozessablaufdiagramm Zementherstellung



Prozessbeschreibung:

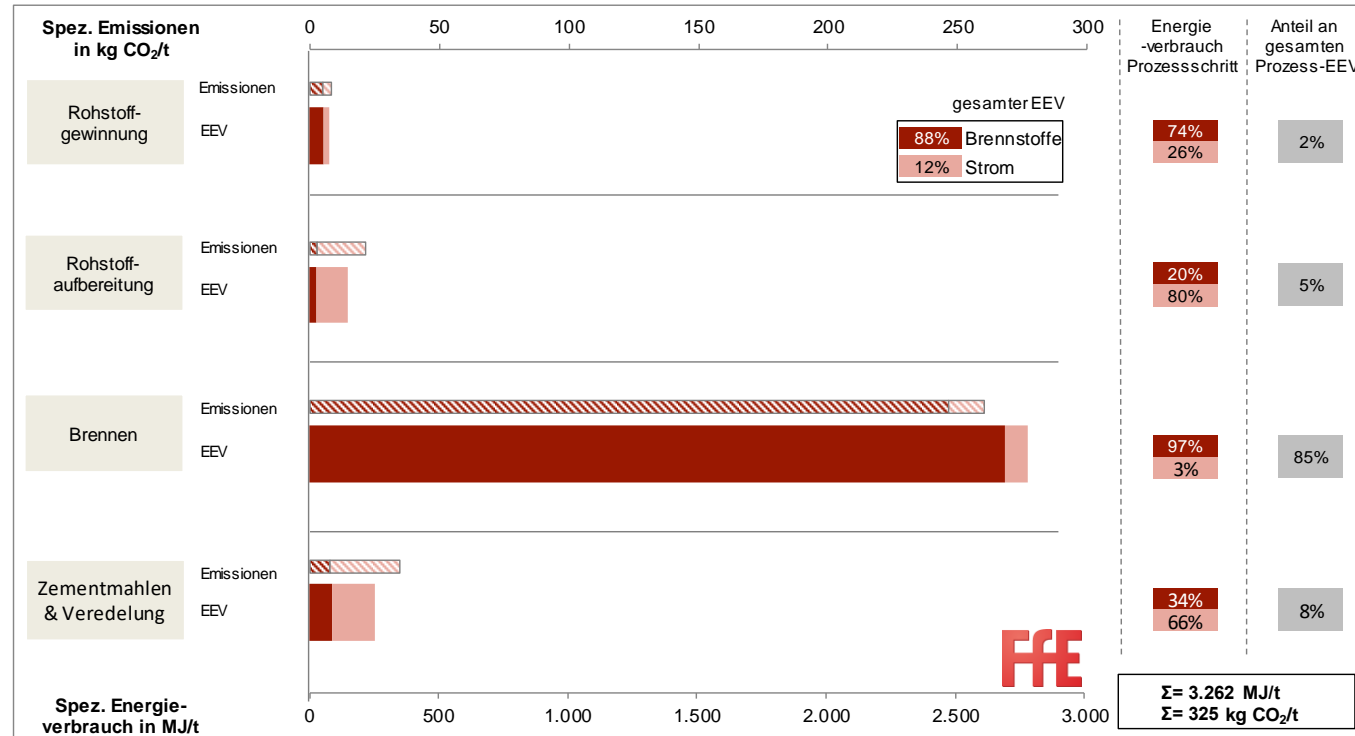
Wie aus dem Prozessablaufdiagramm hervorgeht, kann die Zementherstellung in vier Prozessschritte unterteilt werden. Die bedeutendsten Zementrohstoffe Kalkstein oder Kreide und Ton werden als Kalksteinmergel in Steinbrüchen durch Sprengen gewonnen. Das gewonnene Gestein wird anschließend zu meist geographisch nahegelegenen Zementwerken transportiert.

Die Rohstoffaufbereitung dient vor allem der Homogenisierung und Zerkleinerung des gewonnenen Rohmaterials. Eine gleichbleibende Zusammensetzung des ofenfertigen Rohguts ist wesentliche Voraussetzung für die Qualität des Endproduktes. Dazu wird das Rohmaterial in Mühlen gemahlen und unter Zugabe von Heißgas, welches hauptsächlich aus den Ofenabgasen besteht, getrocknet. Um die erforderliche chemische Zusammensetzung des Rohmehls einzustellen, erfolgt eine Zugabe von Korrekturkomponenten und Sekundärrohstoffen /VDZ 01 08/, /VDZ 02 16/, /BLES 01 13/. Anschließend wird das zerkleinerte Rohmehl in Silos homogenisiert und zwischengelagert.

Im nachfolgenden Brennprozess entsteht der sogenannte Zementklinker. Der Drehrohrofen wird im Gegenstromverfahren mit Rohmaterial beschickt und dieses wird auf eine Temperatur von bis zu 1450° C erhitzt. An dem Brennprozess im Drehrohrofen schließt sich die Klinkerkühlung an. Der größte Teil der Kühlluft wird dem Ofen als Verbrennungsluft zugeführt oder zur Vorwärmung des Rohmaterials verwendet.

In einem weiteren Prozessschritt wird der Klinker allein oder je nach Zementart mit weiteren Zusatzstoffen wie beispielsweise Hüttensand, Kalkstein oder Flugasche feingemahlen /VDZ 01 14/. Nach europäischer Norm unterscheidet man zwischen fünf Zementkategorien, welche sich in der Zementzusammensetzung und vor allem bezüglich des Klinkeranteils unterscheiden. Zur Mahlung werden neben den sehr verbreiteten Kugelmühlen auch Gutbett-Walzenmühlen und Vertikal-Wälzmühlen eingesetzt. Der entstandene Zement wird in Silos gelagert und als Sack- oder Siloware versandt /VDZ 01 08/, /VDZ 02 16/.

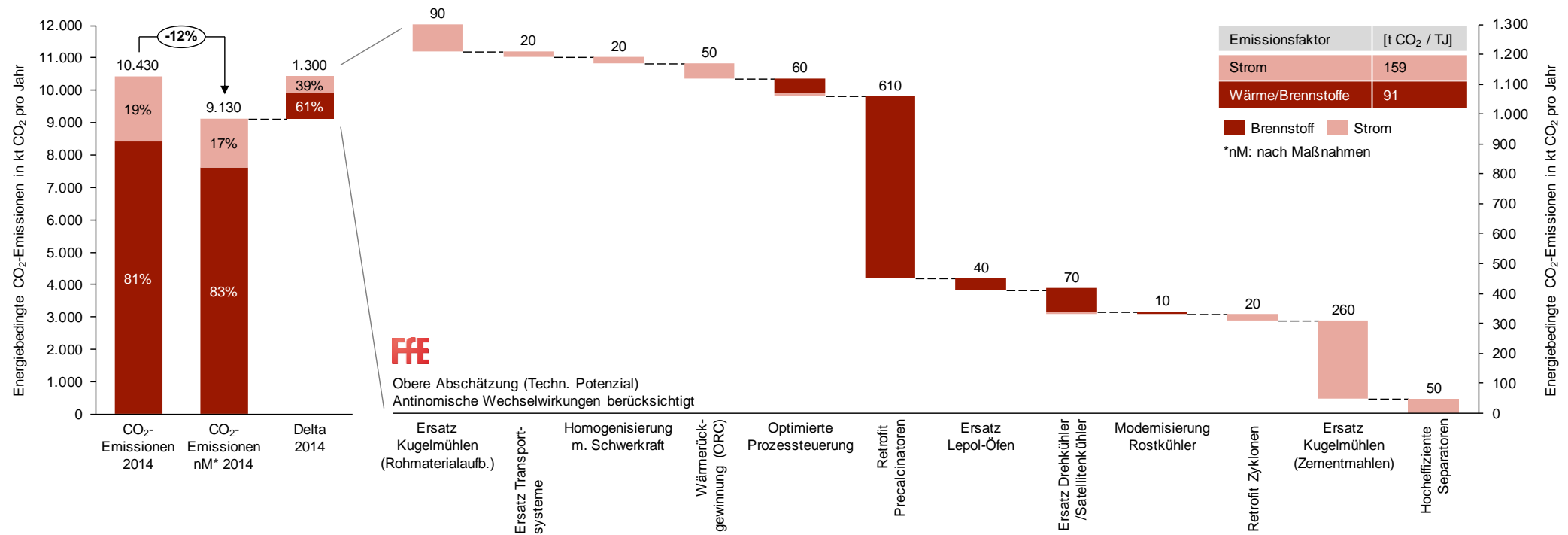
Spezifischer Energieverbrauch in MJ/t und spezifische CO₂-Emissionen in kg CO₂/t der Zementherstellung



- Zementproduktion in Deutschland: 32,1 Millionen Tonnen in 2014 /VDZ-01 15/
- Durchschnittlicher Energieverbrauch von 3.300 MJ pro Tonne Zement in 2014 /VDZ-01 16/ /VDZ-01 15/
- Deckung des Energiebedarfs zu 88 % über Brennstoffe und zu 12 % über Strom /VDZ-01 16/
- Mehr als 63 % der Brennstoffe stellten alternative Brennstoffe dar.* /VDZ-01 16/
- Brennen ist mit über 85 % des gesamten Energieverbrauchs der energieintensivste Prozessschritt. /FFE-22 17/
- Stromeinsatz vor allem zur Rohstoffaufbereitung bzw. Zementmahlen /ECA-01 13/
- Durchschnittliche energiebedingte CO₂-Emissionen von 325 kg pro Tonne Zement in 2014 /VDZ-01 16/
- Darüber hinaus prozessbedingte CO₂-Emissionen von 390 kg pro Tonne Zement /VDZ-02 15/

* Alternative Brennstoffe „stammen oft aus Materialien, die für andere Verwendungszwecke produziert oder verwendet wurden und am Ende ihrer Nutzungsdauer auf einem thermischen Weg weiterverwertet werden“ /VDZ 01 12/. In der Zementindustrie wurden hierbei u.a. Altreifen, Tiermehle, Siedlungsabfälle und Klärschlamm eingesetzt /VDZ-02 15/.

Auswirkungen quantifizierter CO₂-Verminderungsmaßnahmen auf die CO₂-Emissionen in der Zementherstellung



Herleitung des maximalen technischen CO₂-Verminderungspotenzials der Effizienzmaßnahmen in der Zementherstellung (1)

Kurzbezeichnung	Beschreibung	Maximales technisches Potenzial und Zukunftsfähigkeit
Ersatz von Kugelmühlen (Rohmaterial-aufbereitung)	Der Ersatz von Kugelmühlen durch wesentlich energieeffizientere vertikale Walzenmühlen (inkl. Separator) führt zu einer Senkung des Stromverbrauchs und damit auch zu einer Einsparung von Emissionen /EOLB-03 08/, /BOH-01 07/	<p>Maximales technisches Potenzial: 100 kt CO₂/a</p> <p>Herleitung:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Spez. Einsparpotenzial Strom: 11 kWh / t Zement /IER-03 14/, /FEA-01 16/, /FFE-22 17/, /BLES-01 13/, /MKULNV-01 13/ - Anwendungsfaktor: 58 % /IER-03 14/
Ersatz Transportsysteme (Rohmaterial-aufbereitung)	Durch den Ersatz von pneumatischen Transportsystemen durch mechanische Systeme kann Strom eingespart und damit Emissionen vermindert werden /EOLB-03 08/.	<p>Maximales technisches Potenzial: <100 kt CO₂/a</p> <p>Herleitung:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Spez. Einsparpotenzial Strom: 3 kWh / t Zement /IER-03 14/, /FEA-01 16/ - Anwendungsfaktor: 57 % /IER-03 14/
Homogenisierung mittels Schwerkraft (Rohmaterial-aufbereitung)	<p>Das Homogenisieren kann dadurch erfolgen, dass das Rohmehl durch Luft fluidisiert und anschließend mechanisch umgewälzt bzw. im Kreislauf gefördert wird. Alternativ dazu bieten sich sog. Schwerkraftmischer an. Obwohl diese nicht dieselbe Effektivität bzgl. der Vermengung / Homogenisierung des Rohmaterials erreichen, rechtfertigen die signifikanten Energieeinsparungen den Einsatz von Schwerkraftmischern.</p> <p>Hierbei strömt das Rohmaterial von oben entlang eines oder mehrerer Innenrohre durch einen Kegel in Richtung Entnahmeöffnung. Eine Umwälzung des Materials im Durchlauf erfolgt im engeren Sinne nicht. Das Material vermischt sich beim Vereinigen am Siloauslauf. /EOLB-03 08/</p>	<p>Maximales technisches Potenzial: <100 kt CO₂/a</p> <p>Herleitung:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Spez. Einsparpotenzial Strom: 3 kWh / t Zement /IER-03 14/, /FEA-01 16/ - Anwendungsfaktor: 62 % /IER-03 14/
Wärmerück-gewinnung (ORC) (Brennen)	<p>Strom, welcher aus industrieller Abwärme gewonnen wird, ist gleichsam emissionsfrei. Durch den Organic Rankine Cycle (ORC) kann bereits bei relativ geringen Temperaturniveaus (ab 70 bis 80 °C) Strom aus Wärme erzeugt werden. Daher bietet sich ORC vor allem auch zur Nutzung von Abwärme aus Industrieprozessen an. /QUO-01 13/</p> <p>Hier wird Abwärme aus dem Drehrohrofen verwendet.</p>	<p>Maximales technisches Potenzial: <100 kt CO₂/a</p> <p>Herleitung:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Spez. Einsparpotenzial Strom: 9 kWh / t Zement /BLES-01 13/, /CAM 01 13/, /IER-03 14/, /FEA-01 16/, /EOLB-03 08/ - Anwendungsfaktor: 42 % /IER-03 14/

Herleitung des maximalen technischen CO₂-Verminderungspotenzials der Effizienzmaßnahmen in der Zementherstellung (2)

Kurzbezeichnung	Beschreibung	Maximales technisches Potenzial und Zukunftsfähigkeit
Optimierte Prozesssteuerung (Brennen)	Die Maßnahme optimierte Prozesssteuerung beschreibt jegliche Anstrengungen, den Energieverbrauch und die Produktqualität durch Steuerung des Prozesses zu optimieren. Dazu zählen unter anderem automatisierte Systeme, welche mittels Sensoren und Simulationen Echtzeitinformationen bereitstellen und auswerten und somit eine Beeinflussung des Prozesses zu jeder Zeit ermöglichen. /EOLB-03 08/	<p><i>Maximales technisches Potenzial: 100 kt CO₂/a</i></p> <p><i>Herleitung:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - Spez. Einsparpotenzial Strom: 2 kWh / t Zement - Spez. Einsparpotenzial Wärme (Zement: Brennstoff): 32 kWh / t Zement /IER-03 14/, /FEA-01 16/ - Anwendungsfaktor: 20 % /IER-03 14/
Retrofit Vorcalcinatoren (Brennen)	Durch die Optimierung von Vorcalcinatoren bei bereits bestehenden Zyklonvorwärmern wird eine Brennstoffreduktion erreicht, da durch den Vorcalcinator ein gleichmäßiger Ofenbetrieb und somit effizienterer Betrieb ermöglicht wird. Durch die steigende Ofenkapazität ergibt sich außerdem eine Energieeffizienzsteigerung. /IER-03 14/, /VDZ-01 08/	<p><i>Maximales technisches Potenzial: 600 kt CO₂/a</i></p> <p><i>Herleitung:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - Spez. Einsparpotenzial Wärme: 119 kWh / t Zement /IER-03 14/, /FEA-01 16/ - Anwendungsfaktor: 65 % /IER-03 14/
Ersatz Lepol-Öfen (Brennen)	Lepol-Öfen (= Ofenanlagen mit Rostvorwärmern) werden ersetzt durch das heutzutage übliche Ofendesign, bestehend aus Zyklonvorwärmeröfen mit Vorcalcinator. Lepol-Öfen haben verfahrensbedingt einen höheren thermischen Energieverbrauch. Allerdings ist ein Umbau zumeist technisch nicht möglich /VDZ-01 08/.	<p><i>Maximales technisches Potenzial: 200 kt CO₂/a</i></p> <p><i>Herleitung:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - Spez. Einsparpotenzial Strom: 5 kWh / t Zement - Spez. Einsparpotenzial Wärme: 250 kWh / t Zement /IER-03 14/, /FEA-01 16/ - Anwendungsfaktor: 2 % /IER-03 14/
Ersatz Drehkühler/ Satellitenkühler (Zementmahlen inkl. Klinkerkühlung)	Neben ihrer höheren Effizienz bieten Rostkühler noch weitere Vorteile. So lassen sich damit geringere Klinkerendtemperaturen erreichen. Durch Rostkühler entsteht keine Kühlerabluft, wodurch die Notwendigkeit einer Entstaubung entfällt. Außerdem haben Rostkühler geringere Abstrahlverluste. Darüber hinaus lassen sich Rostkühler bestens in das heute übliche Ofendesign, bestehend aus Zyklonvorwärmeröfen mit Calcinator und Tertiärluftleitung, einbinden. /VDZ-01 08/ Allerdings steigt der Stromverbrauch dabei leicht an. /EOLB-03 08/	<p><i>Maximales technisches Potenzial: 100 kt CO₂/a</i></p> <p><i>Herleitung:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - Spez. Einsparpotenzial Strom: -3 kWh / t Zement /EOLB-03 08/ - Spez. Einsparpotenzial Wärme: 65 kWh / t Zement /IER-03 14/, /FEA-01 16/, /EOLB-03 08/ - Anwendungsfaktor: 16 % /IER-03 14/

Herleitung des maximalen technischen CO₂-Verminderungspotenzials der Effizienzmaßnahmen in der Zementherstellung (3)

Kurzbezeichnung	Beschreibung	Maximales technisches Potenzial und Zukunftsfähigkeit
<p>Modernisierung Rostkühler (Zementmahlen inkl. Klinkerkühlung)</p>	<p>Durch eine Modernisierung bestehender Rostkühler können zusätzliche Energieeinsparungen realisiert werden. Unter anderem konnten durch die fortschreitende Rostkühlertechnik in den letzten Jahren deutliche Verbesserungen der thermischen Effizienz der gesamten Ofenanlagen erreicht werden. /VDZ-01 08/</p>	<p><i>Maximales technisches Potenzial: <10 kt CO₂/a</i></p> <p><i>Herleitung:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - Spez. Einsparpotenzial Wärme: 7 kWh / t Zement /IER-03 14/, /FEA-01 16/, /MKULNV-01 13/ - Anwendungsfaktor: 16 % /IER-03 14/
<p>Retrofit von Zyklonen (Brennen)</p>	<p>Zyklonen sind ein zentrales Element für das in Deutschland gängige Ofendesign zur Vorwärmung des Materials. Die Maßnahme stellt den Ersatz bestehender Zyklonen durch neuere mit geringerem Druckverlust dar. Dadurch reduziert sich folglich der Stromverbrauch der Ofenabgas-Ventilatoren. /EOLB-03 08/</p>	<p><i>Maximales technisches Potenzial: <100 kt CO₂/a</i></p> <p><i>Herleitung:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - Spez. Einsparpotenzial Strom: 3 kWh / t Zement /IER-03 14/, /FEA-01 16/ - Anwendungsfaktor: 57 % /IER-03 14/
<p>Ersatz Kugelmöhlen (Zementmahlen inkl. Klinkerkühlung)</p>	<p>Der Ersatz von Kugelmöhlen durch wesentlich energieeffizientere vertikale Walzenmöhlen (inkl. Separator) führt zu einer Senkung des Stromverbrauchs und damit auch einer Einsparung von Emissionen /EOLB-03 08/, /VDZ-01 08/, /BOH-01 07/</p>	<p><i>Maximales technisches Potenzial: 300 kt CO₂/a</i></p> <p><i>Herleitung:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - Spez. Einsparpotenzial Strom: 26 kWh / t Zement /FFE-22 17/, /IER-03 14/, /FEA-01 16/ - Anwendungsfaktor: 56 % /IER-03 14/
<p>Retrofit hocheffiziente Separatoren (Zementmahlen inkl. Klinkerkühlung)</p>	<p>Separatoren/ Fliehkraftabscheider/ Sichter werden eingesetzt, um gemahlene Zement als Feingut abzuscheiden. Zu schwere oder große Teile hingegen gelangen zurück in die Möhlen. Durch den Einsatz von Hochleistungssichtern bzw. hocheffizienten Fliehkraftabscheidern kann der Energieverbrauch für die Sichtung gesenkt werden. /VDZ-01 08/</p>	<p><i>Maximales technisches Potenzial: <100 kt CO₂/a</i></p> <p><i>Herleitung:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - Spez. Einsparpotenzial Strom: 4 kWh / t Zement /IER-03 14/, /FEA-01 16/ - Anwendungsfaktor: 61 % /IER-03 14/

Herleitung des maximalen technischen CO₂-Verminderungspotenzials der Effizienzmaßnahmen in der Zementherstellung (4)

(keine Potenzialbestimmung):		
Verbessertes Mahlmedium für die Kugelmühlen (Rohmaterial-aufbereitung und Zementmahlen inkl. Klinkerkühlung)	Das Mahlmedium ist das bestimmende Charakteristikum für die Kugelmühlen und nutzt sich mit der Zeit ab. Durch verbesserte und verschleißresistente Werkstoffe der Mahlkörper kann der Energieverbrauch reduziert werden. /EOLB-03 08/	<i>Antinomische Wechselwirkung mit Ersatz Kugelmühle /IER-03 14/</i>
Veränderung der Zementzusammensetzung (Allgemein)	Bedeutende Potenziale werden in der Zementindustrie in der Zementzusammensetzung gesehen. Durch das Ersetzen von Zementklinker durch Zusatzstoffe/ Nebenbestandteile (engl. supplementary materials) können sowohl prozess- als auch energiebedingte CO ₂ -Emissionen gesenkt werden. Darüber hinaus können alternative Bindemittel den Energieverbrauch der Zementherstellung vermindern. In Deutschland kommen hierbei derzeit beispielsweise Hüttensand, Kalkstein, Flugasche und Puzzolane oder gebrannte Ölschiefer zum Einsatz. /VDZ-02 15/, /FFE-39 17/	<i>Betrifft allerdings die Modifikation des Produkts und wird deswegen hier nicht behandelt.</i>
Alle Maßnahmen	Summe der Maßnahmen	Maximales technisches Potenzial: 1.300 kt CO ₂ /a

- BLESL-01 13** Blesl, Markus; Kessler, Alois: Energieeffizienz in der Industrie in: Springer Verlag. Berlin Heidelberg: Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER), Universität Stuttgart, EnBW Energie Baden-Württemberg AG, Forschung und Innovation, Karlsruhe, 2013.
- BOH-01 07** Bohnet, Matthias: Mechanische Verfahrenstechnik. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2007
- CSI-01 17** Development of State of the Art-Techniques in Cement Manufacturing: Trying to Look Ahead; CSI/ECRA Technology Papers 2017. European Cement Research Academy; Cement Sustainability Initiative, Düsseldorf, Geneva, 2017
- ECA-01 13** The role of CEMENT in the 2050 LOW CARBON ECONOMY. Brüssel, Belgien: European Cement Association, 2013
- ECDGE-01 16** Fleiter, Tobias et al.: Mapping and analyses of the current and future (2020 - 2030) heating/cooling fuel deployment (fossil/renewables) - Work package 2: Assessment of the technologies. Brussels: European Commission Directorate-General for Energy and Transport, 2016
- EOLB-03 08** Worrell, Ernst; Galitsky, Christina: Energy Efficiency Improvement and Cost Saving Opportunities for Cement Making - An ENERGY STAR® Guide for Energy and Plant Managers. Berkeley, Kalifornien: Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Lab, 2008
- FEA-01 16** Patel, Martin K.; Zuberi, M. Jibrán S.: Bottom-up analysis of energy efficiency improvement and CO₂ emission reduction potentials in the Swiss cement industry in: Journal of Cleaner Production. Amsterdam: Elsevier, 2016
- FFE-22 17** Anonymer Manager im Bereich Umweltschutz eines weltweit führenden Zementherstellers (Standort Deutschland): Experteninterview am 18.04.2017 - CO₂-Verminderung in der Zementherstellung. München: FfE GmbH, 2017
- FFE-39 17** Lemke, Jost (thyssenkrupp Industrial Solutions): Experteninterview am 20.04.2017 - CO₂-Verminderung in der Industrie. München: FfE GmbH, 2017
- IER-03 14** Brunke, Jean-Christian; Blesl, Markus: Energy conservation measures for the German cement industry and their ability to compensate for rising energy-related production costs in: Journal of Cleaner Production. Amsterdam: Elsevier, 2014
- MKULNV-01 13** Branchenpapier Verarbeitung v. Steinen und Erden (insb. Zement) in: Klimaschutzplan Nordrhein-Westfalen. Düsseldorf: Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen, 2013

Quellen

- QUO-01 13 Quoilin, Sylvain et al.: Techno-economic survey of Organic Rankine Cycle (ORC) systems in: Renewable & Sustainable Energy Reviews (Volume 22, Pages 168-186). Amsterdam: Elsevier, 2013
- UBA-02 16 Icha, Petra: Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 bis 2015. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt (UBA), 2016
- VDZ-01 08 Zement-Taschenbuch 51. Ausgabe. Düsseldorf: Verein Deutscher Zementwerke e.V., 2008
- VDZ-01 12 Schneider, Martin: Tätigkeitsbericht 2009 – 2012. Düsseldorf: VDZ gGmbH, 2012
- VDZ-06 13 Hoenig, Dr.-Ing. et al.: Energy efficiency in cement production in: Cement International, 3/2013, Vol. 11. Erkrath: Verlag Bau+Technik GmbH, 2013
- VDZ-01 14 Bosold, Diethelm; Pickhardt, Roland: Zemente und ihre Herstellung - Zement-Merkblatt Betontechnik. Düsseldorf: Verein Deutscher Zementwerke e.V., 2014
- VDZ-01 15 Umweltdaten der deutschen Zementindustrie - Environmental Data of the German Cement Industry. Düsseldorf: Verein Deutscher Zementwerke e.V., 2015
- VDZ-01 16 Verein Deutscher Zementwerke e.V.: Zementindustrie in Deutschland 2016 - Zahlen und Daten. Düsseldorf: Verein Deutscher Zementwerke e.V., 2016
- VDZ-02 15 Umweltdaten der deutschen Zementindustrie. Düsseldorf: Verein Deutscher Zementwerke e.V., 2015
- VDZ-02 16 Schneider, Martin: Zementindustrie im Überblick 2016/2017. Düsseldorf: Verein Deutscher Zementwerke e.V., 2016