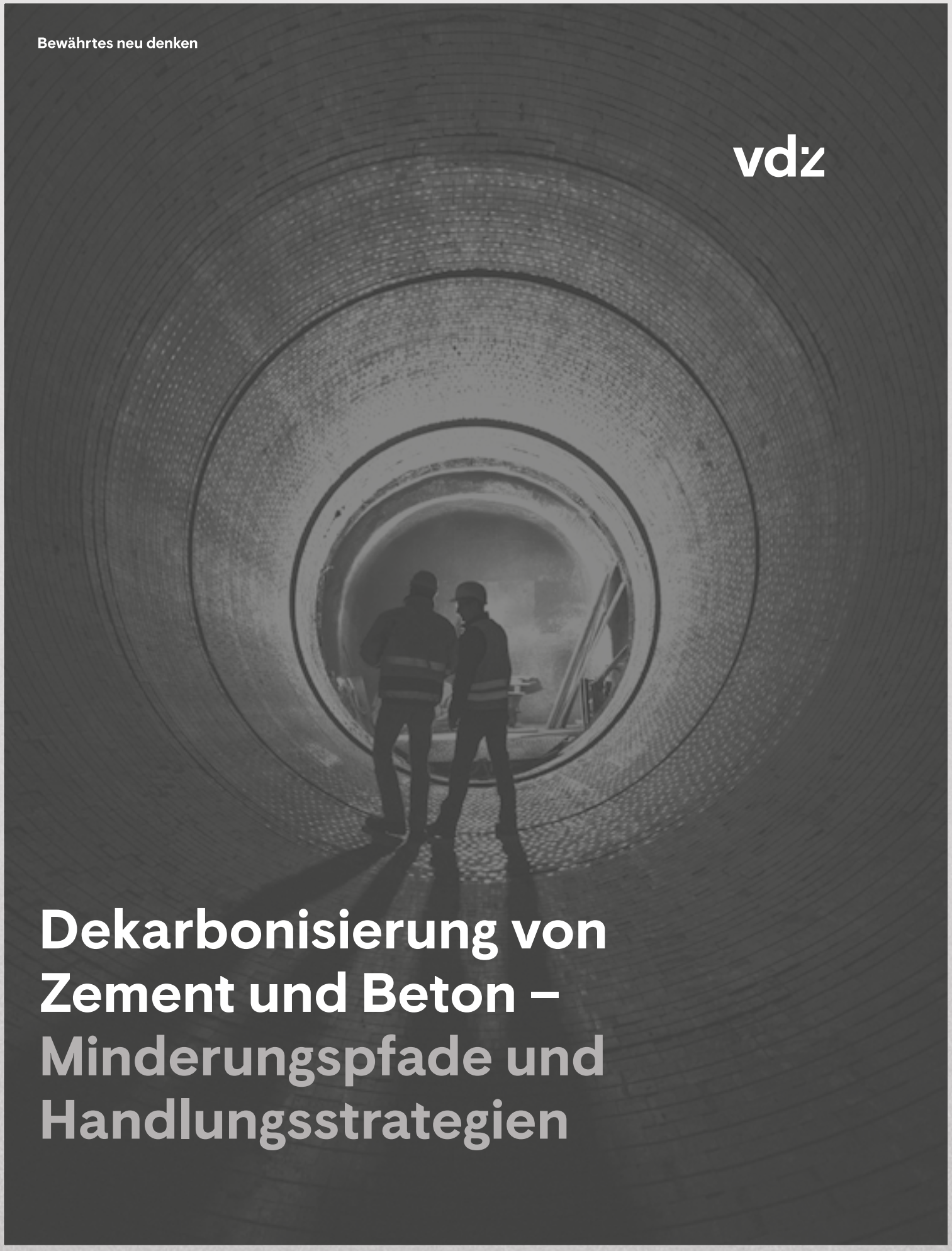
Bewährtes neu denken

vdz



Dekarbonisierung von Zement und Beton – Minderungspfade und Handlungsstrategien

Eine CO_2-Roadmap für die deutsche Zementindustrie

Die deutsche Zementindustrie auf dem Weg in eine CO_2-freie Zukunft – Zusammenfassung und Ergebnisse 4

1
Die Dekarbonisierung von Zement und Beton – Einführung 10

2
Herausforderungen für eine klimaneutrale Wertschöpfungskette Zement und Beton 12

2.1 Technische Herausforderungen
2.2 Ökonomische und politische Herausforderungen
2.3 Gesellschaftliche Herausforderungen

3
Technologien und Innovationen für eine klimaneutrale Betonbauweise 16

3.1 Klinker: Minderung brennsto - und prozessbedingter CO_2-Emissionen
3.2 Zement: Klinkere ziente Zemente und neue Bindemittel
3.3 Beton: Ressourcene zienz und Recarbonatisierung

4
Szenarien zur Dekarbonisierung von Zement und Beton 36

4.1 Aufbau der Szenarien
4.2 CO_2-Bilanzgrenzen
4.3 Ergebnisse und Bewertung der Szenarien
4.4 Methodik und Annahmen

5
Handlungsfelder und Voraussetzungen für eine erfolgreiche Transformation 46

5.1 Erneuerbare Energien und Stromnetze
5.2 Infrastruktur für den CO_2-Transport
5.3 Bauen mit zunehmend CO_2-freien Zementen und Betonen
5.4 Rahmen für Wettbewerbsfähigkeit und Innovationen
5.5 Gesellschaftlicher Konsens über Technologiemix der Zukunft

Literaturverzeichnis 54

Abbildungsverzeichnis 57

Die deutsche Zementindustrie auf dem Weg in eine CO_2-freie Zukunft – Zusammenfassung und Ergebnisse

Zusammenfassung und Ergebnisse

Die Zementindustrie in Deutschland und damit die gesamte Wertschöpfungskette von Zement und Beton stehen auf dem Weg zur Klimaneutralität vor großen Herausforderungen. Hintergrund ist, dass bei der Herstellung von Zement bzw. seinem Vorprodukt Zementklinker große Mengen an CO_2 freigesetzt werden. Rund zwei Drittel davon entfallen auf rohstobedingte Prozessemissionen aus der Entsäuerung des Kalksteins und rund ein Drittel auf energiebedingte CO_2-Emissionen aus dem Einsatz der Brennstoffe.

Seit 1990 ist es den deutschen Zementherstellern gelungen, die CO_2-Emissionen sowohl spezifisch als auch absolut in einer Größenordnung von 20 bis 25 % zu reduzieren. Entscheidend für diese Minderungserfolge waren neben Verbesserungen der thermischen Effizienz vor allem zwei Faktoren: erstens die Senkung der Klinkergehalte im Zement und zweitens der verstärkte Einsatz biomassehaltiger alternativer Brennstoffe, durch die fossile Energieträger mehrheitlich ersetzt wurden.

Bei der weiteren Minderung ihrer CO_2-Emissionen stößt die Zementindustrie jedoch zunehmend an Grenzen, denn insbesondere die prozessbedingten CO_2-Emissionen der Klinkerherstellung sind mit konventionellen Maßnahmen nicht zu mindern. Eine entscheidende Rolle bei der Dekarbonisierung von Zement und Beton werden daher neben teils neuen, CO_2-effizienten Rohstoffen für die Klinker-, Zement- und Betonherstellung vor allen Dingen die Abscheidung von CO_2 im Zementwerk und dessen Nutzung bzw. Speicherung („Carbon Capture and Utilisation/Storage“ – CCUS) spielen.

Die Zementindustrie in Deutschland ist sich ihrer Verantwortung bewusst, die sie für die Dekarbonisierung von Zement und Beton übernehmen muss. Klar ist aber auch, dass sie diesen Kraftakt nicht alleine schultern können wird. Sie benötigt dafür die Mitwirkung der gesamten Wertschöpfungskette, angefangen mit dem Anlagenbau und den Betonherstellern über die bauausführende Industrie bis hin zu Planern und Architekten. Daneben bedarf es eines wirksamen politischen Instrumentenmix, der eine wettbewerbsfähige Produktion zunehmend CO_2-freier Zemente und Betone in Deutschland ermöglicht und gleichzeitig Märkte für diese Produkte fördert, obwohl sie in der Herstellung in der Regel deutlich teurer sein werden als konventionell produzierte Alternativen.

Aus technischer Sicht wird es zudem ohne die notwendige Infrastruktur – etwa für eine flächendeckende CO_2-freie Stromnutzung oder den Transport von CO_2 und Wasserstoff – nicht möglich sein, diese Transformation erfolgreich zu gestalten. Letztlich müssen auch die Menschen vor Ort und die Gesellschaft insgesamt bereit sein, die technischen und wirtschaftlichen Veränderungen mitzutragen, damit die Dekarbonisierung der Industrie gelingen und das Ziel einer klimaneutralen Gesellschaft erreicht werden kann.

Dekarbonisierung von Zement und Beton – Szenarien bis zum Jahr 2050

Die vorliegende Studie beschreibt Pfade für die Dekarbonisierung von Zement und Beton bis zum Jahr 2050. Konkret werden zwei Szenarien zur Minderung direkter CO_2-Emissionen für die deutsche Zementindustrie und die gesamte Wertschöpfungskette Zement und Beton entwickelt: ein ambitioniertes Referenzszenario und ein Szenario Klimaneutralität. Das **ambitionierte Referenzszenario** basiert im Kern auf dem Einsatz heute verfügbarer CO_2-Minderungstechnologien und legt hierbei sehr anspruchsvolle Annahmen zugrunde. Es ist insofern keineswegs als „business-as-usual“-Pfad zu verstehen. Neben weiteren deutlichen Steigerungen der thermischen Effizienz und des Einsatzes biomassehaltiger alternativer Brennstoffe wird hier beispielsweise auch ein breiter Einsatz von CO_2-effizienten CEM II/C-Zementen angenommen, deren Normung in Kürze abgeschlossen sein wird. Mit einem Klinkeranteil zwischen 50 und 65 % kann diese neue Zementart bereits deutlich zur CO_2-Minderung beitragen. Zudem führen Weiterentwicklungen der Betonbauweise im Sinne der Ressourceneffizienz zu Materialeinsparungen und damit auch in gewissem Umfang zur CO_2-Reduzierung.

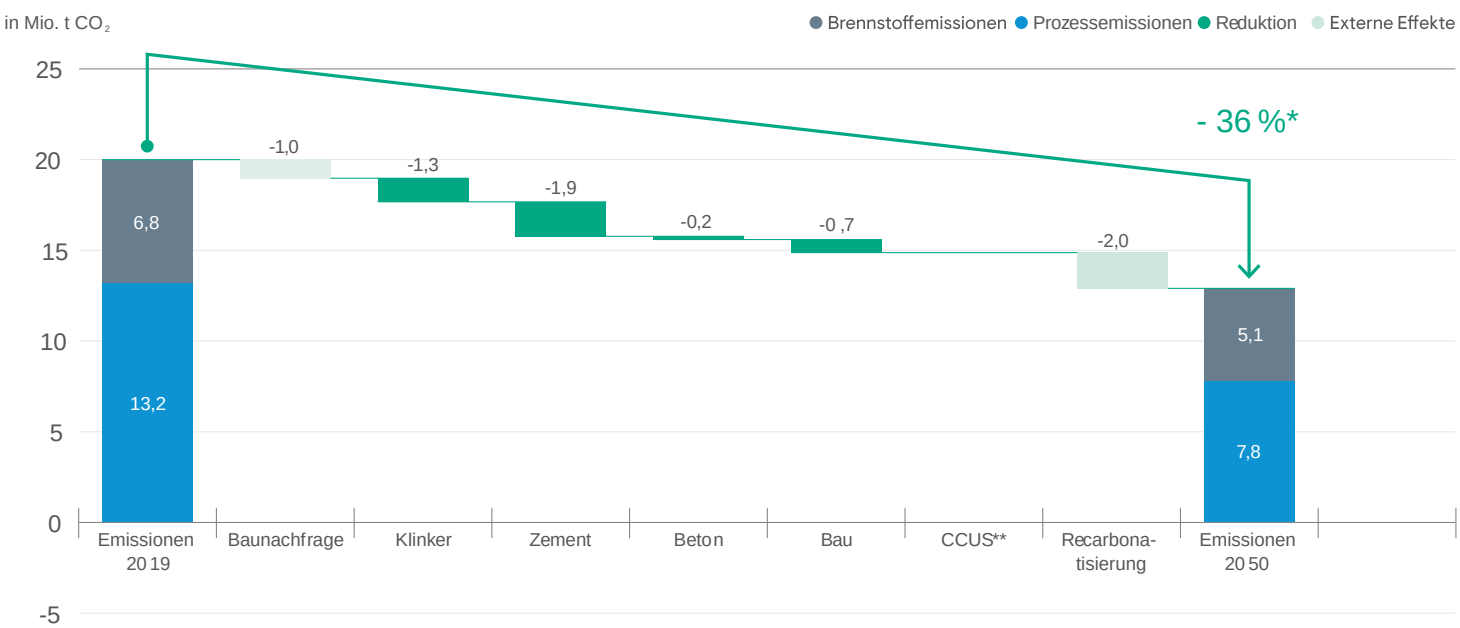
Das **Szenario Klimaneutralität** geht über das ambitionierte Referenzszenario noch einmal hinaus und stößt damit an die Grenzen des aus heutiger Sicht technisch Machbaren. Wesentlicher Unterschied gegenüber dem Referenzszenario ist die zusätzliche Anwendung von Breakthrough-Technologien. Hierzu zählen etwa die Markteinführung von CEM VI-Zementen mit einem Klinkeranteil zwischen 35 und 50 % oder der Einsatz von Wasserstoff als Energieträger. Außerdem werden weitere Effizienzsteigerungen und Innovationen in der Herstellung und Anwendung von Beton angenommen.

Letztlich kommt auch die Abscheidung von CO_2 und dessen anschließende Nutzung und Speicherung (CCUS) zum Einsatz. Dies setzt voraus, dass alle übrigen Minderungspotenziale – auch die der konventionellen Technologien – soweit ausgeschöpft sind, dass sich die Anwendung von CCUS nur auf diejenigen CO_2-Mengen beschränkt, die auf anderem Wege nicht gemindert werden können.

Für das ambitionierte Referenzszenario ergibt sich bis 2030 eine Minderung der CO_2-Emissionen um 19% gegenüber dem Status quo im Jahr 2019 (ca. 40 % gegenüber 1990). Bis 2050 wird ohne den Einsatz von Breakthrough-Technologien wie CCUS eine Minderung um 36% gegenüber 2019 erreicht (Abbildung 1). Dies entspricht rund 50% gegenüber 1990. Zum Vergleich: Die Emissionen aus dem Einsatz der Brennsto e machen heute rund ein Drittel der Gesamtemissionen in der Zementindustrie aus. Die CO_2-Minderung von 36 % bis 2050 kommt somit einer vollständigen Reduktion in Höhe der heutigen Brennsto emissionen gleich. Dies zeigt, wie ambitioniert das Referenzszenario bereits ausgelegt ist und verdeutlicht zugleich, dass die Vermeidung der verbleibenden, in erster Linie Prozessemissionen, ohne Breakthrough-Technologien nicht möglich ist.

Im klimaneutralen Szenario ergibt sich bereits bis 2030 eine CO_2-Minderung von rund 27 % gegenüber 2019 (ca. 55% gegenüber 1990). Hierbei spielen erste Demonstrationsanlagen zur Abscheidung von CO_2 im industriellen Maßstab eine große Rolle. Auf diese Weise könnten aus heutiger Sicht rund 1 Mio. Tonnen CO_2 im Jahr 2030 eingespart werden. Bis 2050 erreicht die Zementindustrie im Szenario Klimaneutralität unter Ausschöpfung aller verfügbaren CO_2-Minderungsoptionen entlang der Wertschöpfungskette inkl. externer E ekte eine vollständige Minderung der CO_2-Emissionen (Abbildung 2).

Abbildung 1: Ambitioniertes Referenzszenario – CO_2-Minderung bis 2050



* Davon ca. 21 % Minderung durch Maßnahmen der Wertschöpfungskette. Die verbleibenden Emissionen werden durch den erwarteten Rückgang der Baunachfrage sowie den Beitrag der Recarbonatisierung reduziert.

** CCUS: Carbon-Capture-Technologien mit dem Ziel der Vermeidung von CO_2-Emissionen in die Atmosphäre durch CO_2-Speicherung (CCS) und geeignete Verfahren zur CO_2-Nutzung (CCU).

Quelle: VDZ

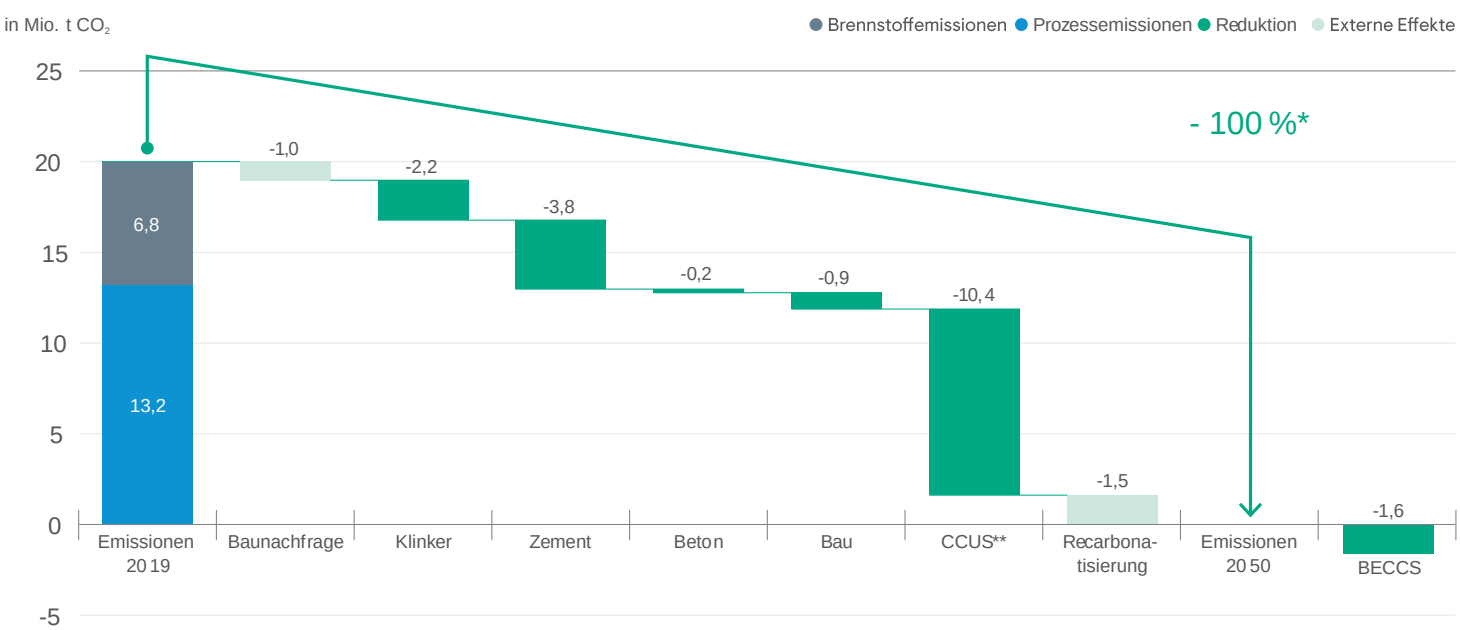
CO_2-Mengen in Höhe von rund 10,4 Mio. Tonnen pro Jahr werden dabei durch den ächendeckenden Einsatz von CCUS-Technologien reduziert. Zusätzlich können durch die nachhaltige Nutzung von biomassehaltigen Abfällen als Brennsto bei gleichzeitiger CO_2-Abscheidung (BECCS[1]) jährlich etwa 1,6 Mio. Tonnen CO_2 aus der Atmosphäre entnommen werden. Rechnerisch werden die Gesamtemissionen somit um mehr als 100 % verringert.

Als externe E ekte, die nicht direkt beein usst bar sind, werden in beiden Szenarien die natürlich statt ndende Recarbonatisierung, d.h. die CO_2-Aufnahme durch den Beton sowie ein leichter Rückgang der Betonnachfrage als Minderungsbeiträge berücksichtigt. Die Möglichkeit der aktiven Carbonatisierung von Frisch- oder Festbeton (Mineralisierung) wird in dieser Studie den CO_2-Nutzungstechnologien (CCU) zugeordnet.

In die Berechnung der Szenarien sind Maßnahmen entlang der Wertschöpfungskette von Zement und Beton einge ossen, die aus heutiger technischer Sicht einen signi kanten Beitrag auf dem Weg zur Klimaneutralität bis 2050 leisten können. Unabhängig hiervon engagieren sich die Zementhersteller auch in vielen weiteren relevanten Belangen des Umwelt- und Naturschutzes, beispielsweise durch die Einhaltung anspruchsvoller Emissionsgrenzwerte oder die Förderung der Biodiversität in Steinbrüchen. Diese Maßnahmen haben jedoch keinen unmittelbaren E ekt auf die CO_2-Emissionen der Branche, weshalb sie in dieser Studie nicht betrachtet werden. Im Bereich der Kreislaufwirtschaft werden vor allem diejenigen Maßnahmen erfasst, die sich direkt auf die CO_2-Bilanz der Wertschöpfungkette auswirken. Dabei handelt es sich in erster Linie um den Einsatz von alternativen Brenn- und Rohsto en bei der Klinker- und Zementherstellung.

1) BECCS = Bioenergy with Carbon Capture and Storage

Szenario Klimaneutralität – CO_2-Minderung bis 2050



* Davon ca. 88 % Minderung durch Maßnahmen der Wertschöpfungskette. Die verbleibenden Emissionen werden durch den erwarteten Rückgang der Baunachfrage sowie den Beitrag der Recarbonatisierung reduziert.

** CCUS: Carbon-Capture-Technologien mit dem Ziel der Vermeidung von CO_2-Emissionen in die Atmosphäre durch CO_2-Speicherung (CCS) und geeignete Verfahren zur CO_2-Nutzung (CCU).

Quelle: VDZ

Klimaneutralität – Voraussetzungen und Handlungsfelder

Im Bewusstsein dieser Herausforderungen arbeiten die deutschen Zementhersteller unter dem Dach des VDZ und der European Cement Research Academy (ECRA) seit Jahren mit Hochdruck daran, sowohl heute verfügbare Minderungsoptionen weiter zu verbessern als auch neue Technologien zu entwickeln. Wie die Ergebnisse der vorliegenden Studie zeigen, wird die CO_2-Abscheidung im Zementwerk und dessen anschließende Nutzung bzw. Speicherung (CCUS) bei der Dekarbonisierung von Zement und Beton eine entscheidende Rolle spielen. Für eine klimaneutrale Zementindustrie wird es dabei erforderlich sein, nach Ausschöpfung aller übrigen Potenziale ab 2050 jährlich rund 10 Mio. Tonnen CO_2 abzuscheiden.

Nach umfangreichen Vorarbeiten und Forschungsvorhaben ist die Zementindustrie heute in der Lage, die CO_2-Abscheidung in die industrielle Anwendung zu führen. Sie setzt damit auch maßgebliche Impulse für den Anlagenbau, mit dem sie im engen Schulterschluss die neuen Technologien vorantreibt.

Doch auch wenn mit der CO_2-Abscheidung eine signifikante Vermeidung prozessbedingter CO_2–Emissionen möglich ist, stellen die hohen Kosten für Bau und Betrieb dieser Anlagen und die Errichtung entsprechender Infrastrukturen eine wesentliche Herausforderung dar. Dies gilt auch, da die Wertschöpfungskette von Zement und Beton vor Ort an heimische Rohstoffvorkommen gebunden ist und sich häufig in größerer Entfernung von anderen industriellen Clustern und Infrastrukturen befindet.

Die Transformation hin zu einer klimaneutralen Gesellschaft ist jedoch nicht nur eine technische Herausforderung. Es wird vielmehr auch darauf ankommen, die hierfür erforderlichen externen Voraussetzungen und Rahmenbedingungen rechtzeitig zu schaffen. Hier ist ein Miteinander der Akteure aus Wirtschaft, Politik, Wissenschaft und Zivilgesellschaft vor allen Dingen in folgenden fünf Handlungsfeldern erforderlich (Abbildung 3).

Die Dekarbonisierung von Zement und Beton basiert auf einem umfassenden Maßnahmenmix, der auch in erheblichem Umfang auf grünen Strom angewiesen ist. So wird sich der Strombedarf der Klinkerherstellung u.a durch den breiten Einsatz von Technologien zur CO_2-Abscheidung mehr als verdoppeln. Insofern stellt die **Verfügbarkeit erneuerbarer Energien und leistungsfähiger Stromnetze** sektorübergreifend eine wichtige Voraussetzung für Klimaneutralität dar. Besonders bedeutsam für die Zementindustrie ist darüber hinaus der langfristige **Zugang zu ausreichenden Mengen alternativer, biomassehaltiger Brennstoffe**, die bei der Minimierung der brennstoffbedingten CO_2-Emissionen in der Zementindustrie bereits heute eine wichtige Rolle spielen.

Letztlich kommt dem **Aufbau einer funktionierenden CO_2-Infrastruktur** eine entscheidende Bedeutung zu – das gilt sowohl für die Dekarbonisierung von Zement und Beton als auch für die Entstehung von neuen CCUS-Wertschöpfungsketten. Nur unter dieser Voraussetzung kann es gelingen, abgeschiedenes CO_2 einer geeigneten Nutzung oder Speicherung zuzuführen. Zweifellos muss in diesem Kontext der Aufbau entsprechender Infrastrukturen für Wasserstoff und CO_2-freien Strom berücksichtigt werden.

Abbildung 3: Voraussetzungen und Handlungsfelder für Klimaneutralität

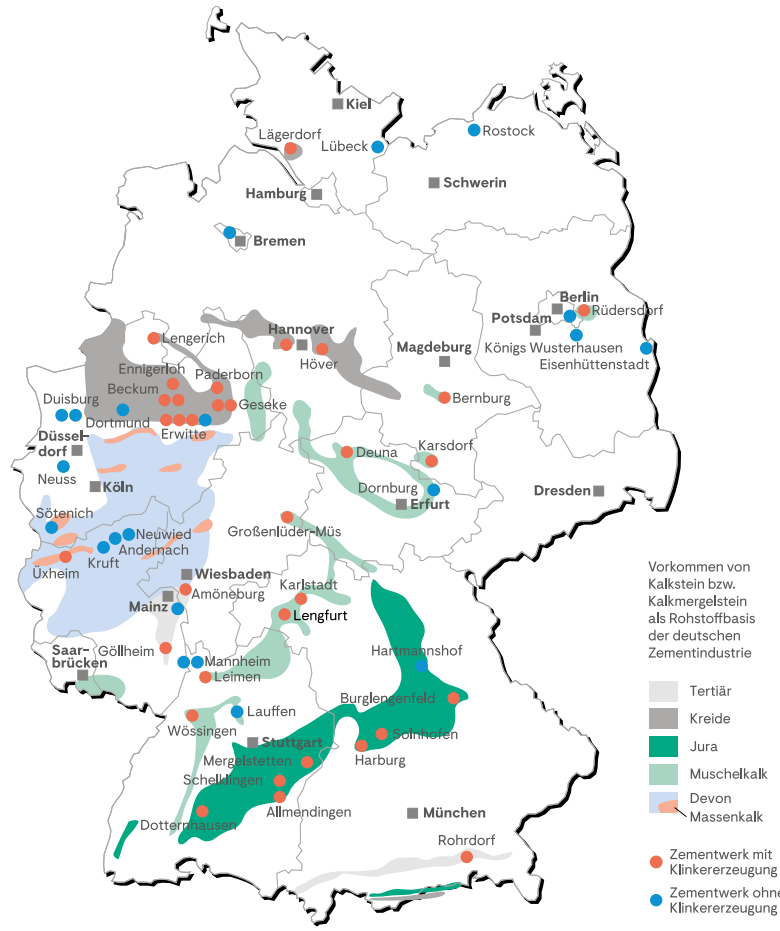
Quelle: VDZ

Auch wenn für die Dekarbonisierung der Zementherstellung die CO_2-Abscheidung unerlässlich ist, kann dieses Verfahren wegen seiner hohen Kosten und des immensen Aufwandes nur zum Einsatz kommen, wenn alle anderen Minderungsoptionen vollständig ausgeschöpft sind. Deshalb wird es in den kommenden Jahren ganz besonders darauf ankommen, den e zienten Einsatz von Klinker, Zement und Beton in der Wertschöpfungskette weiter voranzutreiben. Allen Beteiligten ist klar, dass dabei die Herstellung von klinkere zienten Zementen alleine nicht ausreicht, vielmehr müssen sie auch ihren Weg in die Anwendung nden. Insgesamt gilt es, dem Thema **CO_2beim Bauen eine größere Bedeutung beizumessen**.

Die Dekarbonisierung von Zement und Beton führt zu einem Transformationsprozess von bislang nicht vorstellbarem Ausmaß. Die Zementhersteller in Deutschland wissen um die Verantwortung, die sie hierbei tragen. In vielen technischen Fragen sind sie bereits heute, auch im weltweiten Vergleich, Technologieführer. Diese Technologieführerschaft gilt es zu erhalten und hierfür die entsprechenden **Rahmenbedingungen** zu scha en. **Wettbewerbsfähigkeit und Innovation** sind dabei letztlich zwei Seiten einer Medaille. Demnach sollte ein Mix von Politikinstrumenten entlang der gesamten Wertschöpfungskette von Zement und Beton die richtigen Anreize und Rahmenbedingungen setzen, um wirtschaftliches Handeln an Klimaschutzgesichtspunkten ausrichten zu können.

Die vorliegende Studie zeigt, dass es viele Maßnahmen gibt, die schon heute umsetzbar sind. Diese betre en vor allem die am Bau Beteiligten und die Scha ung eines Regelwerks, das auch zukünftig ein sicheres und zunehmend CO_2-freies Bauen ermöglicht. Diese Maßnahmen dürfen aber nicht darüber hinwegtäuschen, dass der weitaus größte Beitrag zur Dekarbonisierung von Zement und Beton nur durch die CO_2-Abscheidung im Zementwerk erfolgen kann. Ohne diese neue Technologie wird die Zementindustrie es nicht schaffen, im Jahre 2050 klimaneutral zu sein. Der VDZ und die Zementindustrie sind sich bewusst, dass es nach wie vor Vorbehalte bei diesem Thema gibt. Gleichzeitig versachlicht sich die Diskussion zur Frage des Einsatzes von CCUS-Technologien im Kontext der Pariser Klimaziele und des Europäischen Green Deals zunehmend. Insbesondere gilt dies für prozessbedingte CO_2-Emissionen, die ansonsten nicht minderbar sind.

Abbildung 4: Zementwerke und Rohstoffvorkommen in Deutschland



Quelle: VDZ

Aus Sicht der Zementindustrie wird es in den kommenden Jahren darauf ankommen, einen neuen **Grundkonsens zwischen Politik, Wirtschaft, Wissenschaft und Zivilgesellschaft** für einen klimaneutralen Technologiemix der Zukunft zu entwickeln. Dieser wird aus einer Vielzahl an teils sektorspezi schen und teils -übergreifenden Minderungsoptionen bestehen. Am Ende gilt es, den Transformationsprozess in das Zeitalter der Dekarbonisierung gemeinsam zu gestalten. Die Zementhersteller in Deutschland sind bereit, ihren Beitrag zu leisten und hierfür Verantwortung zu übernehmen.

1

Die Dekarbonisierung von Zement und Beton – Einführung

Die Dekarbonisierung von Zement und Beton – Einführung

Der Aufbruch zum Mond erscheint im Nachhinein wie ein Kinderspiel angesichts der Herausforderung, die sich der Menschheit heute stellt: eine dramatische Reduzierung der Treibhausgasemissionen, um den klimabedingten Temperaturanstieg zu begrenzen. Auch die globale Zementindustrie steht dabei im Fokus – mit ca. 6 bis 7 % der weltweiten CO_2-Emissionen muss sie ihren Beitrag zum Klimaschutz liefern. Dabei ist allen Beteiligten klar: Die Herausforderungen sind immens, denn bisherige konventionelle Minderungsstrategien haben ihre Grenzen erreicht.

Aus diesem Blickwinkel ist das Klimaabkommen von Paris vom Dezember 2015 umso bedeutsamer für die Menschheitsgeschichte. Erstmals ist es gelungen, den Weg in eine klimaneutrale Gesellschaft in der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts als globale Aufgabe zu formulieren. Auch wenn der Weg dorthin bislang nur zu erahnen ist, steht das Ziel fest, die globale Erwärmung gegenüber dem vorindustriellen Zeitalter auf unter 2 °C, möglichst auf 1,5 °C zu begrenzen. Dies ist Anspruch und Verantwortung zugleich – für alle Akteure in Wirtschaft, Politik und Gesellschaft.

Das Pariser Abkommen hat auch die Diskussion um Klimaschutzmaßnahmen in Europa und Deutschland deutlich beschleunigt. Dadurch ist berechtigterweise auch die Frage der industriellen Dekarbonisierung in den Mittelpunkt gerückt. Zwar spielt Klimaschutz in der Industrie bereits seit vielen Jahren eine relevante Rolle. Doch in den letzten Jahren ist zu beobachten, dass zunehmend vorherrschende Denkmuster hinterfragt werden und sowohl von Seiten der Wirtschaft als auch von Politik und Gesellschaft ein Umdenken stattfindet. Dazu beigetragen hat sicherlich auch die gesellschaftliche Diskussion um Klimaschutz und um den Erhalt der Lebensgrundlagen für künftige Generationen, die zusehends alle Bereiche der Gesellschaft erfasst.

Für die Zementindustrie, die mit Zement und Beton entscheidende Werkstoffe für die gesellschaftliche Entwicklung in Deutschland, Europa und weltweit bereitstellt, markieren die letzten Jahre insofern eine Zeitenwende. Ausgehend vom bisherigen Leitmotiv der kontinuierlichen Optimierung der Herstellungsprozesse setzt der Anspruch einer klimaneutralen Industrieproduktion nunmehr eine völlig neue Herangehensweise an die Produktion und die Wertschöpfung voraus. Dies stellt die Zementhersteller nicht nur vor technische, sondern besonders auch vor große wirtschaftliche Herausforderungen. Denn mit heute verfügbaren Verfahren ist eine vollständige Dekarbonisierung von Zement und Beton nicht erreichbar. Hierzu bedarf es vollkommen neuartiger Technologien. Diese werden von der Zementindustrie seit mehreren Jahren intensiv erforscht und befinden sich daher derzeit in einem Entwicklungsstadium, von dem aus sie zur industriellen Reife geführt werden können.

Vor diesem Hintergrund liegt der vorliegenden Studie ein ganzheitlicher Ansatz auf dem Weg zur Klimaneutralität zugrunde, der relevante Minderungsoptionen entlang der gesamten Wertschöpfungskette betrachtet. Im Vordergrund der Analyse stehen dabei Maßnahmen zur CO_2-Reduzierung bei der Herstellung von Klinker, Zement und Beton. Gleichzeitig werden auch weitere Potenziale berücksichtigt, die sich aus neuen Verfahren der Bauausführung sowie über den Lebenszyklus von Bauwerken ergeben. Neben den rein technischen Fragestellungen identifiziert die vorliegende Studie auch externe Voraussetzungen für eine derart tiefgreifende Transformation der Zementindustrie und skizziert konkrete Handlungsfelder für die Zukunft. Folgende Leitfragen stehen im Mittelpunkt:

- Ist eine klimaneutrale Wertschöpfungskette Zement & Beton möglich?
- Welche Technologien und Innovationen sind erforderlich?
- Was sind die Voraussetzungen für eine klimaneutrale Betonbauweise?
- Vor welchen Herausforderungen steht die Branche bei der Dekarbonisierung?

Die vorliegende Studie beschreibt zwei Pfade für die Dekarbonisierung von Zement und Beton in Deutschland bis zum Jahre 2050 – ein ambitioniertes Referenzszenario und ein Szenario Klimaneutralität. Die beiden Pfade zeigen einerseits die enormen Herausforderungen auf, vor denen die gesamte Wertschöpfungskette steht. Andererseits wird aber deutlich, dass eine vollständige Dekarbonisierung von Zement und Beton möglich ist. Diese wird gelingen, wenn alle Beteiligten Hand in Hand arbeiten. Für die letztendliche Umsetzung bedarf es dabei eines politischen und gesellschaftlichen Kraftaktes. Nur im Miteinander und nur mit den erforderlichen Randbedingungen kann die Dekarbonisierung von Zement und Beton eine Erfolgsgeschichte werden. Die Zementhersteller sind bereit, hierfür Verantwortung zu übernehmen und ihren Teil zum Erfolg beizutragen.

2

Herausforderungen für eine klimaneutrale Wertschöpfungskette Zement und Beton

Herausforderungen für eine klimaneutrale Wertschöpfungskette Zement und Beton

Die Zementindustrie in Deutschland und damit die gesamte Wertschöpfungskette von Zement und Beton stehen auf dem Weg zur Klimaneutralität vor großen Herausforderungen. Hintergrund ist, dass bei der Herstellung von Zement bzw. seinem Vorprodukt Zementklinker große Mengen an CO_2 freigesetzt werden. Rund zwei Drittel davon entfallen auf rohstoffbedingte Prozessemissionen aus der Entsäuerung des Kalksteins und rund ein Drittel auf energiebedingte CO_2-Emissionen aus dem Einsatz der Brennstoffe (Abbildung 5).

In Zahlen ausgedrückt ist die Herstellung einer Tonne Zement in Deutschland mit Emissionen in Höhe von rund 600 kg CO_2 verbunden – es entstehen dabei rohstoffbedingte Prozessemissionen von etwa 400 kg CO_2 und brennstoffbedingte Emissionen von rund 200 kg CO_2. Bei einer Zementproduktion in Deutschland von etwa 34 Mio. Tonnen im Jahr 2019 wurden daher etwa 20 Mio. Tonnen CO_2-Emission emittiert. Dies entspricht etwa 3 % der gesamten deutschen CO_2-Emissionen; der Anteil der globalen Zementproduktion an den weltweiten anthropogenen CO_2-Emissionen beläuft sich auf 6 bis 7%.

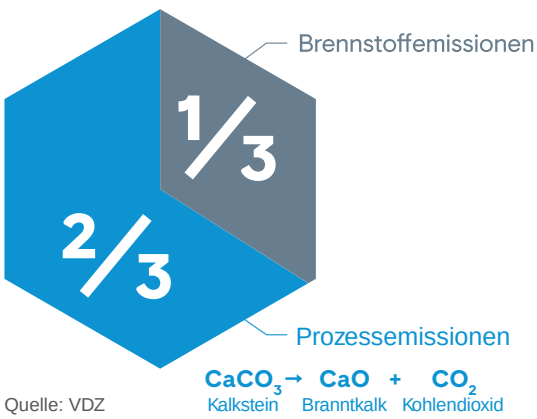
2.1 Technische Herausforderungen

Seit 1990 ist es den deutschen Zementherstellern gelungen, ihre CO_2-Emissionen sowohl spezifisch als auch absolut um 20 bis 25 % zu reduzieren (Abbildung 6). Entscheidend für diese Minderungserfolge waren neben Verbesserungen der thermischen Effizienz vor allem zwei Faktoren: erstens die Senkung der Klinkergehalte im Zement (Steigerung der Klinkereffizienz), wodurch bezogen auf die Tonne Zement sowohl der Brennstoffverbrauch als auch mittelbar die Prozessemissionen sinken; zweitens der verstärkte Einsatz biomassehaltiger alternativer Brennstoffe, durch die fossile Energieträger mehrheitlich ersetzt wurden.

Bei der weiteren Minderung ihrer CO_2-Emissionen stößt die Zementindustrie jedoch zunehmend an Grenzen: mit konventionellen Maßnahmen sind die prozessbedingten CO_2-Emissionen der Klinkerherstellung nicht zu mindern; auch im Hinblick auf die Reduzierung der brennstoffbedingten CO_2-Emissionen stellen die erforderlichen Verbrennungsbedingungen mit Flammentemperaturen von rund 2.000 °C und Materialtemperaturen von 1.450 °C sehr hohe Anforderungen an alternative Feuerungstechniken. Insofern spielt der Einsatz von Biomasse in alternativen Brennstoffen eine große Rolle bei der Minderung der CO_2-Emissionen der Klinkerherstellung. Darüber hinaus wird es auch zukünftig vor allen Dingen auf die effiziente Verwendung des Klinkers im Zement ankommen, wodurch letztlich weniger Klinker produziert werden muss.

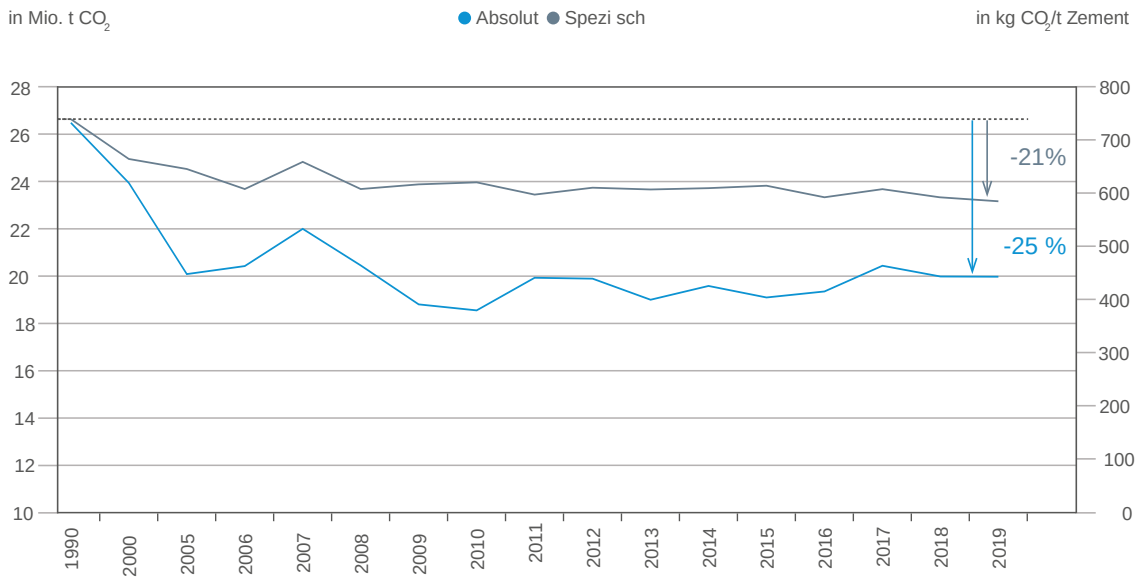
Mit diesen Anstrengungen allein wird aber nur ein vergleichsweise kleiner Teil der langfristig notwendigen CO_2-Minderung hin zur Klimaneutralität erreicht werden können. Für die Wertschöpfungskette Zement und Beton besteht die wesentliche Herausforderung bei der Dekarbonisierung folglich darin, sowohl energie- als auch prozessbedingte CO_2-Emissionen letztlich auf „Null“ zu senken. Dazu müssen zum einen die konventionellen Minderungsoptionen weiter vorangetrieben werden. Zum anderen bedarf es neben teils neuen CO_2-effizienten Rohstoffen für die Klinker-, Zement- und Betonherstellung vor allen Dingen neuartiger Technologien, durch die sich die Herstellungsprozesse und die Betonbauweise grundlegend verändern werden. Diese Zukunftslösungen gilt es, heute zur technischen Reife zu bringen, damit sie rechtzeitig im Industriemaßstab skaliert und wirtschaftlich eingesetzt werden können. Eine entscheidende Rolle wird dabei vor allen Dingen die Abscheidung von CO_2 im Zementwerk und dessen Nutzung bzw. Speicherung (CCUS) spielen. Darüber hinaus gilt es, neue Bauweisen voranzutreiben, die Ressourceneffizienz zu steigern und Potenziale der CO_2-Aufnahme im Beton zu berücksichtigen.

Abbildung 5: Direkte CO_2-Emissionen aus der Zementherstellung



Quelle: VDZ

Abbildung 6: CO_2-Emissionen der deutschen Zementindustrie



Quellen: VDZ, GNR, Deutsche Emissionshandelsstelle

2.2 Ökonomische und politische Herausforderungen

Für die Dekarbonisierung von Zement und Beton müssen insofern in einem ersten Schritt die technischen Voraussetzungen gescha en werden. Dies betri t in besonderer Weise die Entwicklung und Markteinführung von Breakthrough-Technologien, die derzeit mit Hochdruck von der Industrie vorangetrieben werden. Um diese Technologien letztlich zu skalieren und ächendeckend einzusetzen, bedarf es aber vor allem geeigneter wirtschaftlicher und politischer Rahmenbedingungen, damit eine so tiefgreifende Transformation der industriellen Grundsto produktion gelingen kann.

Die Zementindustrie in Deutschland ist sich Ihrer Verantwortung bewusst. Klar ist aber auch, dass sie diesen Kraftakt nicht alleine schultern können wird. Sie benötigt dafür die Mitwirkung der gesamten Wertschöpfungskette, angefangen mit dem Anlagenbau und den Betonherstellern über die bauausführende Industrie bis hin zu Planern und Architekten. Daneben bedarf es eines wirksamen politischen Instrumentenmix, der eine wettbewerbsfähige Produktion zunehmend CO_2-freier Zemente und Betone in Deutschland ermöglicht und gleichzeitig Märkte für diese Produkte fördert, obwohl sie in der Herstellung in der Regel deutlich teurer sein werden als konventionell produzierte Alternativen.

Im Kern geht es um die Scha ung eines „Level Playing Fields“ als Voraussetzung für die Umstellung auf klimaneutrale Prozesse und Produkte. Solange auf internationaler Ebene keine wirksame CO_2-Bepreisung existiert, die den relevanten Wettbewerb außerhalb der EU einbezieht, ist ein e ektiver Carbon-Leakage-Schutz bzw. eine „Belastungsgleichheit“ bei den CO_2-Kosten für deutsche und europäische Zementhersteller im Vergleich zum Ausland auf dem Weg zur Klimaneutralität unverzichtbar. Eine erfolgreiche Dekarbonisierung in der Industrie wird deshalb maßgeblich davon abhängen, ob es gelingt, national und europäisch einen Rahmen zu scha en, der den wirtschaftlichen Einsatz neuartiger Technologien, die Markteinführung von Innovationen entlang der Wertschöpfungskette sowie die Bereitstellung der hierfür notwendigen Infrastrukturen (für Strom, CO_2 und Wassersto) ermöglicht.

2.3 Gesellschaftliche Herausforderungen

Die erforderlichen technischen, ökonomischen und politischen Maßnahmen für die Dekarbonisierung von Zement und Beton sind klar umrissen. In ihrer Gesamtheit stellen sie eine ungeheure Herausforderung dar, die nur gelingen kann, wenn Politik, Industrie und Gesellschaft gemeinsam nach Wegen der Umsetzung suchen. Dieser kooperative Ansatz ist insofern von Bedeutung, da die Erfahrung zeigt, wie schwer sich Deutschland in den letzten Jahren mit großen Infrastrukturprojekten tut. Das gilt ganz konkret für den Ausbau der erneuerbaren Energien (zB. Errichtung von Windrädern oder Stromleitungen), ohne die die Energiewende nicht gelingen wird. In gleicher Weise wird eine klimaneutrale Industrie nicht ohne eine Infrastruktur für CO_2, Wassersto und Strom aus erneuerbaren Quellen möglich sein. Für die Zementindustrie mit ihren hohen prozessbedingten Emissionen wird zur Dekarbonisierung an CCUS-Technologien kein Weg vorbei führen. Deshalb ist die Branche besonders auf eine Infrastruktur für den Transport von CO_2 von der Quelle bis zur Senke sowie auf entsprechende Mengen an erneuerbarem Strom angewiesen. Dies erfordert letztlich auch die Akzeptanz der Menschen vor Ort sowie der Gesellschaft insgesamt.

Die Frage der CO_2-Abscheidung und anschließenden Nutzung oder Speicherung wird heute unter anderen Vorzeichen diskutiert, als dies Anfang der 2000er-Jahre im Kontext des CCS-Einsatzes in der Kohlestromerzeugung erfolgte. CCUS-Technologien kommen aus heutiger Sicht nur für industrielle Emissionen in Betracht, für die keine alternativen Minderungstechnologien zur Verfügung stehen. Darüber hinaus wird in Deutschland in erster Linie über O shore-CCS gesprochen, weshalb CO_2-Transportinfrastrukturen auch über längere Distanzen umso wichtiger sind. Die Akzeptanz von CCUS-Technogien wird insofern zunehmend in den Kontext der Klimaneutralität eingebettet. Die Herausforderung besteht nun darin, für Industrien mit prozessbedingten CO_2-Emissionen dieses neue Verständnis in einen gesellschaftlichen Prozess einzubringen, damit der entsprechende Technologiemix für die Dekarbonisierung von Zement und Beton eingeführt werden kann.

Erste konkrete Vorschläge dazu, wie ein solcher gesamtgesellschaftlicher Prozess gestaltet werden könnte und wie die Zementindustrie hieran mitwirken kann, nden sich in Kapitel 5 zu den jeweiligen Handlungsfeldern.

3

Technologien und Innovationen für eine klimaneutrale Betonbauweise

Technologien und Innovationen für eine klimaneutrale Betonbauweise

Zement wird maßgeblich aus Kalkstein hergestellt, der in Steinbrüchen gewonnen und in Drehöfen zu Zementklinker gebrannt wird (Abbildung 8). Beim Brennprozess wird das Rohmaterial auf 1.450°C erhitzt; dabei wird prozess- und brennsto bedingt CO_2 freigesetzt. Das prozessbedingte CO_2 entsteht bei der Calcinierung des Kalksteins zu Branntkalk, einer Vorstufe des Zementklinkers, nach folgender chemischer Reaktion:

$$CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2$$

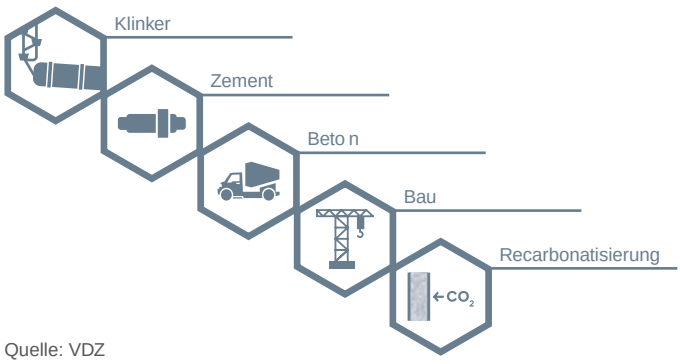
Kalkstein Branntkalk Kohlensto dioxid

Das brennsto bedingte CO_2 hingegen resultiert aus dem Einsatz der Brennsto e. Insgesamt sind zwei Drittel der CO_2-Emissionen prozessbedingt und ein Drittel brennsto bedingt. Während die brennsto bedingten CO_2-Emissionen beispielsweise durch höhere Biomasseanteile in den Brennsto en reduziert werden können, sind die prozessbedingten CO_2-Emissionen der Klinkerherstellung mit heute verfügbaren Technologien nicht minderbar. Vor diesem Hintergrund kommt dem e zienten Einsatz des Klinkers im Zement und letztlich in der gesamten Wertschöpfungskette eine besondere Bedeutung zu.

Als Teil einer klimaneutralen Gesellschaft muss die Zementindustrie sowohl ihre energie- als auch ihre prozessbedingten CO_2-Emissionen bis zum Jahr 2050 vollständig mindern. Dafür werden neben neuen CO_2-e zienten Rohsto en für die Klinker-, Zement- und Betonherstellung vor allem neuartige Technologien erforderlich sein, durch die sich die Herstellungsprozesse und die Betonbauweise grundlegend verändern werden. Diese Zukunftslösungen gilt es heute zu entwickeln, damit sie rechtzeitig im Industriemaßstab skaliert und wirtschaftlich eingesetzt werden können.

Die nachfolgende Betrachtung der Technologieoptionen basiert auf einem ganzheitlichen Ansatz, der die CO_2-Minderungspotenziale über die fünf Wertschöpfungsstufen Klinker, Zement, Beton, Bauwerk sowie die Wiedereinbindung des CO_2 in den Beton während und nach der Nutzung eines Bauwerks abbildet (Abbildung 7).[2] Dabei werden auch Technologien und Innovationen dargestellt, die nicht in die Berechnung der Szenarien ein ießen, weil deren Ein uss auf die CO_2-Minderung heute noch nicht abschätzbar oder als sehr gering einzuschätzen ist.

Abbildung 7: CO_2-Minderung entlang der Wertschöpfungskette



Quelle: VDZ

3.1 Klinker: Minderung brennstoff- und prozessbedingter CO_2-Emissionen

Bei der Herstellung von Zementklinker (nachfolgend: Klinker) werden als Rohsto e Kalkstein und in geringem Maße Ton oder deren natürliches Gemisch Mergel abgebaut und zunächst in mehreren Zerkleinerungsprozessen aufbereitet. Anschließend wird das Rohmehl bei sehr hohen Temperaturen von bis zu 1.450°C im Drehofen gebrannt. Dabei entsteht das Zwischenprodukt Klinker, das anschließend abgekühlt und im letzten Schritt zusammen mit anderen Rohsto en zu Zement vermahlen wird.

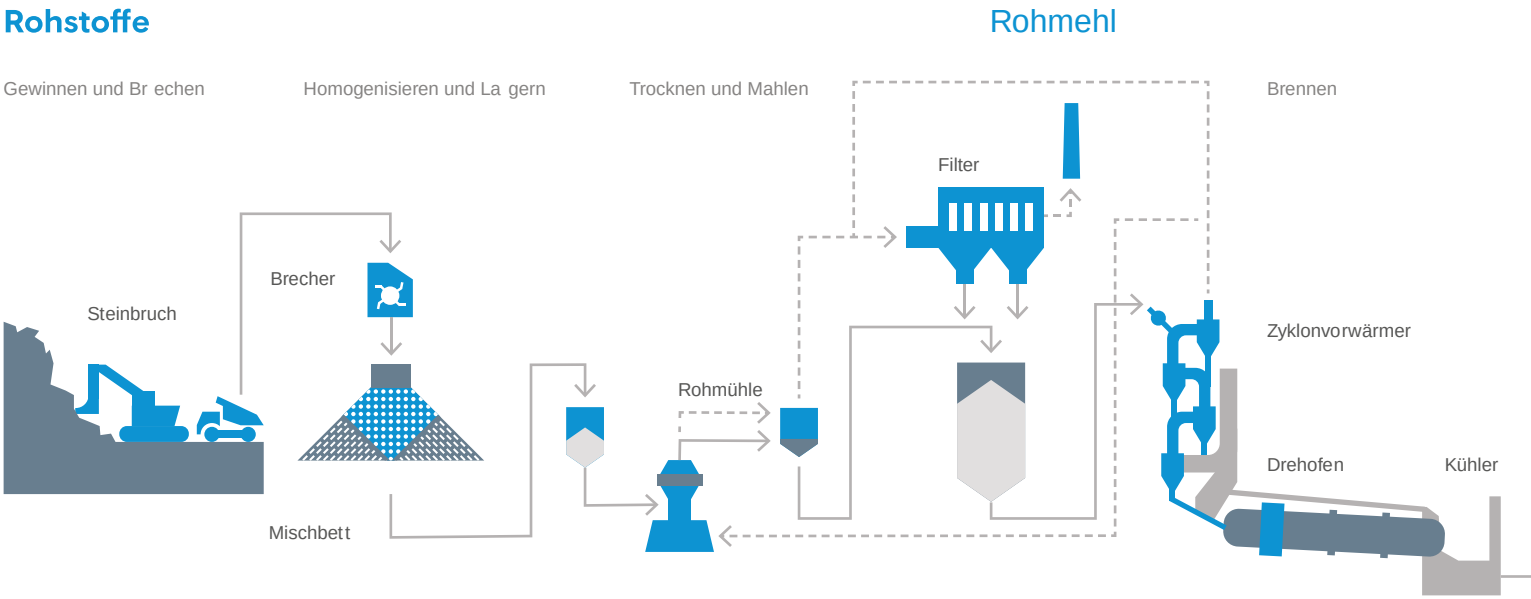
3.1.1 Energiee zienz

Die Herstellung von Klinker und Zement ist einer der energieintensivsten Produktionsprozesse in der verarbeitenden Industrie, bei dem thermische und elektrische Energie typischerweise für einen großen Anteil der Herstellkosten verantwortlich sind. Von daher war der optimierte Energieeinsatz schon immer ein wichtiger Hebel, um die Produktionskosten von Zement zu begrenzen oder zu senken (Abbildung 9). Darüber hinaus trägt die Energiee zienz aber auch zur Reduzierung der CO_2-Emissionen bei. Durch den Betrieb von zerti zierten Energiemanagementsystemen wird in allen deutschen Zementwerken der Energiebedarf seit vielen Jahren systematisch erfasst und die Energiee zienz stetig vorangetrieben.

Die Energiee zienz von Zementwerken ist im Vergleich zu anderen industriellen Prozessen besonders hoch, da die Abwärme mehrfach genutzt

2) Entsprechend dem 5C-Ansatz des europäischen Zementverbandes CEMBUREAU: Clinker, Cement, Concrete, Construction und (Re)Carbonation [1].

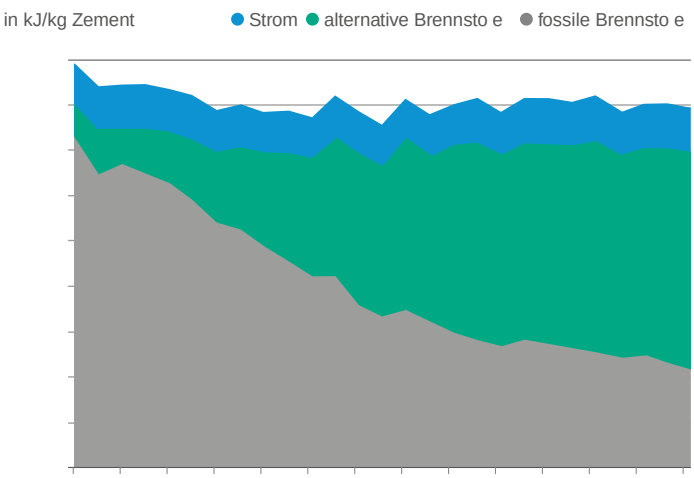
Abbildung 8: Prozess der Zementherstellung



wird – unter anderem zum Vorheizen der Verbrennungsluft sowie zum Trocknen und Vorwärmen der Brenn- und Rohsto e. Da zudem der Großteil des Brennsto energieeintrags für die chemischen und mineralogischen Reaktionen benötigt wird, ist das verbleibende Potenzial für weitere Verbesserungen begrenzt. So hat eine Studie des VDZ ergeben, dass ein – theoretischer – Neubau aller Ofen- und Mahlanlagen „auf grüner Wiese“ nur zu einer Minderung des Energiebedarfs um 9% führen würde [2].

Ein solcher Ersatz vorhandener Anlagen durch Technologien mit höherem Wirkungsgrad oder gar der Bau neuer Ofen- und Mahlanlagen nach neuestem Stand der Technik erfordert jedoch beträchtliche Investitionen [3]. Die wirtschaftliche Rentabilität von beiden ist in der Regel nicht gegeben, wenn sie ausschließlich auf zu erwartenden Energieeinsparungen basiert.

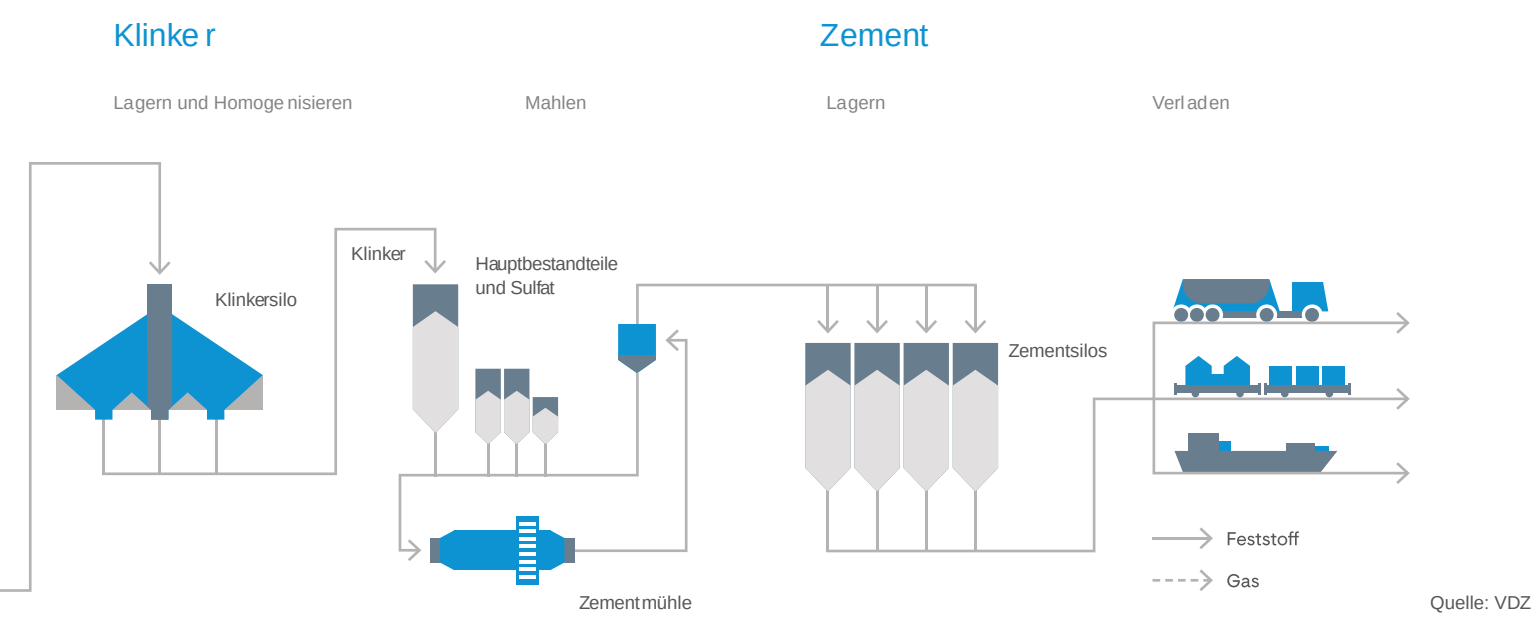
Abbildung 9: Spezifischer Energieeinsatz der deutschen Zementindustrie



Quelle: VDZ

Der durchschnittliche Bedarf an **thermischer Energie** für die Zementherstellung lag 2019 in Deutschland bei 2.772 MJ/t Zement. Wichtige Faktoren, die den Bedarf an thermischer Energie bestimmen, sind die folgenden:

- Der größte Teil der eingesetzten Brennsto energie wird für die chemisch-mineralogischen Reaktionen bei der Klinkerbildung benötigt.
- Die Ofenabgase werden darüber hinaus für die Trocknung des Rohmaterials genutzt. Der konkrete Energiebedarf ist dabei abhängig vom Feuchtegehalt des Rohmaterials.
- Eine hohe Substitution von Regelbrennsto en durch alternative Brennsto e kann zu einem



Quelle: VDZ

erhöhten spezifischen Energiebedarf führen, was jedoch nicht unbedingt eine weniger effiziente Energienutzung bedeutet. Die vermehrte Abgaswärme eröffnet hingegen Potenziale zu einer weitergehenden Nutzung neben der Rohstoffrocknung.

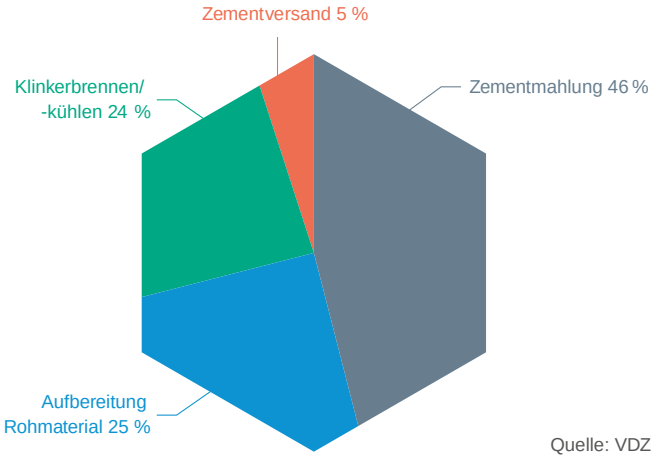
- Unter Effizienzgesichtspunkten ist es vorteilhaft, Abwärme thermisch, d.h. für Trocknungsprozesse, zu nutzen. Die Stromerzeugung aus Abwärme ist dagegen nur mit einem geringeren Gesamtwirkungsgrad von maximal 15 bis 25% möglich. Angesichts des in Deutschland weit entwickelten Einsatzes alternativer Brennstoffe wird in einigen Werken zu deren Trocknung Überschusswärme des Vorwärmers oder des Kühlers genutzt. Die dadurch verbesserte Brennstoffqualität reduziert den Energiebedarf des Ofens, stabilisiert den Ofenbetrieb und erhöht somit den Gesamtwirkungsgrad.

- Der spezifische thermische Energiebedarf der Drehöfen hängt ferner von der Ofenkapazität und den Wandwärmeverlusten ab.

Der durchschnittliche Bedarf an **elektrischer Energie** für die Zementherstellung lag 2019 in Deutschland bei 111,9 kWh/t Zement und ist seit 2010 nahezu stabil [4]. Die Hauptfaktoren, die den Bedarf an elektrischer Energie bestimmen, sind in Abbildung 10 dargestellt.

Weltweit geht der Trend zu effizienten Mühlentypen, hauptsächlich Walzenschüsselmühlen oder einer Kombination von verschiedenen Mühlentypen. Mit Blick auf die hohe Flexibilität bei der Mahlung einer Vielzahl von Zementarten wird in deutschen Zementwerken überwiegend auf Kugelmühlen gesetzt – zum Teil in Verbindung mit einer hocheffizienten Vormahlung. Ein aktuelles Forschungsvorhaben unter dem Dach der European Cement Research Academy (ECRA) befasst sich mit der Frage, welche potenziell neuen Mahlverfahren den Energiebedarf der Zementmahlung in Zukunft substanziell verringern könnten.

Abbildung 10: Elektrischer Energieeinsatz im Zementherstellungsprozess



Quelle: VDZ

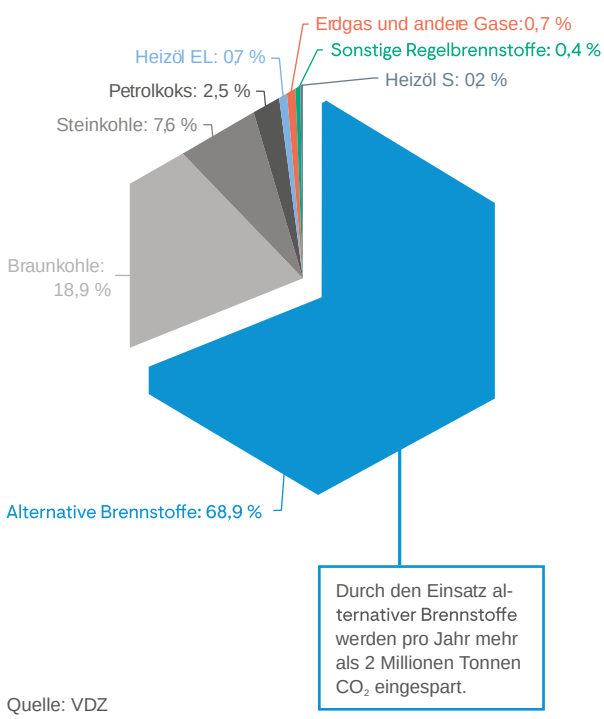
Trotz der Investitionen in energiee ziente Mahlanlagen haben verschiedene Faktoren in der Vergangenheit dazu geführt, dass der elektrische Energiebedarf für die Zementherstellung angestiegen ist [5]. Die Gründe hierfür sind vielfältig:

- Moderne Bautechniken haben die Nachfrage nach Zementen mit höheren Festigkeiten gesteigert. Diese erfordern eine feinere Aufmahlung, die wiederum mit einem höheren elektrischen Energiebedarf verbunden ist.
- Auch die verstärkte Verwendung weiterer Hauptbestandteile, die Klinker im Zement ersetzen können, bedeutet meist einen höheren Strombedarf für die Mahlung (z.B. von Hüttensand) zur Erreichung der gleichen Produktqualität.
- Umweltschutzmaßnahmen, z.B. zur weitergehenden Verringerung der Staub- und NO_x-Emissionen, erfordern Abgasreinigungsanlagen, die ihrerseits zusätzlichen Strom benötigen. Beispielsweise weisen SCR-Anlagen zur NO_x-Reduzierung einen zusätzlichen Strombedarf von 4 bis 7 kWh/t Klinker auf.
- Auch Maßnahmen zur Verbesserung des thermischen Wirkungsgrades bedingen häufig einen höheren Stromverbrauch (z.B. Systeme zur Abwärmenutzung wie Trockner für alternative Brenn- oder Rohstoffe).

3.1.2 Alternative Brennstoffe zur Zementklinkerproduktion

In der deutschen Zementindustrie werden seit den 1990er Jahren alternative Brennstoffe verwendet. Ihr Einsatz wurde in den 2000er Jahren erheblich gesteigert. Damit leistet die Zementindustrie einen wichtigen Beitrag zur Ressourcenschonung und zur Minderung von CO_2-Emissionen aus dem Klinkerbrennprozess. Im Jahr 2019 wurde der Brennstoffenergiebedarf zu fast 70 % durch alternative Brennstoffe gedeckt und damit konventionelle fossile Brennstoffe, vor allem Braun- und Steinkohle, ersetzt (siehe Abbildung 11) [6]. Zu alternativen Brennstoffen zählen unter anderem Altreifen, Altöl, Tiermehle, aufbereitete Fraktionen aus Gewerbe- und Siedlungsabfällen und Klärschlamm. Aufgrund der von Steinkohle abweichenden Zusammensetzung (biogene Kohlenstoffanteile, geringeres C/H-Verhältnis) können so pro Tonne eingesetzten alternativen Brennstoffs bis zu 0,7 t fossile CO_2-Emissionen vermieden werden. Aus dem heutigen Einsatz alternativer Brennstoffe in der Zementindustrie ergibt sich somit eine jährliche Einsparung von mehr als 2 Mio. Tonnen CO_2.

Abbildung 11: Brennstoffmix der deutschen Zementindustrie 2019



Quelle: VDZ

Alle Brennsto e müssen entsprechend aufbereitet sein, um die hohen Anforderungen hinsichtlich Qualität, Eigenschaften und Materialzusammensetzung für die Klinkerproduktion zu erfüllen. Das gilt auch vor dem Hintergrund, dass die eingesetzten Brennsto e im Klinkerbrennprozess sowohl energetisch als auch sto ich verwertet werden. Die mineralischen Bestandteile der Brennsto e werden dabei zum Rohsto und somit Teil des Zementklinkers. So spart der Einsatz von alternativen Brennstoffen nicht nur fossile Energieträger und damit CO_2, sondern schont durch die Nutzung der Aschen im Produkt auch primäre Rohsto e. Eine regelmäßige Prüfung und Qualitätssicherung vor ihrer Mitverbrennung im Zementwerk und die Überwachung der Emissionen stellt die Umweltverträglichkeit von Prozess und Produkt sicher.

Die Zementindustrie ist damit ein wichtiger Partner der Abfall- und Kreislaufwirtschaft und gewährleistet eine hochwertige, reststo freie Verwertung ausgewählter Abfallströme. Die Branche strebt an, den Einsatz alternativer Brennsto e zur Deckung des thermischen Energiebedarfs weiter zu steigern und damit einen zusätzlichen Beitrag zu CO_2-Minderung und Ressourcenschonung zu leisten. Letztlich hängt dies von der künftigen Verfügbarkeit geeigneter Sto e, dem rechtlichen Rahmen sowie den technischen Bedingungen für den Einsatz im jeweiligen Zementwerk ab.

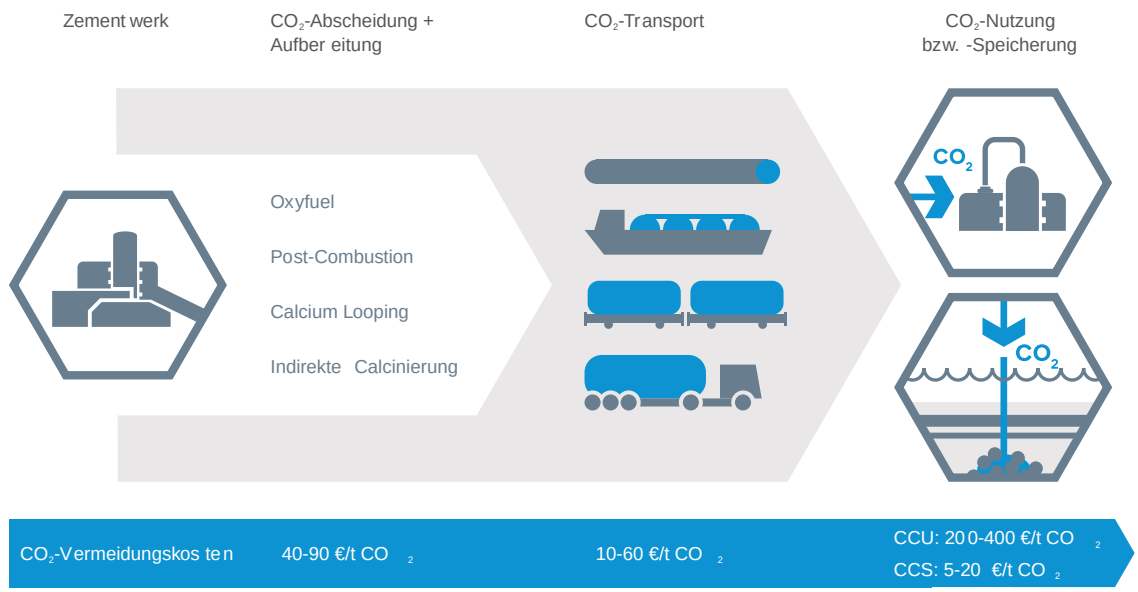
3.1.3 Alternative Rohsto e zur Zementklinkerproduktion

Zur Klinkererzeugung eignen sich neben natürlichen Rohsto en auch verschiedene alternative Rohsto e. Die wichtigsten natürlichen Rohsto e sind Kalkstein oder Kreide und Ton bzw. Mergel, die natürliche Mischung aus Kalkstein und Ton. Abhängig von der Rohsto situation am jeweiligen Standort müssen dem Rohmaterial Korrektursto e zugegeben werden, um die erforderliche Rohmaterialzusammensetzung zu erzielen. Ein Teil der Rohmaterialmischung kann dabei auch durch alternative Rohsto e ersetzt werden. Hierdurch werden einerseits Ressourcen gespart. Andererseits senken calciumhaltige und bereits entsäuerte alternative Rohsto e die CO_2-Emissionen. Die geeignete Auswahl und Qualitätssicherung stellen sicher, dass die Leistungsfähigkeit und Umweltverträglichkeit des Klinkers nicht beeinträchtigt wird. Aktuell wird in verschiedenen Forschungsvorhaben untersucht, welche weiteren Sto e sich für die Klinkerproduktion eignen könnten. Dabei liegt ein Fokus auf dem möglichen Einsatz von mineralischen Reststo en, z. B. gemahlenen Brechsanden aus dem Gebäudeabbruch (vgl. Kapitel 3.3.4).

3.1.4 Carbon-Capture-Technologien

Insbesondere die rohsto bedingten Prozessemissionen können mit der heute verfügbaren Technik nicht direkt gemindert werden. Aus diesem Grund forschen die deutschen und europäischen Zementhersteller sowie der VDZ unter dem Dach der European Cement Research Academy (ECRA) gemeinsam mit Anlagenbauern, Universitäten und wissenschaftlichen Institutionen bereits seit 2007 an geeigneten Verfahren zur CO_2-Abscheidung aus dem Abgas von Zementofenanlagen, um es danach entweder langfristig geologisch bzw. mineralogisch zu binden (Carbon Capture and Storage, CCS) oder das CO_2 einer anderen Verwendung zukommen zu lassen (Carbon Capture and Utilisation, CCU). Als Ergebnis dieser umfangreichen Forschungsarbeiten werden derzeit verschiedene Verfahren im Pilot- und Demonstrationsmaßstab erprobt oder befinden sich in Planung. Das Hauptaugenmerk liegt dabei aktuell auf Oxyfuel- und Post-Combustion-Technologien [7, 8], aber auch andere Verfahren werden derzeit getestet. Im Folgenden werden vier mögliche Verfahren zur CO_2-Abscheidung im Klinkerbrennprozess vorgestellt (Abbildung 12).

Abbildung 12: Verfahren zur CO_2-Abscheidung bei der Zementklinkerherstellung



Quellen: [9, 10, 24]

Oxyfuel-Technologie

Bei der Oxyfuel-Technologie wird reiner Sauersto anstelle von Luft in der Feuerung eines Drehofens verwendet, wodurch ein möglichst CO_2-reiches Abgas entsteht [7, 11, 12]. Da es sich um ein prozessintegriertes Verfahren handelt, müssen Ofenanlage und -betrieb entsprechend angepasst werden. Im Ergebnis besteht das Abgas nach einem nalen Reinigungsschritt aus reinem CO_2, das direkt die erforderliche Qualität für den weiteren Transport sowie die Nutzung oder Speicherung aufweist. Der erforderliche Sauersto wird in den notwendigen Mengen durch eine werkseigene oder werksnahe Luftzerlegungsanlage erzeugt. Hierdurch verdoppelt sich der elektrische Energiebedarf für die Klinkererzeugung. Der thermische Energiebedarf bleibt bei diesem Verfahren nahezu konstant. Die CO_2-Vermeidungskosten für dieses Abscheideverfahren belaufen sich auf 40 bis 60 €/t CO_2 [13]. Um diese Kosten weiter zu senken, arbeiten Zementhersteller und Anlagenbauer gemeinsam daran, das Verfahren weiterzuentwickeln. Eine derartige Ofenanlage nach dem Pure-Oxyfuel-Prinzip be ndet sich als Demonstrationsanlage in Planung [14].

Post-Combustion-Technologien

Post-Combustion-Technologien sind sogenannte End-of-Pipe-Maßnahmen zur CO_2-Abscheidung, die keine grundlegenden Änderungen im Klinkerbrennprozess erfordern. Aus diesem Grund sind diese Technologien für die Nachrüstung bestehender Zementöfen besonders gut anwendbar [13]. Die am besten erforschte Methode ist die chemische Absorption mittels Aminen, zu der Betriebserfahrungen aus verschiedenen Branchen zur Verfügung stehen und bei der hohe Abscheideraten erreichbar sind. Das Verfahren wurde in der Zementindustrie im Pilotmaßstab sowie Demonstrationsmaßstab getestet [15, 16]. Bei dieser Abscheidetechnologie können sich der thermische und der elektrische Energieeinsatz je Tonne Klinker verdoppeln. Hierdurch belaufen sich die CO_2-Vermeidungskosten für dieses Abscheideverfahren auf 80 bis 90 €/t CO_2 [13]. Derzeit werden die Sorbentien weiterentwickelt, um den erheblichen thermischen Energiebedarf zur Desorption und die damit zusätzlich entstehenden CO_2-Emissionen zu senken. Weitere Post-Combustion-Technologien wie die CO_2-Abtrennung mittels Membran oder Mineralisierung könnten langfristig den zusätzlichen Energiebedarf senken, sind aber noch nicht ausgereift genug, in zu kleinem Maßstab verfügbar oder erreichen nicht den geforderten Abtrenngrad.

Calcium-Looping-Verfahren

Eine weitere in der Zementindustrie anwendbare Abscheidetechnologie ist das Calcium-Looping-Verfahren, bei dem Branntkalk (CaO) als Absorber

verwendet wird. Hierzu wird Kalkstein ($CaCO_3$) in einem separaten Calcinator erhitzt. Dabei entsteht reines CO_2, das nach einem Reinigungsschritt nicht weiter aufbereitet werden muss. Das CaO wird in der Drehofenanlage verwendet, um CO_2 zu absorbieren. Das $CaCO_3$ wird erneut in den Calcinator befördert und der Prozess beginnt von Neuem (Looping). Es gibt verschiedene Verfahrensvarianten, die sich im Grad ihrer Prozessintegration unterscheiden. Allen gemeinsam ist ein – wie bei den Post-Combustion-Verfahren – hoher Energiebedarf, sodass sich CO_2-Vermeidungskosten von 50 bis 70 €/t CO_2 ergeben. Das Verfahren wird in verschiedenen Varianten derzeit im Pilotmaßstab erprobt [17, 18].

Indirekte Calcinierung

Beim Verfahren der indirekten Calcinierung wird CO_2 in einem separaten, indirekt beheizten Calcinator freigesetzt. Das CO_2 hat eine hohe Reinheit; allerdings umfasst es nur den prozessbedingten Anteil des CO_2 aus der Klinkerherstellung. Eine Pilotanlage wurde mehrere Jahre in einem belgischen Zementwerk betrieben [19], eine größere Anlage befindet sich derzeit in Planung [20].

CO_2-Transport

Nur in Ausnahmefällen wird es möglich sein, CO_2 in direkter Nachbarschaft eines Zementwerks zu verwerten oder zu speichern. Insofern spielt der Transport des CO_2 zu einer Verwertungseinrichtung oder zu einer Speicherstätte in allen CCUS-Projekten eine wichtige Rolle. Grundsätzlich kommen hierfür verschiedene Transportarten infrage, nämlich LKW, Bahn, Schiff oder Pipeline.

Während der Transport mittels Pipeline kontinuierlich durchgeführt werden kann, handelt es sich bei den LKW-, Bahn- und Schiffstransporten um diskontinuierliche Prozesse, für die auch eine Zwischenspeicherung von CO_2 vor der Verladung im Zementwerk und nach der Entladung erforderlich ist. In der Anfangszeit mit kleineren Carbon-Capture-Projekten ist ein Transport mit Bahnwaggons oder LKWs zunächst ausreichend. Falls die CO_2-Quelle an oder in der Nähe einer Wasserstraße gelegen ist, sind auch Schiffstransporte möglich. Für den Transport sehr großer Mengen CO_2 ist eine Pipeline-Infrastruktur erforderlich, unabhängig davon, ob das CO_2 gespeichert oder an anderer Stelle weiterverwendet wird. Mit der Planung und Entwicklung von Infrastrukturen für den CO_2-Transport mit ausreichender Kapazität muss absehbar vor der CO_2-Abscheidung begonnen werden.

CO_2-Nutzung (Carbon Capture and Utilisation)

Die Nutzung von CO_2 wird in der Literatur als „Carbon Capture and Utilisation“ (CCU) bezeichnet. Es gibt bereits heute viele Möglichkeiten der CO_2-Nutzung; die technischen Prozesse sind weitestgehend verfügbar. Allerdings ist CO_2 ein sehr stabiles Molekül, das nur mit einem entsprechend hohen Energieaufwand zu anderen Stoffen umgewandelt werden kann. Die hierfür erforderliche Energie muss daher in ausreichendem Umfang und vor allen Dingen CO_2-frei verfügbar sein. Daneben ist auch eine direkte Nutzung des CO_2 möglich. Die hierfür benötigten Mengen sind jedoch sehr gering.

Für die Verwertung von CO_2 bieten sich verschiedene Optionen an: eine physikalische, chemische oder biologische Nutzung.

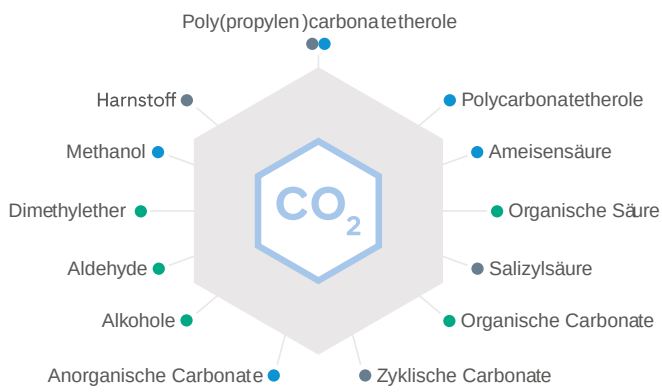
Lebensmittelindustrie

Eine direkte Nutzung von kleineren Mengen CO_2 ist z.B. in der Lebensmittel- bzw. Getränkeindustrie möglich („foodgrade CO_2“), aber auch als Kühlmittel, als Schutzgas oder zur Verbesserung des Pflanzenwachstums in Treibhäusern.

Basischemikalien, synthetische Brenn- und Kraftstoffe

Eine katalytische Umsetzung von CO_2 mit Wasserstoff zu Basischemikalien oder CO_2-neutralen Brenn- bzw. Kraftstoffen ist durch Methanol- oder Fischer-Tropsch-Synthese möglich. Die Verfahren sind unter den Begriffen „Power-to-gas“ (z. B. Herstellung von Methan) und „Power-to-liquids“ (z. B. zur Herstellung von Methanol oder von Kraftstoffen) bekannt.[3] Sie sind zum Teil bereits heute oder

Abbildung 13: CO_2-Nutzung in der Chemischen Industrie – Anwendungsfelder



Quelle: [59]

3) Auch zur Speicherung von überschüssiger Energie könnten solche Verfahren einen Beitrag liefern. Ein limitierender Faktor ist dabei, dass für diese Verfahren enorme Mengen von „grünem Strom“ erforderlich sind.

werden absehbar bis 2030 technisch verfügbar [21]. Eine wichtige Anforderung zum Klimaschutz ist dabei, dass der Wassersto aus einer Wasserelektrolyse stammt, die mit Strom aus CO_2-freien Quellen betrieben wird.

Die Gesamtbilanz dieser Nutzung führt ggf. in einem ersten Schritt nicht zu einer vollständigen CO_2-Minderung. Dennoch ist dieser Weg insbesondere für Bereiche wie den Luft- oder Schi sverkehr unabdingbar, in denen eine Elektri zierung in absehbarer Zeit nicht möglich ist.

Kultivierung von Mikroalgen

Auch eine Kultivierung von Mikroalgen ermöglicht es, CO_2 aus Abgasströmen zu binden. Unter Einwirkung von Sonnenlicht wird dabei vergleichsweise schnell Biomasse gebildet, die nach einer Aufbereitung (Trocknung) in verschiedenen Bereichen verwertet werden kann. Dazu wurden bereits Versuche in Zementwerken durchgeführt. Auch wenn Sonnenlicht der wesentliche Energieträger für dieses Verfahren ist, muss die darüber hinaus erforderliche Energie aus CO_2-freien Quellen kommen. Das Verfahren eignet sich nur für Werke mit einem entsprechend hohen Flächenangebot für die Aufstellung der benötigten Reaktoren. Darüber hinaus ist eine ausreichende Sonneneinstrahlung ohne große jahreszeitliche Schwankungen erforderlich.

Mineralisierung

Eine langfristige Einbindung von CO_2 ist auch durch eine Mineralisierung möglich. So ndet an den Ober ächen von Bausto en aus Zement oder Kalk eine Recarbonatisierung durch Aufnahme von CO_2 aus der Luft statt. Diese natürliche Reaktion kann durch den Einsatz hoher CO_2-Konzentrationen und guter Reaktionsbedingungen gezielt beschleunigt und optimiert werden [24].[4] Alternativ bedarf es großer Ober ächen wie beispielsweise bei aufbereitetem Altbeton. Auch in geologischen Speichern (CCS) kann CO_2 je nach Gesteinsformation zu calcium- oder magnesiumhaltigen Verbindungen reagieren und dadurch gebunden (mineralisiert) werden.

Viele Studien haben gezeigt, dass das Potenzial der CCU-Verfahren zur Verwertung großer Mengen CO_2 derzeit begrenzt ist. Für die Herstellung von bestimmten Brennsto en, Basischemikalien, speziellen Polymeren etc. würde schon das abgeschiedene CO_2 aus wenigen Zementwerken genügen, um den Weltmarkt für diese Produkte abzudecken. Erst wenn chemische Grundsto e zunehmend aus weniger fossilen Rohmaterialien hergestellt werden, wird sich die Nachfrage nach CO_2 als Rohsto deutlich ändern [21]. Dabei wird es allerdings auch darauf ankommen, die entsprechenden Mengen an Strom aus erneuerbaren Quellen zur Verfügung zu stellen.

CO_2-Speicherung (Carbon Capture & Storage)

Die Speicherung von CO_2 wird in der Literatur als „Carbon Capture and Storage“ (CCS) bezeichnet. Sie wird in den nächsten Jahrzehnten mit Blick auf das Ziel der Klimaneutralität unabdingbar sein, solange die Potenziale zur Nutzung von großen CO_2-Mengen (CCU) sowie die Verfügbarkeit grünen Stroms begrenzt sind.

Potenziale zur geologischen CO_2-Speicherung werden derzeit vorwiegend in ausgeschöpften Erdgas- oder Erdöllagerstätten unter dem Meeresboden im Bereich der Nordsee gesehen. Entsprechende Technologien zur geologischen Speicherung von CO_2 sind dort seit den 1970er Jahren in der Öl- und Gasgewinnung im Einsatz. Darüber hinaus wurden seit den 2000er Jahren eine Vielzahl von geologischen Formationen und die Eignung ihrer Deckschichten für eine dauerhafte CO_2-Speicherung erforscht. Für Europa wird das langfristige geologische Potenzial für eine CO_2-Speicherung auf 300 Mrd. t CO_2 [25] geschätzt. Mit Blick auf überwiegend prozessbedingte CO_2-Emissionen der europäischen Zement- und Kalkindustrie in Höhe von ca. 150 Mio. t pro Jahr [26] ist somit grundsätzlich von einem ausreichenden Speichervolumen auszugehen. Gleichzeitig wird in vielen anderen Nordsee-Anrainerländern derzeit in mehreren sogenannten Projekten von europäischem Interesse an der geologischen CO_2-Speicherung gearbeitet. Aus der näheren Untersuchung von Projekten in der Nordsee ergibt sich derzeit eine geschätzte Speicherkapazität von ca. 3,7 Mrd. t CO_2 [27, 28]. Neben Lagerstätten unter dem Meeresboden können auch unter Land geeignete geologische Formationen gefunden werden. Dabei hatten sich bisherige Untersuchungen auf die Speicherung von CO_2-Mengen aus Kraftwerken konzentriert. Geologische Formationen zur regionalen Aufnahme geringerer CO_2-Mengen, wie sie bei der Abscheidung von CO_2 aus dem Klinkerbrennprozess zu erwarten sind, wurden dabei nicht untersucht.

4) Auch bei der Herstellung von Frischbeton kann bereits CO_2 aufgenommen werden. So wird nach [22] üssiges CO_2 aus Drucktanks in gering dosierten Mengen (Größenordnung ca. 0,15% der Mæsse des Zements) direkt in den Betonmischer injiziert. Das CO_2 reagiert mit dem hydratisierenden Zement. Mit einer optimierten Dosierung von CO_2 können laut [22] bei vergleichbaren technischen Eigenschaften des Betons ca. 5% Zement eingespart werden. Die Dauerhaftigkeit des Betons werde hierdurch nicht beein usst [23]. Die aktive Recarbonatisierung von Frisch- und Festbeton wird implizit als CCU-Technologie in die Szenarien einbezogen.

In Deutschland wurde ein Projekt des Geoforschungszentrums Potsdam zur CO_2-Einlagerung und Beobachtung seiner Speicherung am Standort Ketzin erfolgreich durchgeführt und abgeschlossen. Der politische und gesellschaftliche Widerstand gegen die Nutzung von CCS für Kohlekraftwerke hat dazu geführt, dass die Speicherung an drei anderen hierfür vorgesehenen Forschungsstandorten nicht weiter untersucht wurde. Heute ist die Rechtslage in Deutschland so, dass de facto eine CO_2-Speicherung an Land nicht möglich ist. Vor einer Entwicklung und Nutzung von CO_2-Speicherstätten zur Vermeidung prozessbedingter CO_2-Emissionen ist somit ein neuer gesellschaftlicher und politischer Dialog erforderlich, der als eine besondere Herausforderung angesehen wird.

3.1.5 Wasserstoff und strombasierte Klinkerherstellung

Um die gesteckten Klimaziele bis Mitte des Jahrhunderts zu erreichen, kommt Wasserstoff als potenziell CO_2-freiem Energieträger eine zentrale Rolle zu. Beim Einsatz in der Zementindustrie ist sein CO_2-Minderungspotenzial jedoch begrenzt, da eine Umstellung auf eine wasserstoff- oder strombasierte Wärmebereitstellung im Brennprozess lediglich die energiebedingten CO_2-Emissionen verringern kann. Die rohstoffbedingten Prozessemissionen, die rund zwei Drittel ausmachen, können dadurch nicht beeinflusst werden. Vor diesem Hintergrund kommt Wasserstoff eine größere Bedeutung für die Umwandlung von abgeschiedenem CO_2 in chemische Grundstoffe oder synthetische Brennstoffe zu. Für andere energieintensive Industrien, z.B. die Stahlherstellung, ergibt sich durch den Einsatz von Wasserstoff ebenfalls ein großes Potenzial zur Minderung von CO_2-Emissionen.

Einsatz von Wasserstoff bei der Klinkerherstellung

In der Zementindustrie gibt es bislang kaum verfügbares praktisches Wissen oder Erfahrungen zum Einsatz von Wasserstoff in Drehöfen – gleichwohl ist der Einsatz von Wasserstoff als Brennstoff denkbar. Allerdings ergibt sich Forschungsbedarf, da sich Wasserstoff als Brennstoff deutlich von anderen Energieträgern unterscheidet und andere Brennbedingungen erfordert.

Wasserstoffflammen zeichnen sich durch geringe Strahlungswärme aus und führen in Drehöfen der Zementindustrie zu einer schlechten Wärmeübertragung auf das Brenngut. Insofern wird Wasserstoff zunächst nur als zusätzlicher Brennstoff gemeinsam mit den bislang erprobten Materialien eingesetzt werden können. Ein Anteil an der Feuerungswärme-

Abbildung 14: Geplante Projekte zur CO_2-Speicherung in der Nordsee

● Mögliche CO_2-Speicherprojekte:
bis zu 3,7 Mrd. t CO_2 in Norwegen, Großbritannien, Niederlande*

Geplante CO_2-Hubs und mögliche Kapazitäten bis 2030:**

● ca. 5 Mio. t CO_2 p.a.
● bisher keine Angabe
● ca. 6 Mio. t CO_2 p.a.
● bislang keine Angabe
● ca. 10 Mio. t CO_2 p.a.

* Weiteres Offshore-Speicherpotenzial für Norwegen und Großbritannien wird auf 57 Mrd. t CO_2 geschätzt
** Hub = Industriecluster mit CO_2-Transportinfrastruktur

Quellen: https://oilandgasclimateinitiative.com, https://theacornproject.uk, [7]

leistung von ca. 10% am Hauptbrenner erscheint ohne negative Auswirkungen auf den Brennbetrieb möglich. Höhere Einsatzraten erfordern weitere Untersuchungen, insbesondere im Hinblick auf die Klinkerphasenbildung und demnach die Produktqualität.

Strombasierte Klinkerherstellung

Eine Umstellung des bislang brennstobasierten Klinkerbrennprozesses auf eine rein elektrische Beheizung könnte die CO_2-Emissionen aus den Brennstoffen mindern. Allerdings wirkt sich diese nur auf ein Drittel der gesamten CO_2-Emissionen des Klinkerbrennprozesses aus, da das prozessbedingte CO_2 aus der Entsäuerung des Rohmaterials unabhängig von der Art der Feuerung bzw. Beheizung entsteht. Zieht man darüber hinaus biogene Brennstoffe in Betracht, so wie sie heute bereits in Deutschland zum Einsatz kommen, dann ist das Minderungspotenzial in Hinblick auf die fossilen CO_2-Emissionen sogar noch geringer. Neben der Herausforderung, die hohe erforderliche Wärmeübertragung im Ofen darzustellen, ist der Materialtransport in elektrisch direkt beheizten Öfen bei Materialtemperaturen bis 1450 °C bisher technisch nicht gelöst. Stattdessen müssten beispielsweise Plasmabrenner zum Einsatz kommen, die verfahrenstechnisch gesehen konventionellen Brennern angepasst werden können.

Die Plasma-Technologie ist in den vergangenen Jahren für viele Anwendungsbereiche in der Stahlherstellung, der Edelmetallrückgewinnung und der Abfallentsorgung weiterentwickelt worden. In der Zementindustrie beginnen aktuell die ersten Versuche mit dieser Technologie, allerdings wurde bisher noch kein industrieller Ofen mit einem Plasmabrenner ausgerüstet. Grundsätzlich scheint aus heutiger Sicht die Plasmabrenner-Technologie die meisten Einschränkungen zu überwinden, die bei thermischen Prozessen in Kombination von fossilen und alternativen Brennstoffen mit elektrischen Wärmequellen bestehen. Die viel höheren Temperaturen und die größere Flexibilität machen sie zu einer potenziell attraktiven Alternative in der Zementindustrie. Weltweit werden Grundlagen der Plasmaerwärmung und -entwicklung erforscht sowie Prototypen für verschiedene Anwendungen eingesetzt. Plasmabrenner können ein breites Temperaturspektrum von 1.500 °C bis über 7.000 °C abdecken und könnten deshalb sowohl im Calcinator als auch im Hauptbrenner eines Drehofens zur Klinkerherstellung zum Einsatz kommen. Bislang bestehende technische Nachteile wie hoher Verschleiß, die erforderliche Kühlung der Brenner und die damit verbundenen hohen Energieverluste sind jedoch vorher zu lösen.

Die wichtigste Voraussetzung für eine elektrische Klinkerproduktion wäre in allen Fällen die sichere und dauerhafte Verfügbarkeit von CO_2-freiem Strom zu wirtschaftlichen Konditionen. Anstelle von thermischer Energie für den herkömmlichen Klinkerbrennprozess wäre für die elektrische Klinkerherstellung ein elektrischer Energieeinsatz von etwa 850 bis 900 kWh/t Klinker [5] erforderlich. Zum Vergleich: Auf Basis der 2019er Produktionszahlen ergäbe sich so für die deutsche Zementindustrie ein (erneuerbarer) Strombedarf von mindestens 21 TWh zusätzlich zu den bislang erforderlichen rund 3,9 TWh. Der Wirkungsgrad von Plasmabrennern ist derweil aktuell geringer als bei der Wasserstoff-Elektrolyse, sodass aus dieser Perspektive eine Umstellung auf Wasserstoff als Brennstoff zunächst vorzuziehen wäre. Über Forschungsvorhaben hinaus ist ein Einsatz von Plasmabrennern in der Zementindustrie aus heutiger Sicht nicht absehbar, weshalb diese Technologie in den Szenarien dieser CO_2-Roadmap nicht berücksichtigt wurde.

3.2 Zement: Klinkereffiziente Zemente und neue Bindemittel

Klinker ist der wichtigste Bestandteil von Zement; darüber hinaus kommen je nach Zementart weitere Rohstoffe zum Einsatz. Als die sogenannten Hauptbestandteile werden diese Stoffe entweder gemeinsam mit dem Klinker in entsprechenden Mahlanlagen verarbeitet oder sie werden getrennt gemahlen und anschließend gemischt. Die Zusammensetzung hängt von der jeweiligen Zementart und den in der Zementnorm definierten Mengenanteilen ab. Die Zemente weisen je nach Anwendung im Beton unterschiedliche Leistungsmerkmale auf. Diese sind aus bautechnischer Sicht von Bedeutung, weil damit Betone für unterschiedliche Anwendungen hergestellt werden können. Neben diesen bautechnischen Merkmalen kommt seit einigen Jahren dem CO_2-Gehalt von Zementen eine hohe Bedeutung zu und dieser hängt wesentlich vom Klinkeranteil im jeweiligen Zement ab.

3.2.1 Klinkereffiziente Zemente und alternative Zementhauptbestandteile

Klinkereffiziente Zemente kommen in Deutschland seit vielen Jahren zum Einsatz, auch weil dadurch die CO_2-Emissionen aus der Zementherstellung re-

5) Diese Abschätzung ergibt sich auf Basis eines thermischen Energiebedarfs bei der Klinkerherstellung von 3.060 bis 3.220 MJ/t Klinker [2].

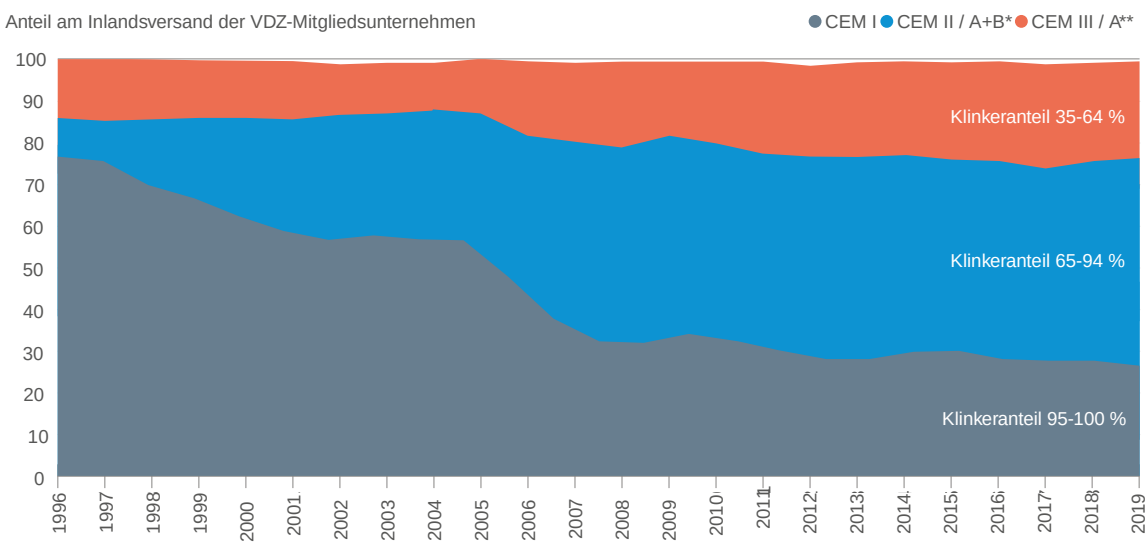
duziert werden können. Die Frage stellt sich nun, wie der Klinkergehalt in den Zementen zukünftig noch weiter gesenkt werden kann und welche Sto e perspektivisch zur Verfügung stehen, um den Klinker zu ersetzen.

Kalkstein ist bei der Zementherstellung nicht nur der wesentliche Rohsto zur Herstellung von Portlandzementklinker. Ungebrannt wird er auch als Zementhauptbestandteil verwendet. Obwohl er dabei weitestgehend inert – d.h. chemisch nicht reaktiv – ist, können damit technisch leistungsfähige Zemente hergestellt werden, die bereits heute in Deutschland eine wichtige Rolle spielen. Als weitere Hauptbestandteile werden hierzulande vor allem Hüttensand und in geringerem Maße Steinkohlen ugasche und gebrannter Ölschiefer eingesetzt [4]. Der **Klinker-Zement-Faktor** konnte so in den letzten Jahrzehnten auf 71% gesenkt und damit in signi kanter Weise CO_2-Emissionen eingespart werden.

Die große Bedeutung von Hüttensand im Rohsto mix der Zementherstellung steht dabei beispielhaft für die enge Verzahnung branchenübergreifender, industrieller Wertschöpfungsketten. Im Sinne des Klimaschutzes und der Ressourcenschonung wird es auch in Zukunft darauf ankommen, diese Potenziale zu nutzen und neue Stro kreisläufe im Sinne einer zirkulären, klimaneutralen Wirtschaft zu entwickeln. Mit dem Beschluss, die Kohleverstromung bis spätestens 2038 schrittweise einzustellen, wird in Deutschland in absehbarer Zukunft keine Steinkohlen ugasche mehr für die Zement- und Betonindustrie zur Verfügung stehen. Auch die Verfügbarkeit von Hüttensand in der bisherigen Menge und Qualität dürfte zukünftig deutlich sinken, wenn die Stahlindustrie ihre Planung umsetzen kann, die Roheisenproduktion weitgehend auf wassersto basierte Direktreduktionsverfahren umzustellen [29]. Hierbei fallen rund 40% weniger Schlacken an. Ob und in welchem Maße diese für die Verwendung in der Zementindustrie geeignet sind, ist Gegenstand von Forschungsvorhaben. Aus Sicht der Zementindustrie stellt sich daher letztlich die Frage, wie angesichts der zu erwartenden Mengenentwicklung an Hüttensand und Flugasche der Klinker-Zement-Faktor der Zemente dennoch weiter verringert werden kann.

Vor diesem Hintergrund liegt in der Herstellung und **Verwendung von CEM II/C- und CEM VI-Zementen**, die sich derzeit in der Normung be nden, ein wichtiger Ansatz, die CO_2-Emissionen weiter zu senken. In CEM II/C-Zementen kann der Klinkergehalt auf bis zu 50% reduziert werden. Der Vorteil besteht darin, dass man für diese Zemente zB. den Hütt ensandanteil auf maximal 30% begrenzt und 20 % nicht gebrannten Kalkstein hinzufügt. CEM II/C-Zemente weisen einerseits eine sehr gute CO_2-Performance auf und ermöglichen gleichzei-

Abbildung 15: Trend zu klinkereffizienten Zementen im heutigen Produktmix



Anmerkung: Di erenz zu 100 % verteilt sich auf CEM IV, CEM V und sonstige Bindemittel
* CEM II / A+B unterteilt sich größtenteils in Portlandhütten-, Portlandkalkstein- und Portlandkompositzemente
** Deckt in Deutschland ca. 95 % aller CEM III-Zemente ab

Quelle: VDZ

tig von der Leistungsfähigkeit und bautechnischen Eignung her eine sehr breite Anwendung in der Praxis. CEM VI-Zemente erlauben eine weitere Reduktion des Klinkergehalts auf zwischen 35 und 50%, dürften allerdings im Vergleich zu CEM II/C-Zementen zumindest absehbar auf bestimmte Anwendungen begrenzt bleiben. Sowohl CEM II/C- als auch CEM VI-Zemente mit jeweils 20 M.-% ungebranntem Kalkstein werden zukünftig in der EN 197-5 genormt sein (Abbildung 16).

Neben den oben genannten Stoffen bieten sich auch **calcinierte Tone als reaktive Hauptbestandteile im Zement** an. Geeignete Tone sind geologisch deutschland- und weltweit in entsprechenden Mengen und Qualitäten verfügbar. Das puzzolanische Potenzial dieser Tone, das den Beitrag zur Festigkeitsentwicklung in Zementen beschreibt, wird durch eine thermische Behandlung (Calcination) bei Temperaturen zwischen 600 bis 1.000 °C erzeugt, bei der reaktive, d.h. festigkeitsbildende Phasen entstehen.[6)] Darüber hinaus ist die Wahl der richtigen Brenntemperatur entscheidend für die spätere Eignung eines calcinierten Tons als Zementhauptbestandteil. Calcinierte Tone erfüllen die Anforderungen der Zementnorm DIN EN 197-1. Insbesondere auch in Kombination mit weiteren Hauptbestandteilen, wie beispielweise Kalkstein oder Hüttensand, wirken sie sich positiv auf die Zementleistungsfähigkeit aus. Wegen des hohen Aufwandes, die Tone zu calcinieren, werden diese bislang kaum in der Zementindustrie verwendet. Erst vor dem Hintergrund zunehmender CO_2-Minderung werden sie als Zementhauptbestandteil interessant.

In den Szenarien dieser Studie wird der Einsatz calcinierter Tone berücksichtigt, da diese Klinker bzw. Hüttensand und Flugasche in relevanten Mengen ersetzen können und damit einen Einfluss auf die CO_2-Emissionen der Zementindustrie haben. Noch nicht beantwortet ist dabei die Frage, in welchen Mengen calcinierte Tone in Deutschland in Zukunft tatsächlich in entsprechender Reaktivität hergestellt werden können. In den betrachteten Szenarien wurden dafür entsprechende Annahmen zugrunde gelegt.

Als weiterer Stoffstrom bietet sich die **Verwendung von gemahlenen Brechsanden** an. Diese entstehen beim Abbruch von (Beton-) Bauwerken und dürfen im Gegensatz zu den dabei ebenfalls anfallenden groben Recyclinggesteinskörnungen, derzeit nicht zur Herstellung von Beton verwendet werden. Insbesondere aus dem Gedanken der Kreislaufwirtschaft heraus wäre es für die Zementindustrie interessant, diese Stoffe wieder zur Herstellung von Zement einzusetzen. Da Brechsand aber weitgehend inert ist, bietet er sich nicht ohne Weiteres als Substitut für Klinker, Hüttensand oder Flugasche an. Brechsand könnte allerdings – zumindest teilweise – Kalkstein ersetzen und zur Einsparung dieser natürlichen Ressource beitragen. Eine Sonderform des Brechsandes stellen Ziegel-

6) Nicht alle Tonminerale sind gleich reaktiv. In der Reihenfolge der Tonminerale: Kaolinit – Montmorillonit – Illit – Chlorit sinkt die puzzolanische Reaktivität der calcinierten Tone [30].

Abbildung 16: Zusammensetzung besonders klinkereffizienter CEM II/C-M und CEM VI-Zemente

			Zusammensetzung (in Masse-%)								
			Hauptbestandteile								
Zementart			Klinker	Hüttensand	Silicastaub[1)]	Puzzolan	Flugasche	Gebrannter Schiefer	Kalkstein[2)]		Nebenbestandteile
CEM II	Portland-Komposit-Zement[3)]	CEM II/C-M	50-64	< ---------- 36-50 ---------- >							0-5
CEM VI	Komposit-Zement	CEM VI (S-P)	35-49	31-59	-	6-20	-	-	-	-	0-5
		CEM VI (S-V)	35-49	31-59	-	-	6-20	-	-	-	0-5
		CEM VI (S-L)	35-49	31-59	-	-	-	-	6-20	-	0-5
		CEM VI (S-LL)	35-49	31-59	-	-	-	-	-	6-20	0-5

1) Anteil begrenzt auf 6 bis 10 Masse-%
2) Anteil begrenzt auf 6 bis 20 Masse-%
3) Anzahl der Hauptbestandteile neben Klinker auf zwei begrenzt. Diese müssen durch entsprechende Bezeichnung des Zements erklärt werden.
Quelle: Norm-Entwurf prEN 197-5:2020

mehle dar: Werden keramische Bauprodukte wie Mauerwerksziegel oder Dachziegel beim Gebäudeabbruch getrennt aufbereitet, können sie in fein gemahlener Form ein puzzolanisches Reaktionspotenzial aufweisen und in geringen Mengen Klinker, Hüttensand oder Flugasche im Zement substituieren [31]. Das technische Potenzial dieser Sto e ist Gegenstand aktueller Forschungsarbeiten und noch nicht abschließend geklärt.

3.2.2 Neue Bindemittel

Weltweit wird – zum Teil bereits seit langem – daran gearbeitet, alternative Klinker bzw. Bindemittelsysteme möglichst mit geringen spezi schen CO_2-Emissionen und vergleichbarer Leistungsfähigkeit sowie Verfügbarkeit wie Portlandzementklinker herzustellen. Die Forschungen be nden sich jedoch vielfach noch im Laborstadium. Die Marktentwicklung wird in diesen Fällen Zeit für die sorgfältige technische und praktische Erprobung und Untersuchung der langfristigen Eignung erfordern. Erste Demonstrationsprojekte und auch praktische Anwendungen wurden auf den Weg gebracht. Aus heutiger Sicht wird es für den Einsatz dieser Bindemittel vielfach bei Nischenanwendungen bleiben, u.a auch deshalb, weil diese Bindemittel zum Teil Rohsto e benötigen, die überregional nicht in den erforderlichen Mengen zur Verfügung stehen. Darüber hinaus ist die technische Leistungsfähigkeit dieser Bindemittel begrenzt und die damit verbundenen Einsatzmöglichkeiten in Bauwerken eingeschränkt.

Vor diesem Hintergrund kommen unter Berücksichtigung des derzeitigen Standes der Technik und der Forschung für Deutschland mittelfristig folgende **alternative Klinker-/Bindemittelsysteme** in Frage: Calcium-Sulfoaluminat-Zemente (CSA-Zemente), Calciumhydrosilicate (CHS) sowie die Carbonatisierung von Calcium-Silicat(hydraten). Diese sind in der Infobox ausführlicher dargestellt.

Bislang existiert noch kein durchgängiges Bindemittelkonzept, mit dem Portlandzementklinker in größerem Umfang ersetzt werden könnte. Die oben beschriebenen neuen Technologien bzw. Weiterentwicklungen bestehender Konzepte dürften Portlandzementklinker bis 2050 nur in geringem Umfang – schätzungsweise nicht mehr als 5% – ersetzen und eher in Nischenprodukten mit regionaler Bedeutung (z.B. Schnell- und Reparaturzemente) und im Bereich der Bauchemie eingesetzt werden.

Neue Bindemittelsysteme – Überblick

Calcium-Sulfoaluminat-Zemente (CSA-Zemente)
CSA-Zemente sind seit langem bekannt und bestehen im Wesentlichen aus Ye'elimit, Belit, ggf. Ternesit und Calciumsulfat. Sie benötigen anders als Portlandzement hohe Anteile an geeigneten aluminium- und sulfathaltigen Rohmaterialien. Je nach Anteilen können in konventionellen Zementöfen schnell erhärtende bzw. quellfähige Zemente bei bis zu 200 °C niedrigeren Brenntemperaturen hergestellt werden. CSA-Klinker sind typischerweise leichter mahlbar als Portlandzementklinker. Zum Teil können CO_2-Einsparungen von bis zu 30 % bezogen auf Portlandzement (CEM I) realisiert werden. Gegenüber dem heutigen Zementportfolio in Deutschland (Klinker-Zement-Faktor 71%) ergeben sich dagegen vergleichsweise geringere spezi sche CO_2-Minderungspotenziale.

Calciumhydrosilicate (CHS)
Calciumhydrosilicate können in einem hydrothermalen Prozess im Autoklaven aus Quarz (SiO_2) und Branntkalk (CaO) gebildet werden. Durch verschiedene technische Verfahren (mechanisch, thermisch) werden daraus reaktive Calciumhydrosilicate (CHS) erzeugt. Als Rohsto e für die Herstellung von einer Tonne CHS (z.B. Celitement®) werden in etwa 600 kg Calciumhydroxid ($Ca(OH)_2$) und 400 kg Quarzsand benötigt. Nach bisherigen Erkenntnissen können dadurch mindestens 30 % CO_2-Einsparung bezogen auf Portlandzementklinker erreicht werden. Eine erste Industrieanlage mit einer Kapazität von 50.000 t/a ist in Planung. Gegenüber dem heutigen Zementportfolio in Deutschland (Klinker-Zement-Faktor 71%) ergeben sich entsprechend geringere spezi sche CO_2-Minderungspotenziale.

Carbonatisierung von Calcium-Silicat(hydraten)
Die Carbonatisierung von Calcium-Silicat(hydraten), z. B. von Wollastonit, führt über die Bildung von amorphem Silicium und Calciumcarbonat zur Festigkeitsbildung. Erste industrielle Versuche zur Herstellung von Klinkern aus Wollastonit ($CaOxSiO_2$) und Rankinit ($3CaOx2SiO_2$) wurden mit üblichen Rohsto en und bestehender Technologie erfolgreich durchgeführt (z. B. Solidia Cement®). Dieses nicht hydraulische Bindemittel kann zur Betonherstellung verwendet werden. Während Portlandzementklinker durch Hydratation d.h. die Reaktion mit Wasser erhärten, beruht die Festigkeitsentwicklung im vorliegenden Fall auf der Carbonatisierung der Calciumsilicate während einer CO_2- und Wärmebehandlung bei normalem Umgebungsdruck. Diese Technologie ist gegenwärtig für Fertigteilwerke bzw. die Betonwarenherstellung vorgesehen. Gegenüber dem heutigen Zementportfolio in Deutschland (Klinker-Zement-Faktor 71 %) beträgt das mögliche CO_2-Einsparpotenzial rund 60 %, wenn das beim Klinkerbrennprozess entstehende CO_2 abgeschieden und für die Carbonatisierung wiederverwendet wird.

Quelle: [3]

3.3 Beton: Ressourceneffizienz und Recarbonatisierung

Im Beton verbindet der erhärtende Zement die Gesteinskörnungen Kies bzw. gebrochener Naturstein und Sand zu einem festen Gefüge. Nach einer Verarbeitungszeit von wenigen Stunden entsteht aus dem formbaren Frischbeton ein künstlicher Stein, der über viele Jahrhunderte stabil und dauerhaft ist.

CO_2-Minderungspotenziale im Beton liegen zum einen in der Verwendung von klinkereffizienten Zementen, d.h. Zemente mit geringem Klinkergehalt. Darüber hinaus bieten optimierte Betonrezepturen das Potenzial zur weiteren CO_2-Minderung. Beides erfordert jedoch eine differenzierte Vorgehensweise, bei der die unterschiedlichen Anwendungsgebiete von Beton immer im Blick gehalten werden müssen. Letztlich gilt es, die Verarbeitbarkeit des Frischbetons und die Dauerhaftigkeit des Festbetons in allen Anwendungsfällen zu bewahren und eine Leistungsfähigkeit auch bei CO_2-optimierten Rezepturen jederzeit sicherzustellen.

3.3.1 CO_2-Optimierung von Beton

Ziel ressourceneffizienter Betonrezepturen ist es, mit möglichst geringen CO_2-Emissionen und einem möglichst geringen Einsatz an Primärrohstoffen auszukommen. Gleichzeitig muss gewährleistet sein, dass der entsprechende Beton[7)] die für den Anwendungsfall notwendige technische Leistungsfähigkeit bei gleichbleibender Qualität erfüllt. Zu den hierfür geeigneten betontechnologischen Maßnahmen gehören die Optimierung der Packungsdichte durch die Verwendung optimierter Gesteinskörnungssieblinien und ggf. Betonzusatzstoffen, die Verringerung des Wasserzementwertes und die Verwendung von Betonzusatzmitteln.

Im Labor kann Beton unter optimalen Randbedingungen z.B. mit sehr geringen Zementgehalten mit einer für bestimmte Anwendungsfälle ausreichenden Leistungsfähigkeit hergestellt werden. Voraussetzung sind ein optimales System aus Zement und Gesteinskörnungen bzw. von inerten Feinstoffen, ein sehr geringer Wassergehalt sowie ein entsprechend hoher Gehalt an Fließmitteln.

Die heutige Betonnorm umfasst solche optimierten Betonzusammensetzungen aus gutem Grund derzeit noch nicht, denn die Anwendung solcher Betone steht in der betrieblichen Praxis vor Ort auf der Baustelle vor Herausforderungen. Hierzu gehören die Umgebungsbedingungen (z.B. Schwankungen der Temperatur) sowie Feuchteunterschiede der Gesteinskörnung und damit der Wasserdosierung, die einen erheblichen Einfluss auf die Eigenschaften eines derart optimierten Frischbetons und damit auch des erhärteten Betons haben können. Darüber hinaus sind Schwankungen der Eigenschaften der Betonausgangsstoffe unter üblichen Produktionsbedingungen unvermeidlich. Diese Einflüsse müssen in der Betonrezeptur berücksichtigt werden, um die erforderlichen Frischbetoneigenschaften unter wechselnden Randbedingungen auch über lange Zeiträume im Sinne robuster Betone sicherzustellen.

Ob bei den im Labor erprobten Ressourcen- bzw. CO_2-effizienten Betonen unter Praxisbedingungen robuste Frischbetoneigenschaften erreicht werden können, ist Gegenstand der Forschung und auch der Weiterentwicklung des Regelwerks. Letztlich gilt es, geeignete Maßnahmen zur Qualitätssicherung zu entwickeln, die eine weitere signifikante Reduzierung des Klinkergehalts im Beton ermöglichen und gleichzeitig die notwendige technische Leistungsfähigkeit für Frisch- und Festbeton sicherstellen. Gelingt dies, wird das CO_2-Einsparpotenzial eines Kubikmeters Beton im Vergleich zum heutigen Durchschnitt auf etwa 30 % geschätzt. Perspektivisch wird eine zunehmend automatisierte Betonherstellung erforderlich sein, um die hohen Qualitätsanforderungen an solche Betone auch im praktischen Alltagsbetrieb sicherzustellen.

3.3.2 Verwendung klinkereffizienter Zemente im Beton

Die Verwendung klinkereffizienter Zemente ist ein wesentlicher Baustein, um weitere CO_2-Minderungspotenziale zu heben. CEM II/C- und CEM VI-Zemente werden in diesem Kontext eine wichtige Rolle spielen. Verglichen mit einem typischen Kubikmeter Transportbeton heutiger Zusammensetzung

7) Moderne Betone sind Fünf- bzw. bisweilen auch Sechs-Stoffsysteme aus Gesteinskörnung, Zement, Wasser, Zusatzstoffen, Zusatzmitteln und ggf. Fasern. Ein Kubikmeter (m³) Transportbeton der Festigkeitsklasse C25/30 enthält typischerweise rund 290 kg/m³ Zement, 42 kg/m³ Zusatzstoffe des Typ II (im Wesentlichen Steinkohlenflugasche) und 18 kg/m³ Zusatzstoffe des Typ I (Gesteinsmehle) [32].

könnten die CO_2-Emissionen z.B. durch die Verwendung eines CEM II/C-Zements um rund 25 % gesenkt werden.

Die Anwendung dieser Zemente im Beton erfolgt nach dem gültigen Regelwerk, insbesondere der Betonnorm DIN 1045-2. Berücksichtigt man dabei die jeweiligen Anwendungsfelder, die in der Norm als Expositionsklassen zusammengefasst sind, könnten durch den Einsatz von CEM II/C-Zementen im Ortbeton die CO_2-Emissionen deutlich gesenkt werden. Beispielsweise ist eine Minderung von 6% (bzw. 12%) möglich, wenn 50 % (bzw. 100%) aller Betone für Innen- und normale Außenbauteile des üblichen Hochbaus mit diesen Zementen hergestellt und verarbeitet würden. Die in dieser Studie betrachteten Szenarien berücksichtigen einen entsprechend di erenzierten Einsatz klinkere zienter Zemente im Beton.

3.3.3 Ressourcene ziente Bauteile aus Beton

Bauteile mit reduziertem Betoneinsatz können bei einer für den jeweiligen Anwendungszweck angemessenen Leistungsfähigkeit dazu beitragen, Ressourcen und CO_2 einzusparen. Folgenden Maßnahmen kommt hier aus heutiger Sicht eine besondere Bedeutung zu:

Flach- bzw. Hohldecken

Mit vorgespannten Flach- bzw. Hohldecken besteht zum Beispiel bereits heute die Möglichkeit, den Materialeinsatz zu optimieren, wenn alle zu berücksichtigenden Randbedingungen wie z.B. Schall- und Brandschutz dies zulassen. Nach [33] benötigen Spannbeton-Fertigdecken im Vergleich zu anderen Betondeckensystemen bei vergleichbaren statischen Anforderungen an die Decke bis zu 50% weniger Beton und bis zu 75% weniger Stahl.

Auch wenn sich diese Angaben nicht verallgemeinern lassen, wird aus einer Reihe von Studien und Verö entlichungen deutlich, dass Bauteile zumindest ähnlicher technischer Leistungsfähigkeit mit unterschiedlichem Ressourceneinsatz und unterschiedlicher CO_2-Intensität hergestellt werden könnten. Der Planer wird im Einzelfall entscheiden müssen, welche Lösung unter Berücksichtigung aller Randbedingungen aus Tragwerkplanung, Bauphysik, Brandschutz etc. gewählt werden kann. Die Frage der Ressourcene zienz scheint in der heute gängigen Planungspraxis noch eher von untergeordneter Bedeutung zu sein. In dieser Studie wurde eine moderate Steigerung der Nutzung solcher Technologien oder vergleichbarer, weiterer Ansätze angenommen.

Carbonbeton

Zu den weiteren Ansätzen gehört auch der Carbonbeton. Das Projektkonsortium C3 – Carbon Concrete Composite entwickelt in Zusammenarbeit mit über 160 Partnern aus Forschung und Praxis seit einigen Jahren diesen neuartigen Verbundwerksto . Statt Baustahl dienen textile und stabförmige Strukturen aus hochzugfesten Carbonfasern als Bewehrungsmaterial, wodurch die Dauerhaftigkeit erhöht und damit die Lebensdauer von Bauteilen und Bauwerken verlängert sowie Ressourcen und CO_2-Emissionen eingespart werden sollen [34].

Bei Vergleichen z.B. eines Doppel-T-Trägers aus Carbonbeton und Stahlbeton mit äquivalenter Tragfähigkeit in [35] oder auch einer Carbon- und einer Stahlbetonbrücke in [34] werden Möglichkeiten der Einsparung des Betons von teilweise 50% und eine Verringerung des Globalen Erwärmungs-

potenzials (GWP) und damit eine Verringerung der CO_2-Emissionen für die Herstellung zB. der Brücke von 30 % angegeben. Es ist heute schwierig vorherzusehen, welchen Weg diese Technologie in der Praxis nehmen wird, zumal auch Fragen des Recyclings noch weiter erforscht werden müssen. Im Zuge der Erarbeitung dieser Studie wurden moderate Anteile an Carbonbeton an der gesamten zukünftige Betonmenge angenommen.

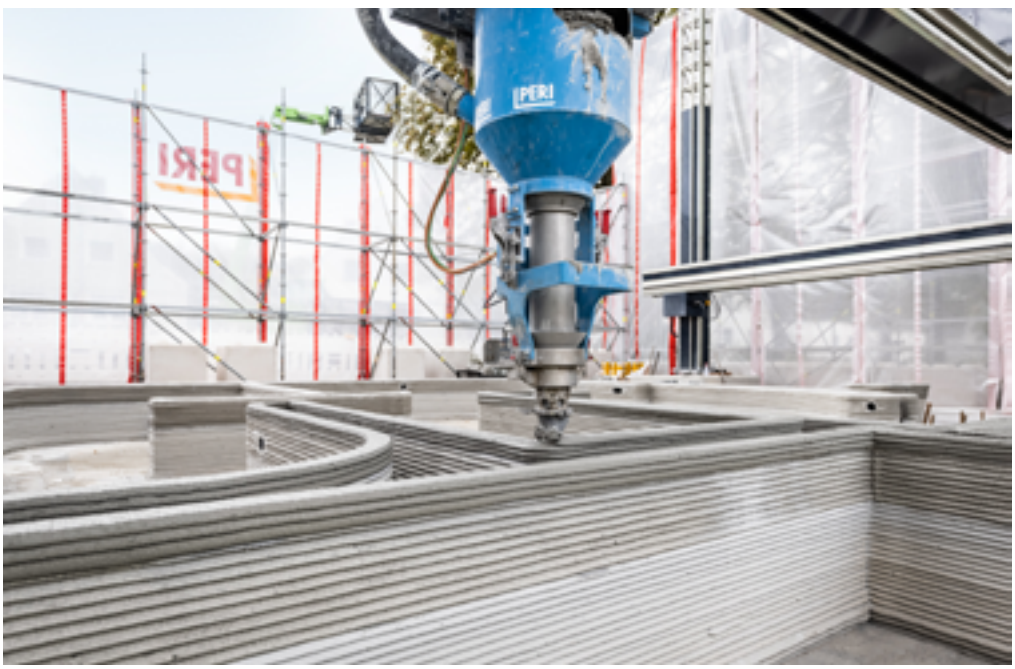
Additive Fertigung

Entwicklungen im Bereich der additiven Fertigung werden vielfach unter dem Schlagwort „3-D-Druck“ zusammengefasst (siehe Foto). Ein Überblick der Potenziale dieser Technologien geben z.B. [36, 37]. Derzeit sind die Effekte dieser neuen Verfahren im Hinblick auf Ressourceneffizienz und Klimaschutz schwierig im Detail abzuschätzen. Eine Quantifizierung erfolgte im Rahmen der Szenarien bisher nicht. Sie sind in den „betoneinsparenden“ Ansätzen wie „Hohldecke“ und „Carbonbeton“ sinngemäß enthalten.

Gradientenbeton und Leichtbau

Im Gradientenbeton wird die Betonzusammensetzung über den Querschnitt eines Bauteils variiert. Das Prinzip beruht darauf, dass Beton in tragenden Bauteilen nicht über den ganzen Querschnitt gleich stark beansprucht wird. So hat Gradientenbeton nach außen ein dichtes Gefüge mit hoher Tragfähigkeit und weist zugleich im Wandkern eine hohe Wärmedämmung durch Lufteinschlüsse auf. Infraleichtbetone ermöglichen auf ähnliche Weise durch ihre poröse Gesteinskörnung und einen entsprechend hohen Luftanteil Außenwandkonstruktionen ohne zusätzliche Wärmedämmung [38]. Mit hochfesten und ultrahochfesten Betonen lassen sich zudem schlanke Bauteile bei hohen Beanspruchungen erzielen [39].

Mit den in diesem Unterkapitel genannten Technologien können in bestimmten Anwendungsbereichen höhere Materialeffizienzen und somit Einsparungen bei Ressourcen, Energie und Emissionen erreicht werden. Wie hoch diese Effekte ausfallen, kann erst abgeschätzt werden, wenn entsprechende konstruktive Lösungen für Gebäudestrukturen entwickelt worden sind. Die betontechnischen und konstruktiven Voraussetzungen zum Einsatz ressourcenschonender Bauteile sind zudem in vielen Fällen noch in der Entwicklung oder beschränken sich auf Pilotprojekte. In Zukunft könnten sogar völlig neue Konstruktionsprinzipien entwickelt werden, wenn man mit baubionischen Strukturen den Prinzipien der Natur folgt [40].



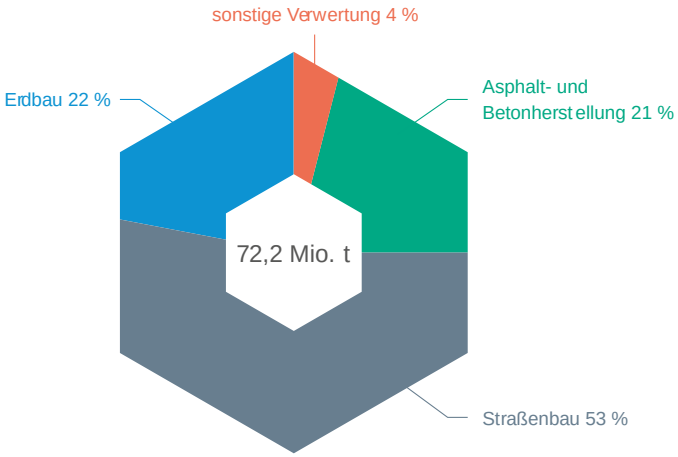
3.3.4 Betonrecycling und Kreislaufwirtschaft

Beton kann in vielfältiger Weise wiederverwendet werden, insofern hat das Recycling von Frisch- oder Festbeton eine lange Tradition. **Frischbeton- und Restwasserrecycling** sind in nahezu allen Betonwerken Deutschlands gängige Praxis. Bleiben bei der Herstellung des Betons Reste, die nicht verwendet werden können, werden diese zurückgewonnen. Dabei werden nicht erhärtete Beton- oder Mörtelreste ausgewaschen und sowohl die Gesteinskörnung als auch das anfallende Restwasser erneut als Betonausgangsstoffe wiederverwendet. Insgesamt lassen sich auf diesem Weg die Restmengen von Frischbeton praktisch vollständig wiederverwenden.

Beim **Festbetonrecycling** wird bereits erhärteter Beton zur Betonherstellung wiederverwendet. Hierzu wird der Beton zunächst zerkleinert und in einzelne Kornfraktionen getrennt. Der hieraus gewonnene Betonsplitt enthält neben der natürlichen Gesteinskörnung vor allem in seinen feineren Fraktionen Anteile des erhärteten, ursprünglichen Zements. Für die Wiederverwendung als Gesteinskörnung eignen sich in erster Linie die groben Fraktionen des zerkleinerten Altbetons [41]. Generell ließen sich aber auch die Feinfraktionen des zerkleinerten Betons in gewissem Umfang als Gesteinskörnung und damit als Ersatz für Natursand im Beton verwenden. Gemahlener Brechsand könnte darüber hinaus auch als alternativer Rohstoff in der Zementklinkerherstellung und als Zementhauptbestandteil verwendet werden, wie verschiedene Untersuchungen gezeigt haben.

Die Vorteile von solchen rezyklierten Gesteinskörnungen bestehen vor allen Dingen darin, dass sie ganz oder teilweise natürliche Gesteinskörnungen aus Kies oder gebrochenem Naturstein ersetzen und damit den Primärrohstoffbedarf reduzieren. So werden mineralische Bauabfälle (u.a Betonbruch) im Sinne einer **funktionierenden Kreislaufwirtschaft Bau** in Deutschland schon heute zu über 90 % in unterschiedlichsten Anwendungsbereichen verwertet [42]. Mehr als die Hälfte der in Deutschland hergestellten rezyklierten Gesteinskörnungen werden im Straßenbau eingesetzt; ein weiteres Fünftel wiederum zur Herstellung von Asphalt und Beton (Abbildung 17). In allen Fällen werden hierdurch die ansonsten notwendigen Primärrohstoffe ersetzt.

Abbildung 17: Verwertung von Recycling-Gesteinskörnungen in Deutschland 2016



Anmerkung: Die verbleibenden 142,4 Mio. t mineralischer Bauabfälle des Jahres 2016 wurden auf anderen Wegen überwiegend verwertet, z.B. im Berg- und Deponiebau oder der thermischen Verwertung. Nur ein geringer Anteil musste auf Deponien entsorgt werden.
Quelle: [42]

Der Einsatz rezyklierter Gesteinskörnungen in der Betonherstellung kann sich auf den Zementverbrauch, den Wasseranspruch sowie die Verarbeitbarkeit und die Verdichtung des Betons auswirken [43]. Diesen Effekten kann mit entsprechenden betontechnologischen Maßnahmen begegnet werden.

Letztlich bietet die Wiederverwendung von Beton ein signifikantes Potenzial zur weiteren Steigerung der Ressourceneffizienz und wird als Handlungsstrategie von der Zement- und Betonindustrie in Deutschland konsequent verfolgt. Das Recycling von Festbeton dient hingegen nicht per se der CO_2-Reduktion, weshalb diese Option nicht in die Modellierung der Szenarien eingegossen ist. Materialeinsparungen, die sich perspektivisch aus ressourceneffizienten Bauweisen ergeben, wurden hingegen mit einem konkreten CO_2-Minderungsbeitrag berücksichtigt.

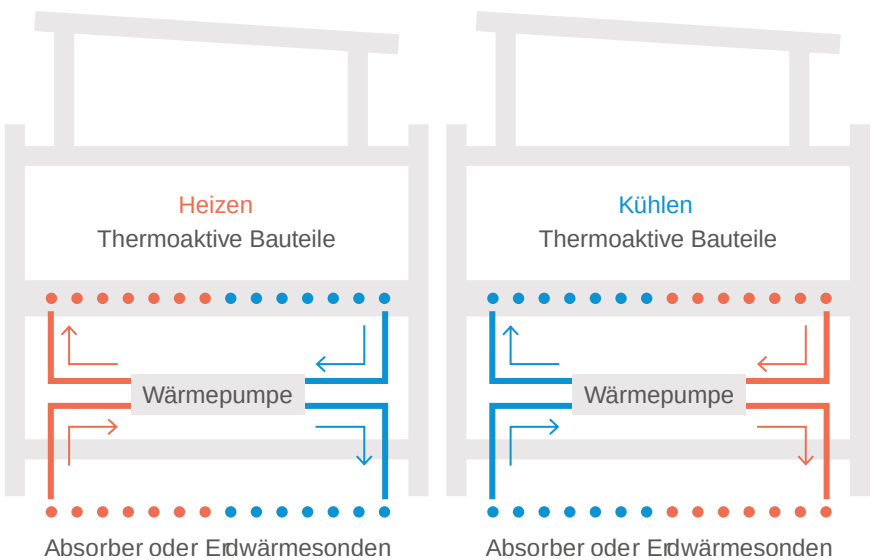
3.3.5 Thermische Vorteile von Beton

Im Leben eines Gebäudes spielt die Nutzungsphase eine wichtige Rolle. Die sich aus der Versorgung mit Strom und Wärme ergebenden CO_2-Emissionen sind in dieser Zeit am größten. Der Verbrauch an Heizenergie ist demnach ein e ektiver Ansatz, die Energiee zienz von Gebäuden zu optimieren. Beton verfügt über eine sehr **hohe Wärmespeicherfähigkeit**. So entziehen Betonbauteile beispielsweise im Sommer tagsüber der Umgebungsluft Wärme und geben sie nachts wieder ab. Auf diese Weise gleichen Gebäude mit Decken und Wänden in Massivbauweise Außentemperaturschwankungen aus. Massive Bauteile wirken wie ein Pu er, der kurzfristige Temperaturschwankungen ausgleicht und Temperaturspitzen im Gebäude kappt. Gegenüber Leichtbauweisen bietet der Bausto damit beste Voraussetzungen, den Heizenergiebedarf und damit den Ausstoß von CO_2-Emissionen über den gesamten Lebenszyklus eines Gebäudes zu reduzieren [44].

Mit der sogenannten **Bauteil- oder Betonkernaktivierung** können alle Arten von Hochbauten ganzjährig geheizt und gekühlt werden. Kombiniert mit regenerativen Energiequellen bieten Decken und Wände als thermoaktive Bauteile beste Voraussetzungen für ein energiee zientes und wirtschaftliches Bauen. Dazu wird ein Rohrsystem in die Beton-Bauteile integriert, durch das entweder warmes oder kaltes Wasser geleitet wird. Das Wasser gibt die Wärme an den Beton ab oder kühlt diesen, indem Wärme entzogen wird. Der Beton tauscht die Wärme zu 60 % über Strahlung und zu 40 % über Konvektion mit dem Raum aus. Die Energieabgabe erfolgt ohne Ein ussnahme des Raumnutzers. Das System arbeitet im energiesparenden Niedertemperaturbereich, die typische Heizleistung beträgt 25 bis 30 W/m , die Kühlleistung entsprechend 30 bis 40 W/m [45, 46]. Die aktivierten Betonbauteile bieten eine störungsfreie Technik ohne bewegliche Teile und weisen eine Lebensdauer auf, die der Baustruktur entspricht. Groß ächige Heizelemente wie Geschossdecken und evtl. Wandelemente ersetzen aufgrund ihrer großen Masse den klassischen Heizkörper und Klimaanlagen. Der zum Erwärmen oder Kühlen notwendige, geringe Energieaufwand kann bevorzugt durch regenerative Energiequellen abgedeckt werden. Umgebungswärme aus Geothermie oder dem Grundwasser, Fernwärme, Solarenergie, Photovoltaik oder anderen Energiequellen können genutzt werden.

Die Bauteilaktivierung ermöglicht es, den Energiebedarf durch entsprechende Regelung zeitlich zu verschieben und die Energiezufuhr auf jene Zeiten zu beschränken, in denen erneuerbarer Strom im Überschuss und demnach kostengünstig zur Verfügung steht [47, 48].

Abbildung 18: Schematische Darstellung der Betonkernaktivierung



Quelle: Geothermiezentrum der Hochschule Bochum

3.3.6 Recarbonatisierung: CO_2-Aufnahme von Festbeton während und nach der Nutzung

Bei der Carbonatisierung von Festbeton handelt es sich um eine natürlich vorkommende, chemische Reaktion, bei der CO_2 aus der Umgebungsluft in den Beton eindringt und mit den Hydratationsprodukten im Zementstein reagiert. Die vereinfachte chemische Gleichung ist nachfolgend angegeben:

$Ca(OH)_2$	+	CO_2	$CaCO_3$	+	H_2O
Calciumhydroxid		Kohlendioxid	Kalkstein		Wasser

Zunächst einmal ist die Carbonatisierung von Beton ein Prozess, dem die Betontechnologen ein besonderes Augenmerk zukommen lassen. Wenn der Beton von seiner Oberfläche her zunehmend CO_2 aufnimmt und dadurch carbonatisiert, und wenn diese Carbonatisierungsfront die Stahlbewehrung erreicht, kann diese bei Gegenwart von Feuchtigkeit und Sauerstoff anfangen zu korrodieren. Dadurch kann die Dauerhaftigkeit des Bauteils erheblich in Mitleidenschaft gezogen werden. Aus diesem Grund wird bei Stahlbeton darauf geachtet, dass die Carbonatisierung durch betontechnische Maßnahmen begrenzt wird und die Stahlbewehrung nicht geschädigt werden kann. So sieht das Regelwerk beispielsweise für die Bemessung von Betontragwerken Mindestwerte für die Betonüberdeckung der Bewehrung in Abhängigkeit von den Umgebungsbedingungen vor. Letztlich nimmt Beton aber auch bei Beachtung dieser betontechnischen Randbedingungen relevante Mengen an CO_2 auf.

Aus Sicht der CO_2-Bilanz ist die Carbonatisierung von zementgebundenen Baustoffen positiv zu sehen, da dadurch die CO_2-Emissionen der Zementherstellung zum Teil kompensiert werden. Die Autoren eines im November 2016 in „Nature Geoscience“ veröffentlichten Artikels [49] schätzten ab, dass für den Betrachtungszeitraum der Jahre 1930 bis 2013 43% der weltweiten CO_2-Prozessemissionen der Zementherstellung durch die Carbonatisierung von Beton und Mörtel wieder gebunden wurden. Bezieht man dieses in die Berechnung nicht nur auf die Prozessemissionen, sondern zieht die CO_2-Emissionen der Brennstoffe mit ein, wurden rechnerisch rd. 25 % der ursprünglichen Emissionen wieder gebunden.

In Ökobilanzen wird zur Quantifizierung der CO_2-Aufnahme von Beton meist zwischen der Nutzungsphase von Betonbauwerken und deren „Lebensende“ unterschieden:

- In der Nutzungsphase hängt die CO_2-Aufnahme von der Festigkeit des Betons und den Expositionsbedingungen ab. Ein Beton für Innenbauteile mit geringer Festigkeit wird z.B. in der Regel während der Nutzungsphase mehr CO_2 aufnehmen als ein hochfester Beton, der dem Außenklima ausgesetzt ist. Oberflächenbehandlungen können die Carbonatisierung verlangsamen. Die Norm DIN EN 16757 [50] enthält detaillierte Hinweise zur Ermittlung der CO_2-Aufnahme von Betonen während der Nutzungsphase.

- Die CO_2-Aufnahme des Betons nach der Nutzung des Bauwerks hängt von den ergriffenen Maßnahmen zur Behandlung, Verwertung oder Entsorgung ab. Besonders effektiv ist eine Zerkleinerung des Betons, da hierdurch die dem Kohlendioxid zugängliche Oberfläche stark vergrößert wird. Der zerkleinerte Beton sollte dann eine Zeit lang ungebunden und möglichst trocken in Kontakt mit der Außenluft gelagert werden.

Zur Quantifizierung der Carbonatisierung werden derzeit drei Berechnungsmethoden mit unterschiedlicher Komplexität beschrieben [51]. Nach der einfachsten Methode („Tier 1“) nimmt der Beton eine CO_2-Menge von rund 23 % der ursprünglichen Prozessemissionen des im Zement verwendeten Klinkers wieder auf. Die Menge verteilt sich zu 20 % auf die Nutzungsphase, zu 2% auf das Lebensende und zu 1% auf die Verwertung des Betons.

Aus verschiedenen Studien ergibt sich insofern eine Bandbreite für das Potenzial der CO_2-Aufnahme in bestehenden Gebäuden und Infrastrukturen aus Beton [52]. Für die Berechnung der in Kapitel 4 beschriebenen Szenarien wird für dieses natürliche Recarbonatisierungspotenzial ein konservativer Wert von 20 % der bei der Zementherstellung verursachten Prozessemissionen angesetzt. Demgegenüber wird die aktive Recarbonatisierung (vgl. Kapitel 3.1.4, Mineralisierung) nur implizit als mögliche CCU-Technologie berücksichtigt.

4

Szenarien zur Dekarbonisierung von Zement und Beton

Szenarien zur Dekarbonisierung von Zement und Beton

Die vorliegende Studie beschreibt zwei Szenarien zur CO_2-Minderung für die deutsche Zementindustrie und die gesamte Wertschöpfungskette Zement und Beton auf dem Weg bis 2050: ein ambitioniertes Referenzszenario und ein Szenario, mit dem letztlich die Klimaneutralität erreicht werden soll. Beide leiten sich aus den Technologien ab, die in Kapitel 3 im Einzelnen dargestellt sind. Bereits das ambitionierte Referenzszenario legt dabei sehr anspruchsvolle Annahmen zur Anwendung von verfügbaren Technologien zugrunde und erfordert deutlich mehr als eine lineare Fortschreibung der bisherigen CO_2-Minderungsmaßnahmen.

Das Szenario Klimaneutralität geht über dieses ambitionierte Referenzszenario noch einmal hinaus und stößt damit an die Grenzen des aus heutiger Sicht technisch Machbaren. Der wesentliche Unterschied zum Referenzszenario ist vor allem die Anwendung von Breakthrough-Technologien.[8] Darüber hinaus ergeben sich im Szenario Klimaneutralität auch zusätzliche Herausforderungen beim Rohsto mix. So wird davon ausgegangen, dass Klimaneutralität in diesem Szenario auch in anderen Sektoren – ua der Stahlindustrie – angestrebt wird. Daraus ergibt sich, dass 2050 beispielsweise deutlich weniger Hüttensand zur Verfügung steht, was wiederum die Herstellung CO_2-e zienter Zemente erschwert.

4.1 Aufbau der Szenarien

Die Szenarien basieren auf einem ganzheitlichen Ansatz, der die CO_2-Minderungsoptionen entlang der gesamten Wertschöpfungskette Zement und Beton wie folgt abbildet:

Zementklinker
In das Minderungspotenzial auf der ersten Wertschöpfungsstufe ießen vor allem die Faktoren thermische E zienz und Brennsto mix ein, sowie als Breakthrough-Technologie die Abscheidung und Nutzung bzw. Speicherung von CO_2 (CCUS).

Zement
Auf der zweiten Wertschöpfungsstufe ist der entscheidende Hebel die Klinkere zienz, d.h. der Gehalt von Klinker im Zement bei gleichbleibend guten Zementeigenschaften.

Beton
Auf der dritten Wertschöpfungsstufe kommen die Randbedingungen für den e zienten und di erenzierten Einsatz klinkere zienter Zemente im Beton hinzu.

Bau
Die e ziente und di erenzierte Verwendung von Beton im Bauwerk steht auf dieser Wertschöpfungsstufe im Fokus. Bisher gibt es für Betonbauwerke Normen, die – vereinfacht ausgedrückt – Einheitsregeln von der Einfamilienhausdecke bis zum Infrastrukturbauwerk formulieren. Dies wird in einigen Fällen weder der jeweiligen Komplexität der Bauaufgabe noch dem e zienten Einsatz der sto ichen Ressourcen gerecht. Hier wird es in den nächsten Jahren mit dem neuen Konzept der BetonBauQualität (BBQ)[9] jedoch einen gewissen Paradigmenwechsel geben.

Recarbonatisierung
Die fünfte Stufe der Wertschöpfungskette betri t die Recarbonatisierung während der Lebensdauer eines Bauwerks sowie nach dessen Abbruch. Dabei handelt es sich um einen natürlichen chemischen Prozess, bei dem CO_2 aus der Atmosphäre dauerhaft wieder im Beton eingebunden wird. Bereits heute nimmt der Bausto während und nach seiner Nutzung einen Teil der ursprünglich bei der Zementklinkerproduktion entstandenen CO_2-Mengen aus der Atmosphäre wieder auf. Dieser natürliche Vorgang wird bislang in den Treibhausgasinventaren nicht bilanziert und deshalb in beiden Szenarien erst 2030 bzw. 2050 als eigenständiger E ekt berücksichtigt.[10]

Für die Bestimmung von absoluten CO_2-Minderungen ist neben den oben skizzierten Beiträgen auch die Entwicklung der Baunachfrage relevant. Erst in der gemeinsamen Betrachtung von Baunachfrage und der Anwendung deutlich veränderter Technologien ergibt sich der künftige Zement- und Klinkerbedarf mit den jeweiligen CO_2-Emissionen. Bei der Baunachfrage wird bis 2030 mit einem leichten Anstieg gerechnet und bis 2050 mit einem moderaten Rückgang (vgl. Kapitel 4.3.1.). In beiden Szenarien liegt die Betonnachfrage 2050 rund 5 % unter dem heutigen Niveau.

8) Als Breakthrough-Technologien in dieser Studie zählen die Markteinführung von CEM VI-Zementen und neuen Bindemitteln, der Einsatz von Wassersto als Energieträger sowie die Abscheidung und Nutzung bzw. Speicherung von CO_2(CCUS).
9) Kernstück des BBQ-Konzepts ist die Verbesserung der Kommunikation entlang der gesamten Wertschöpfungskette von der Planung über die Betonherstellung bis zur Bauausführung. Hiermit verbunden ist die Erwartung, dass der e ziente Einsatz der sto ichen Ressourcen weiter gefördert werden kann.
10) Die aktive Recarbonatisierung (vgl. Kapitel 3.1.4, Mineralisierung) wird im Unterschied zur natürlichen nur implizit als mögliche CCU-Technologie einbezogen.

4.2 CO_2-Bilanzgrenzen

Die Szenarien dieser Studie umfassen ausschließlich direkte CO_2-Emissionen der Zementindustrie im Anwendungsbereich des EU-Emissionshandels. Da diese jährlich von der Deutschen Emissionshandelsstelle erhoben werden, lassen sich die Minderungsfortschritte gut beobachten. Indirekte Emissionen werden in den Szenarien nicht erfasst.[11] Ihr Anteil aus dem Strombezug macht heute etwa 7 bis 8 % der gesamten CO_2-Emissionen der Zementindustrie aus. An dieser Stelle wird davon ausgegangen, dass diese indirekten CO_2-Emissionen in einem anspruchsvollen Klimaschutzszenario durch die Verfügbarkeit und den Einsatz von erneuerbarer elektrischer Energie auf nahezu null zurückgehen. Diese Anstrengungen müssen im Wesentlichen vom Stromsektor ausgehen. Ähnliches gilt für die CO_2-Emissionen von Werksverkehren, Steinbruchfahrzeugen und Bergbaugeräten. Hier wird davon ausgegangen, dass deren Betrieb bis 2050 vollständig auf erneuerbare Energien (Strom, Wasserstoff, synthetische Brenn- und Kraftstoffe) umgestellt wird.

Direkte CO_2-Emissionen im Vergleich zu einer Ökobilanz

Oftmals werden die CO_2-Emissionen, die mit der Herstellung eines Produktes verbunden sind, im Rahmen einer Ökobilanzierung nach geltender europäischer Norm bestimmt und in einer Umweltproduktdeklaration (EPD) festgehalten. Im Unterschied zum hier verfolgten Ansatz werden dabei nicht nur die direkten Emissionen aus der Herstellung des Portlandzementklinkers und der calcinierten Tone betrachtet, sondern auch die Umweltwirkungen vorgelagerter Prozesse, die außerhalb des Zementwerks stattfinden. Beispiele hierfür sind:

- die Gewinnung/Verarbeitung von Roh- und Brennstoffen
- Vorketten von Roh- und Brennstoffen einschließlich deren Transport zum Zementwerk
- die Verbrennung fossiler Brennstoffe zur Trocknung von Zementhauptbestandteilen
- die Erzeugung elektrischer Energie, die im Zementwerk verwendet wird
- ggf. anteilige Umweltwirkungen aus Prozessen anderer Industrien, deren Nebenprodukte für die Zementherstellung verwendet werden (z. B. Hüttensand und Flugasche)

4.3 Ergebnisse und Bewertung der Szenarien

4.3.1 Ambitioniertes Referenzszenario

Für das ambitionierte Referenzszenario ergibt sich bis 2030 eine Minderung der CO_2-Emissionen um 19 % gegenüber dem Status quo im Jahr 2019 (ca. 40 % gegenüber 1990). Bis 2050 wird ohne den Einsatz von Breakthrough-Technologien eine Minderung um 36 % gegenüber 2019 erreicht (ca. 50 % gegenüber 1990). Zum Vergleich: Die Emissionen aus dem Einsatz der Brennstoffe machen heute rund ein Drittel der Gesamtemissionen in der Zementindustrie aus. Die CO_2-Minderung um 36 % bis 2050 kommt somit einer vollständigen Reduktion in Höhe der heutigen Brennstoffemissionen gleich. Dies zeigt, wie ambitioniert das Referenzszenario bereits ausgelegt ist und verdeutlicht zugleich, dass die Vermeidung der verbleibenden, in erster Linie Prozessemissionen, ohne Breakthrough-Technologien nicht möglich ist.

Bei der Klinkerherstellung führt die weitere Steigerung der thermischen Effizienz und des Einsatzes alternativer Brennstoffe zu Einsparungen in Höhe von jährlich rund 1,3 Mio. Tonnen CO_2. Auf Ebene des Zements trägt der breite Einsatz von CO_2-effizienten CEM II/C-Zementen (Klinkeranteil zwischen 50 und 65 %) zu einer deutlichen Reduzierung der CO_2-Emissionen um jährlich rund 1,9 Mio. Tonnen bei. Auf diese Weise wird im ambitionierten Referenzszenario eine Absenkung des Klinker-Zement-Faktors von heute 71 % auf 63 % in 2050 erreicht. Weiterentwicklungen der Betonbauweise ermöglichen zudem Materialeinsparungen und damit auch weitere CO_2-Minderungen in Höhe von jährlich etwa 0,7 Mio. Tonnen. Weitere Minderungen gehen wie oben beschrieben auf einen leichten Rückgang der Baunachfrage sowie auf den Effekt der Recarbonatisierung zurück.

In Abbildung 19 ist die CO_2-Einsparung auf Ebene des Zements detaillierter aufgeschlüsselt. Portlandzementklinker wird dabei in noch größerem Maße als heute durch andere Bestandteile im Zement ersetzt, die geeignete chemische und physikalische Eigenschaften aufweisen. Heute werden hierzu unter anderem Hüttensand aus der traditionellen Roheisenherstellung sowie in geringem Maße Flugasche aus Kohlekraftwerken eingesetzt.[12] Das ambitionierte Referenzszenario geht jedoch davon aus, dass Flugasche in Folge des Kohleausstiegs

11) Indirekte Emissionen aus dem Strombezug, Transportemissionen, Emissionen von Werks- und Steinbruchfahrzeugen und Emissionen aus Industrieanlagen, die nicht dem EU-Emissionshandel unterliegen, werden nicht betrachtet.

12) Flugasche kommt in Deutschland im Wesentlichen im Beton zum Einsatz und ersetzt dort teilweise den Zement.

bereits ab 2030 nur noch in deutlich abnehmenden Mengen eingesetzt werden kann. Für Hüttensand wird mit einer leicht geringeren Verfügbarkeit gegenüber dem heutigen Niveau gerechnet. Um den Rückgang zu kompensieren und dennoch den Klinkergehalt im Zement weiter zu reduzieren, setzt das ambitionierte Referenzszenario bereits in geringem Umfang auf calcinierte Tone als reaktiven Zementbestandteil. Die bei der Calcinierung entstehenden CO_2-Emissionen werden – anders als die Vorkettenemissionen der alternativen Rohstoffe Hüttensand und Flugasche – als direkte Emissionen im Szenario berücksichtigt, da es sich bei Ton um einen Primärrohsto handelt.

4.3.2. Szenario Klimaneutralität

Das klimaneutrale Szenario (Abbildung 20) umfasst bereits bis 2030 eine CO_2-Minderung von rund 27 % gegenüber 2019 (ca. 55% gegenüber 1990). Hierbei spielen erste Demonstrationsanlagen zur Abscheidung von CO_2 im industriellen Maßstab eine große Rolle. Auf diese Weise können aus heutiger Sicht rund 1 Mio. Tonnen CO_2 im Jahr 2030 eingespart werden. Zum Vergleich: Ein großes Zementwerk mit einer jährlichen Produktion von 1 Mio. Tonnen Zementklinker emittiert in Deutschland im Schnitt heute rund 800.000 Tonnen CO_2 im Jahr.

Bis 2050 wird im klimaneutralen Szenario unter Einsatz aller verfügbaren CO_2-Minderungshebel inklusive Breakthrough-Technologien wie CCUS eine Treibhausgasminderung von 100% erreicht. Zusätzlich können durch die nachhaltige Nutzung von biomassehaltigen Abfällen bei gleichzeitiger CO_2-Abscheidung (BECCS = Bioenergy with Carbon Capture and Storage) rund 1,6 Mio. Tonnen CO_2 aus der Atmosphäre entnommen und gespeichert werden (Carbon Dioxide Removal, CDR) [53]. Rechnerisch werden die Gesamtemissionen somit um mehr als 100% verringert.

Jährlich rund 2,2 Mio. Tonnen CO_2 können im klimaneutralen Szenario bei der Zementklinkerproduktion eingespart werden, insbesondere durch weitere Verbesserungen im Bereich der thermischen E zienz. Der Unterschied zum ambitionierten Referenzszenario ergibt sich hier vor allem daraus, dass der Brennsto mix in 2050 durchschnittlich zu 90 % aus alternativen Brennsto en mit einem Biomassegehalt von 35 % sowie zu 10% aus Wassersto besteht, der ohne CO_2-Emissionen hergestellt wurde.

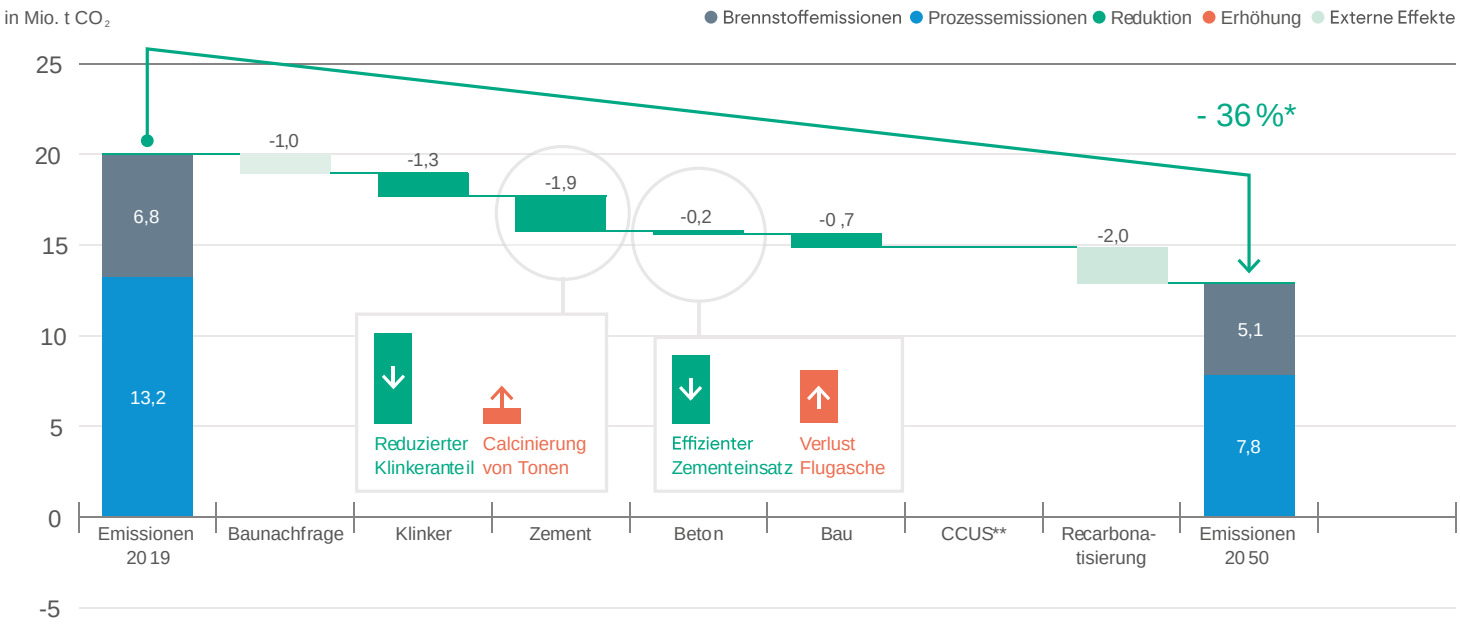
Strombedarf der deutschen Zementindustrie 2050

Die verschiedenen Technologien zur Minderung der CO_2-Emissionen im Zementherstellungsprozess gehen in der Regel mit einer deutlichen Steigerung des Strombedarfs einher. Die fortlaufende Steigerung der elektrischen E zienz an verschiedenen Stellen in der Produktionskette kann diesen zusätzlichen Bedarf an Strom durch die Nutzung neuer Technologien jedoch voraussichtlich nicht vollständig kompensieren [5].

Darüber hinaus spielen im klimaneutralen Szenario CCUS-Technologien eine entscheidende Rolle. Für den hier unterstellten Technologiemix zur CO_2-Abscheidung wird bezogen auf eine Tonne Zementklinker mit etwas mehr als einer Verdopplung des elektrischen Energiebedarfs gerechnet – von heute 156 kWh/t auf etwa 350 kWh/t in 2050. Absolut betrachtet – d.h. unter Einbeziehung aller weiteren Faktoren wie der Produktionsentwicklung bei Klinker, Zement, Beton und der Baunachfrage – dürfte der Bedarf an erneuerbarem Strom in der Zementindustrie dadurch auf etwa 5,3 TWh im Jahr steigen (2019: 3,9 TWh). Nicht eingerechnet sind dabei die erheblichen weiteren Strombedarfe insbesondere im Zusammenhang mit der Nutzung von CO_2 (CCU).

Langfristig ist darüber hinaus zu erwarten, dass auch der Steinbruchbetrieb auf elektrisch, mit Wassersto oder synthetischen Kraftsto en betriebene Schwerkraftwagen (SKWs) und Bergbaugeräte umgestellt wird. Hiermit wäre ein geringer zusätzlicher Strombedarf (ca. 3 bis 4 %) verbunden.

Abbildung 19: Ambitioniertes Referenzszenario – CO_2-Minderung bis 2050



* Davon ca. 21 % Minderung durch Maßnahmen der Wertschöpfungskette. Die verbleibenden Emissionen werden durch den erwarteten Rückgang der Baunachfrage sowie den Beitrag der Recarbonatisierung reduziert.

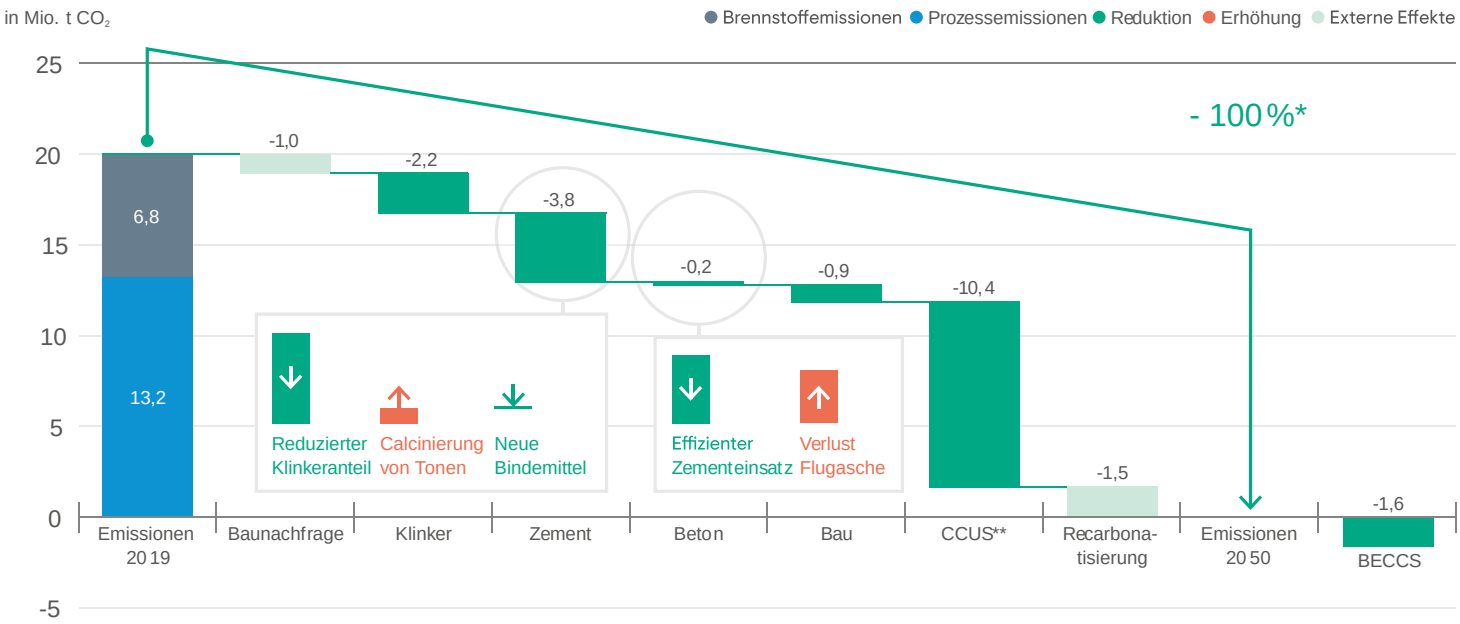
** CCUS: Carbon-Capture-Technologien mit dem Ziel der Vermeidung von CO_2-Emissionen in die Atmosphäre durch CO_2-Speicherung (CCS) und geeignete Verfahren zur CO_2-Nutzung (CCU).

Quelle: VDZ

Neue CO_2-effiziente Zemente leisten auch im klimaneutralen Szenario einen erheblichen Minderungsbeitrag. Es wird davon ausgegangen, dass neben den CEM II/C-Zementen ab 2030 zusätzlich auch CEM VI-Zemente (Klinkergehalt zwischen 35 und 50 %) erhebliche Marktanteile erreichen. Auf diese Weise wird hier eine Absenkung des Klinker-Zement-Faktors von heute 71% auf 53 % in 2050 erreicht. Verglichen mit dem Referenzszenario setzt das klimaneutrale Szenario dabei noch einen erheblich stärkeren Einsatz von calcinierten Tonen voraus, um deutlich rückläufige Hüttensandmengen zu kompensieren. Zusätzlich muss Klinker in sehr viel höherem Ausmaß als heute durch ungebrannten Kalkstein als lokal verfügbarem Rohstoff ersetzt werden. Diese anspruchsvollen Annahmen für das klimaneutrale Szenario sind aus Sicht der Zementprozesstechnik und der Betontechnologie umsetzbar, sie erfordern aber eine vollkommen andere Herangehensweise an das Bauen. Die betontechnologischen Herausforderungen sind enorm und die Umsetzung erfordert einen engen Schulterschluss aller am Bau Beteiligten. Entsprechend müssen die Regelwerke – insbesondere die Betonnormen – stärker auf den anwendungsspezifischen Einsatz der neuen Zemente ausgerichtet werden. Vor diesem Hintergrund ist die breite Marktdurchdringung von CEM VI-Zementen letztlich als Breakthrough-Technologie einzustufen.

Neue Bindemittel werden ebenfalls als Breakthrough-Technologie eingestuft. Allerdings sind die Verfügbarkeit der dafür notwendigen Rohstoffe bzw. die Anwendungsmöglichkeiten in der Regel begrenzt. Letztlich eignen sie sich nach den bisherigen Erkenntnissen in der Praxis vielfach nur für sehr spezielle Einsatzzwecke (Nischenanwendungen) und befinden sich zudem noch in einem frühen Entwicklungsstadium. Demgegenüber sind CEM II/C- und CEM VI-Zemente bereits heute grundsätzlich verfügbar und decken bei vergleichbarer CO_2-Performance ein viel breiteres bautechnisches Einsatzspektrum ab. Damit sind auch größere CO_2-Einsparungen auf Ebene der Bauwerke erreichbar.

Abbildung 20: Szenario Klimaneutralität – CO_2-Minderung bis 2050



* Davon ca. 88 % Minderung durch Maßnahmen der Wertschöpfungskette. Die verbleibenden Emissionen werden durch den erwarteten Rückgang der Baunachfrage sowie den Beitrag der Recarbonatisierung reduziert.

** CCUS: Carbon-Capture-Technologien mit dem Ziel der Vermeidung von CO_2-Emissionen in die Atmosphäre durch CO_2-Speicherung (CCS) und geeignete Verfahren zur CO_2-Nutzung (CCU).

Quelle: VDZ

Jährlich rund 0,9 Mio. Tonnen CO_2-Einsparung können in 2050 ferner durch Veränderungen in der Betonbauweise erzielt werden. Hier spielt eine entsprechende Gebäudeplanung eine wichtige Rolle. Es werden verstärkt Bauweisen genutzt, die mit einem geringeren Betonvolumen eine gleichbleibende Leistungsfähigkeit erzielen. Beispiele sind Betonfertigteile in Form von Spannbetonhohldecken, aber auch Carbonbeton oder der Einsatz additiver Fertigung (3D-Druck). Da zum Beispiel beim Carbonbeton Fragen des Recyclings oder auch des Brand- und Lärmschutzes bislang noch erforscht werden, geht auch das klimaneutrale Szenario weiterhin von einem hohen Anteil der „konventionellen“ Stahlbetonbauweise aus.

Von den heute jährlich rund 20 Mio. Tonnen CO_2 verbleiben im klimaneutralen Szenario bis 2050 trotz aller Minderungsmaßnahmen entlang der gesamten Wertschöpfungskette noch rund 10,4 Mio. Tonnen CO_2, die technisch ausschließlich durch CCUS-Technologien reduziert werden können. Dieses Ergebnis deckt sich mit den Abschätzungen z.B. der IPCC-Berichte der Vereinten Nationen [54]: "Some industries, in particular cement, emit CO_2 as inherent process emissions and can therefore not reduce emissions to zero without CC(U)S." Indirekte Minderungspotenziale etwa über klinkereffiziente Zemente und Materialeffizienz sind in diesem Szenario bereits ausgeschöpft. Das Ergebnis zeigt daher deutlich, dass Klimaneutralität in der Zementindustrie ohne CO_2-Abscheidung technisch nicht realisierbar ist. Bedacht werden muss hierbei, dass das bisher bekannte und umsetzbare Nutzungspotenzial (CCU) für CO_2 in Deutschland derzeit deutlich unterhalb von 10 Mio. Tonnen CO_2 pro Jahr liegt und von daher entsprechend auf- bzw. ausgebaut werden muss. Um in Deutschland, Europa und weltweit die Klimaneutralität der Zementherstellung zu erreichen, wird daher in Hinblick auf industrielle Prozessemissionen kein Weg an der mineralogischen und geologischen Einbindung von CO_2 vorbei führen (CCS). Hierfür eignen sich aus heutiger Sicht zunächst geeignete Offshore-Speicherstätten in der Nordsee sowie die Einbindung in mineralischen Baustoffen.

4.4 Methodik und Annahmen

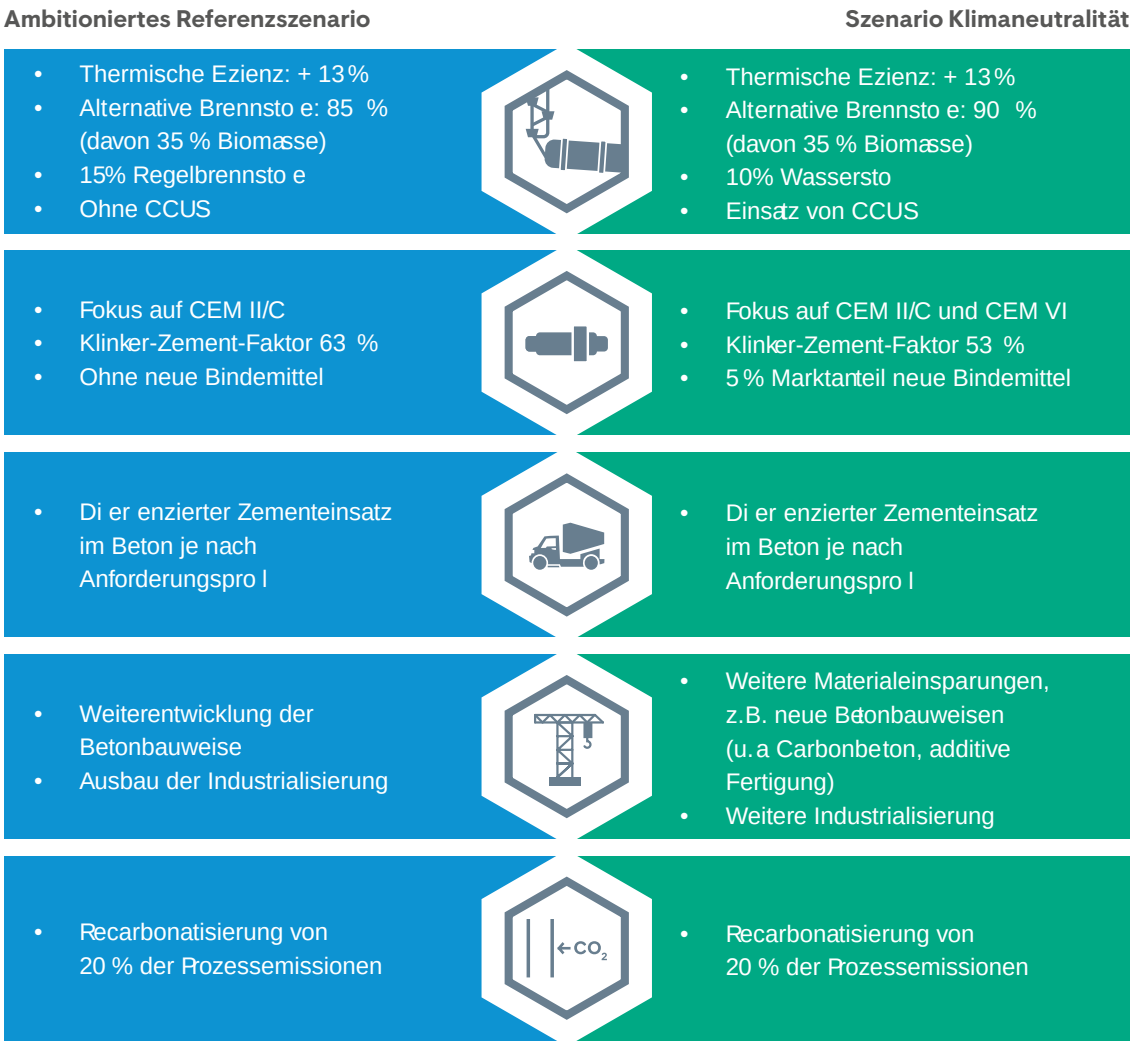
Die zuvor beschriebenen Minderungspotenziale in den betrachteten Szenarien basieren auf einer Vielzahl von Annahmen, die im Folgenden näher beschrieben und erläutert werden. Ein Überblick der wichtigsten Annahmen ist Abbildung 21 zu entnehmen.

4.4.1 Entwicklung der Baunachfrage

Die Annahmen zur Baunachfrage gelten sowohl für das Referenz- als auch für das klimaneutrale Szenario. Ausgangspunkt sind dabei statistische Daten zum Zement- und Betonmarkt in Deutschland aus den Jahren 2018 und 2019. Im ersten Schritt wird ein Szenario zur Entwicklung der Neubautätigkeit und der nachgefragten Betonmengen bis 2050 definiert. Mögliche Materialeinsparungen durch eine ressourcenschonendere Bauweise werden dagegen separat berücksichtigt.

Für die Errichtung von Wohnungsbauten wird von einer konstanten Neubautätigkeit von ca. 250.000 Wohnungen p.a. bis ins Jahr 2030 ausgegangen.[13)] Der sich während der letzten Jahre aufstauende Wohnraumbedarf insbesondere in Ballungsräumen und Universitätsstädten dürfte bis 2030 in großen Teilen realisiert sein. Von 2030 bis 2050 ist aus heutiger Sicht mit einer rückläufigen Wohnungsbautätigkeit auf 200.000 Wohneinheiten p.a. zu rechnen.

Abbildung 21: Annahmen zum Technologiemix in den Szenarien bis 2050



Quelle: VDZ

13)Ohne fertiggestellte Wohnungen in Bestandsgebäuden.

Im sehr heterogenen Segment des Nichtwohnbaus wird eine konstante Bautätigkeit bis 2050 angenommen. Neben Industrie- und landwirtschaftlichen Bauten fallen in diese Kategorie unter anderem auch Anstalts-, Büro-, Verwaltungs- sowie Schulgebäude.

Vor dem Hintergrund eines hohen Bedarfs in den Bereichen Energie- und Verkehrsinfrastruktur[14)] wird im Tiefbau mit einer zunehmenden Bautätigkeit bis ins Jahr 2040 gerechnet. Angenommen wird dabei ein jährliches Wachstum der Betonmenge von 0,5 %. Nach 2040 sinkt diese pro Jahr in der gleichen Größenordnung.

Insgesamt ergibt sich aus dem oben beschriebenen Szenario bis 2050 ein Rückgang der eingesetzten Betonmengen um ca. 5% gegenüber dem heutigen Stand.

4.4.2 Annahmen: Klinkerherstellung

Im Bereich der Klinkerherstellung wurden die folgenden Ansätze zur Minderung der CO_2-Emissionen einbezogen. Das Bezugsjahr ist dabei jeweils 2019.

Thermische Energieeffizienz
Sowohl im ambitionierten Referenz- als auch im klimaneutralen Szenario wird von einer weiteren Steigerung um 3% bis 2030 bzw. um 13% bis 2050 ausgegangen.

Alternative Brennstoffe
Der bereits heute hohe Anteil alternativer Brennstoffe am thermischen Energieeinsatz nimmt weiter zu. Im ambitionierten Referenzszenario steigt dieser von heute rund 69 % auf 75 % in 2030 bzw. auf 85 % in 2050. Um jeweils 5 Prozentpunkte höher liegen die Annahmen für das klimaneutrale Szenario, d.h. 80% in 2030 und 90 % in 2050.

Biomasse in alternativen Brennstoffen
Der klimaneutrale Biomasseanteil alternativer Brennstoffe liegt heute bei etwa 30 %. Für 2050 gehen beide Szenarien von einer Steigerung um weitere 5 Prozentpunkte auf 35 % aus.

Wasserstoff
Um gänzlich auf fossile Standardbrennstoffe zu verzichten, werden im klimaneutralen Szenario die verbleibenden 10% des thermischen Energieeinsatzes bei der Klinkererzeugung in 2050 durch CO_2-freien Wasserstoff gedeckt. Darüber hinaus wird auch der zusätzliche thermische Energiebedarf durch den Einsatz von Post-Combustion-CO_2-Abscheidungstechnologien vollständig mit Wasserstoff gedeckt. Insgesamt sind deshalb in diesem Szenario ab 2050 jährlich rund 160.000 Tonnen bzw. 5,2 TWh Wasserstoff für die Zementherstellung erforderlich.

CO_2-Abscheidung, -Nutzung und -Speicherung
Diese Breakthrough-Technologie wird nur im Szenario Klimaneutralität betrachtet. So wird für das Jahr 2030 zunächst von einer anfänglichen Nutzung der CO_2-Abscheidung in einzelnen Werken ausgegangen (für rund 6 % der Klinkerproduktion). Im Jahr 2050 führt eine branchenweit nahezu vollständige Abscheidung der verbleibenden CO_2-Mengen nach Berücksichtigung aller anderen Minderungsoptionen zur CO_2-Neutralität. Teils werden auch CO_2-Mengen abgeschieden, die aus der Nutzung von biomassehaltigen Abfällen stammen (BECCS; 1,6 Mio. Tonnen CO_2 in 2050). Diese werden somit dauerhaft der Atmosphäre entzogen und tragen als negative Emissionen positiv zur Klimabilanz bei.

4.4.3 Annahmen: Zementherstellung

Für die Herstellung des Zements gehen verschiedene Annahmen in die Berechnungen ein, die sowohl positive als auch negative Effekte auf die Treibhausgasbilanz haben:

Flugasche
Im Zuge des Kohleausstiegs der Bundesrepublik Deutschland bis zum Jahr 2038 dürfte sich die Verfügbarkeit von in Deutschland produzierter Flugasche bis 2030 deutlich von heute rund 3,1 Mio. auf 0,9 Mio. Tonnen jährlich verringern [55]. Dementsprechend spielt Flugasche in beiden Szenarien ab 2030 sowohl im Zement als auch im Beton eine zunehmend geringere Rolle. Für 2050 wird angenommen, dass Flugasche hierfür überhaupt nicht mehr zur Verfügung steht.

Hüttensand
Zur Herstellung von Portlandhütten- sowie Hochofenzementen stellt der aus der Roheisenherstellung stammende Hüttensand heute neben Portlandzementklinker den zweiten wichtigen Hauptbestandteil dar. Seine Verfügbarkeit hängt maßgeblich von der Frage ab, wie die Stahlindustrie in Deutschland ihre Produktion umstellt, um ihren CO_2-Fußabdruck zu verringern. Im ambitionierten

14)Insbesondere Ausbau von Stromnetzen, Windkraft und Schienenverkehr.

Referenzszenario wird über den gesamten Betrachtungszeitraum nur ein sehr leichter Rückgang bei der Hüttensandverfügbarkeit gegenüber dem Status quo angenommen. Demgegenüber geht das klimaneutrale Szenario von einem Rückgang der Mengen von heute jährlich rund 5 Mio. auf 4 Mio. Tonnen in 2030 sowie auf 2 Mio. Tonnen in 2050 aus.

Calcinierte Tone

Künftig dürften calcinierte Tone eine größere Rolle als Hauptbestandteil im Zement spielen. Gegenüber dem im Drehofen gebrannten Klinker bringen sie eine deutlich geringere CO_2-Fracht mit, die sich im Mittel auf etwa 150 kg CO_2 pro Tonne Ton beläuft. Im ambitionierten Referenzszenario wird angenommen, dass in 2030 etwa 1,2 Mio. Tonnen bzw. in 2050 1,7 Mio. Tonnen calcinierte Tone für die Zementherstellung zur Verfügung stehen. Das klimaneutrale Szenario rechnet mit einer größeren Verfügbarkeit von 2,5 Mio. Tonnen in 2030 sowie 4,5 Mio. Tonnen in 2050.

Kalksteinmehl

Nachdem die in beiden Szenarien zugrunde gelegten Mengen an Hüttensand und calcinierten Tonen ausgeschöpft sind, wird der verbleibende Bedarf an Hauptbestandteilen neben Klinker durch ungebrannten Kalkstein gedeckt. Im Sinne der Kreislaufwirtschaft kann gegebenenfalls auch gemahlener Brechsand aus der Aufbereitung von Beton aus Gebäudeabbrüchen als Zementbestandteil eingesetzt werden.

Neue Bindemittel

Diese Minderungstechnologie wird nur im klimaneutralen Szenario betrachtet. In 2050 werden ca. 5 % des Zementbedarfs durch neue Bindemittel gedeckt (2030: ca. 1%).

4.4.4 Annahmen: Betonherstellung und -anwendung

Folgende Annahmen sind mit Blick auf Herstellung und Anwendung von Beton in die Berechnungen einge ossen:

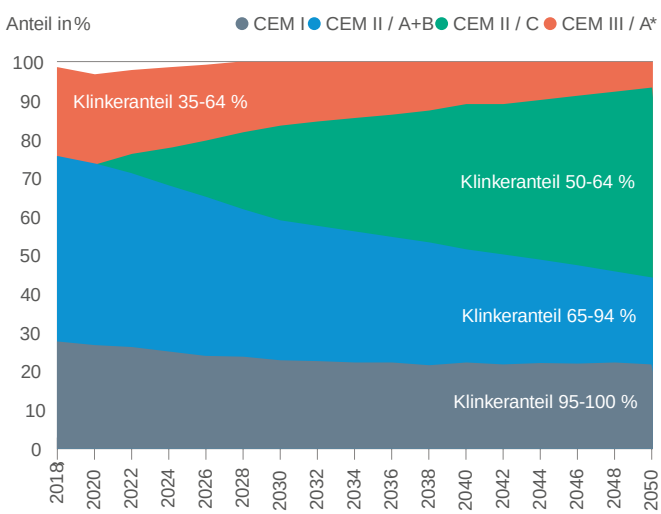
Flugasche

Mit abnehmender Flugascheverfügbarkeit fehlt dieser Zusatzsto zukünftig auch bei der Herstellung von Beton. Die Di erenz gegenüber der heutigen Einsatzmenge muss anteilig durch Zement (40%) sowie bei Bedarf durch inerte, d.h. chemisch weitgehend nicht reaktive Gesteinsmehle oder andere Sto e (z. B. Recyclingmaterialien) ersetzt werden (60 %). Diese Anteile sind aus der normativen Anrechenbarkeit von Flugasche im Beton abgeleitet (k-Wert von 0,4).

Ortbeton

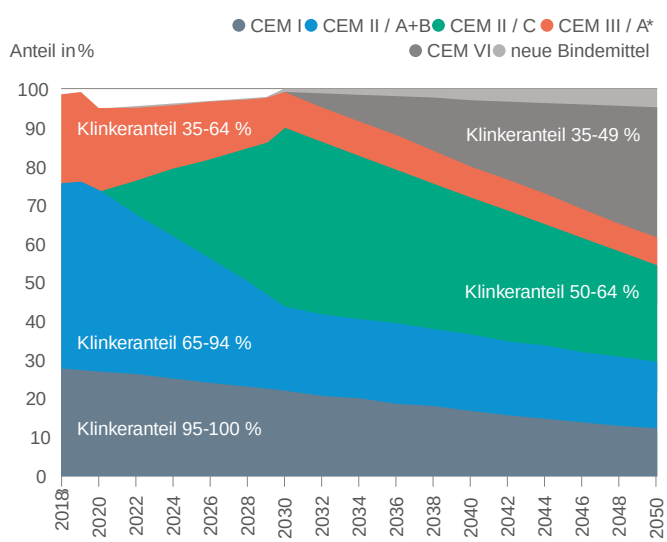
Hinter diesem Begri verbirgt sich überwiegend Transportbeton sowie in kleineren Mengen Bau-

Abbildung 22: Zementportfolio im ambitionierten Referenzszenario



Anmerkung: Di erenz zu 100 % verteilt sich auf CEM IV, CEM V und sonstige Bindemittel
* Deckt in Deutschland ca. 95 % aller CEM III-Zemente ab
Quelle: VDZ

Abbildung 23: Zementportfolio im Szenario Klimaneutralität



Anmerkung: Di erenz zu 100 % verteilt sich auf CEM IV, CEM V und sonstige Bindemittel
* Deckt in Deutschland ca. 95 % aller CEM III-Zemente ab
Quelle: VDZ

stellenbeton, der direkt auf der Baustelle hergestellt wird. Für die Berechnungen wurde angenommen, dass zur Herstellung von Innen- und normalen Außenbauteilen des Hochbaus vermehrt Zemente mit geringerem Klinkeranteil, wie zum Beispiel CEM II/C-Zemente (zwischen 50 und 65 % Portlandzementklinker) verwendet werden. So erhöht sich der Anteil dieser Zemente in diesem Marktsegment im ambitionierten Referenzszenario auf 50 % in 2030 bzw. auf 100% in 2050. Im klimaneutralen Szenario liegt der Anteil von CEM II/C- Zementen in den genannten Anwendungen bereits in 2030 bei 100 %. In 2050 werden für die genannten Anwendungen ausschließlich CEM VI-Zemente eingesetzt.

Konstruktive Fertigteile

In diese Produktgruppe fallen unter anderem großformatige Wand- und Deckenplatten aus Beton. Da hier ein schnelleres Aushärten des Betons (kürzere Ausschalfristen) und damit höhere Klinkergehalte im Zement erforderlich sind, wird für das ambitionierte Referenzszenario das gleiche Zementportfolio zugrunde gelegt wie im Status quo. Erst im klimaneutralen Szenario werden hier klinkere zientere CEM II/C-Zemente verwendet (2030: 20 %, 2050: 30 %).

Betonwaren

Neben Mauer-, Dach- und P astersteinen gehören hierzu unter anderem auch Bahnschwellen. Bei der Herstellung von Betonwaren unterscheidet man vielfach zwischen Kernbeton („tragender" Bestandteil) und Vorsatzbeton, der aus gestalterischen, bauphysikalischen oder auch akustischen Gründen dem tragenden Beton vorgesetzt wird. Wie beim Ortbeton wird davon ausgegangen, dass Teile des Betons mit CEM II/C-Zementen hergestellt werden können. Im ambitionierten Referenzszenario beläuft sich dieser Anteil in 2030 auf 30 % des Kernbetons. Alle weiteren Mengen werden in ähnlicher Weise wie heute hergestellt. Bis 2050 werden jeweils 50 % des Vorsatz- und des Kernbetons mit CEM II/C- oder vergleichbaren Zementen hergestellt. Höhere Anteile ergeben sich entsprechend im klimaneutralen Szenario: Sowohl Vorsatz- als auch Kernbeton werden bereits 2030 zu jeweils 30 % mit CEM II/C-Zementen hergestellt; in 2050 wird der Vorsatzbeton zu 50 % bzw. der Kernbeton zu 100% unter Verwendung derartiger Zemente hergestellt.

Decken

Stellvertretend auch für andere Bauteile wird bei Betondecken eine gewisse Verlagerung vom Ortbeton hin zur Vorfertigung angenommen. Damit einher geht die Annahme, dass es sich bei den vorgefertigten Decken z.B. um Spannbetonhohldecken mit einem verminderten Betonanteil handelt. Das Verhältnis zwischen den vor Ort hergestellten Massivdecken und den Spannbetonhohldecken verändert sich in beiden Szenarien im Vergleich zum Status quo deutlich. So wird mit einem Hohldecken-Anteil von 25 % in 2030 bzw. von 50 % in 2050 gerechnet (2019: 3 %). Auch die Ortbetonbauweise bietet bei einer Erhöhung des Industrialisierungsgrades entsprechende Möglichkeiten der E zienzsteigerung.

Weitere Bauteile und Bauweisen mit geringeren Betonmengen

Neben Spannbetonhohldecken sind weitere Technologien vorstellbar, mit denen bei gleichen Bauteileigenschaften geringere Betonmengen erforderlich wären. Als Beispiele können Carbonbeton oder auch Betone aus additiver Fertigung (3D-Druck) genannt werden. Diese Technologien spielen im ambitionierten Referenzszenario erst nach 2030 eine größere Rolle: 10% des Stahlbetonbaus (Ortbeton + Betonfertigteile) werden bis 2050 durch derartige Lösungen ersetzt. Für die entsprechenden Bauteile wird mit einer Betoneinsparung von im Mittel 20 % gerechnet. Im Szenario Klimaneutralität wird dieser Zustand bereits im Jahr 2030 erreicht, während in 2050 20 % des Stahlbetonbaus ersetzt werden. Hier wird für die entsprechenden Bauteile eine Verringerung der Betonmenge im Mittel um 30 % angenommen.

In Summe führen alle diese Maßnahmen zu Zementportfolios, wie sie in den Abbildungen 22 und 23 dargestellt sind.

4.4.5 Annahmen: Recarbonatisierung

In beiden Szenarien wird davon ausgegangen, dass CO_2 in Höhe von 20% der Prozessemissionen der Zementklinkerherstellung vom Beton wieder eingebunden wird. Dieser Anteil bewegt sich am unteren Ende der Bandbreite, die sich aus verschiedenen Studien zu diesem Thema ergibt [52]. Da der Klinkereinsatz und damit die Prozessemissionen in Folge der CO_2-Minderungstechnologien im Zeitverlauf zurückgehen wird, sinkt zumindest rechnerisch auch die CO_2-Minderung durch die Recarbonatisierung. In die Modellrechnung der Szenarien ießt lediglich die natürlich statt ndende passive Recarbonatisierung ein. Die aktive Recarbonatisierung (vgl. Kapitel 3.1.4, Mineralisierung) wird dagegen nur implizit als mögliche CCU-Technologie einbezogen.

5

Handlungsfelder und Voraussetzungen für eine erfolgreiche Transformation

Handlungsfelder und Voraussetzungen für eine erfolgreiche Transformation

Bei der Erprobung und Anwendung geeigneter CO_2-Minderungsverfahren sind die Zementhersteller in Deutschland bereit, Verantwortung für die Dekarbonisierung ihrer Prozesse und Produkte zu übernehmen. Die Transformation hin zu einer klimaneutralen Gesellschaft ist aber nicht nur eine technische Herausforderung. Es wird vielmehr auch darauf ankommen, die hierfür erforderlichen externen Voraussetzungen und Rahmenbedingungen rechtzeitig zu scha en. Hier ist ein Miteinander der Akteure aus Wirtschaft, Politik, Wissenschaft und Zivilgesellschaft erforderlich, das gilt vor allen Dingen für die folgenden fünf Handlungsfelder.

5.1 Erneuerbare Energien und Stromnetze

Hohe Energiee zienz und eine ächendeckende, ausreichende und kostengünstige Verfügbarkeit CO_2-freien Stroms sind nicht nur die Grundlage für einen emissionsfreien Energiesektor, sondern auch für die Dekarbonisierung der Industrie, des Mobilitäts- und des Gebäudesektors. In den Grundsto ndustrien wird grüner Strom benötigt für die Elektri zierung der Herstellprozesse, für die Herstellung von synthetischen Gasen, Brenn- und Kraftsto en und „grünem“ Wassersto . [15)] Auch der emissionsfreie Betrieb von Anlagen zur Abscheidung, Nutzung, zum Transport und perspek tivisch zur Speicherung von CO_2 aus industriellen Prozessen [56] erfordert entsprechende Mengen grünen Stroms zu wirtschaftlichen Konditionen.

Vor diesem Hintergrund wird der Bedarf an erneuerbarem Strom in Deutschland auf dem Weg zur Klimaneutralität sehr stark steigen [21, 56, 57, 58]. Zwar unterscheiden sich die Erwartungen in der Höhe des Zuwachses meist aufgrund unterschiedlicher Annahmen.[16)] Alle Prognosen gehen aber davon aus, dass eine ächendeckende Ausweitung des CO_2-freien Stromangebots eine entscheidende Voraussetzung für eine klimaneutrale industrielle Produktion in Deutschland sein wird.

Im Zuge der Dekarbonisierung von Zement und Beton wird sich der Strombedarf der Klinkerherstellung u.a durch den breiten Einsatz von Technologien zur CO_2-Abscheidung mehr als verdoppeln. Insgesamt ergibt sich dadurch für eine im Jahr 2050 klimaneutrale Zementindustrie ein zusätzlicher Bedarf von etwa 1,4TWh pro Jahr, gemessen am derzeitigen Stand. Dies entspricht im Vergleich zu anderen Branchen zwar einem immer noch relativ moderaten Anstieg, allerdings umfassen diese Strommengen keine Veredelungsschritte für eine Umwandlung des CO_2. Außerdem geht diese Studie davon aus, dass eine strombasierte Klinkerherstellung absehbar nicht realisierbar ist.

Insgesamt bedarf es eines dynamischen, kostene zienten Ausbaus der erneuerbaren Energien in den nächsten Jahren und Jahrzehnten. Damit eng verbunden ist der Stromnetzausbau, der weiter deutlich beschleunigt werden muss, damit CO_2-freier Strom ächendeckend in allen Regionen in Deutschland zur Verfügung steht – auch dort, wo aktuell innovative Industrieprojekte geplant werden. Die Kosten für die Stromnetzanbindung sollten dabei in ein geeignetes Förderspektrum einbezogen und entsprechende Genehmigungsverfahren für Dekarbonisierungsprojekte – bei frühzeitiger Einbindung der Anwohner – vereinfacht werden.

Neben grünem Strom kommt auch in Zukunft der Verfügbarkeit abfallstämmiger, biomassehaltiger Brennstoffe bei der Reduzierung der energiebedingten CO_2-Emissionen in der Zementindustrie eine wichtige Bedeutung zu. Die heutigen gesetzlichen Rahmenbedingungen im Bereich der Abfall- und Kreislaufwirtschaft gewährleisten einen hohen Einsatz alternativer Brennstoffe bei der Zementklinkerherstellung. Dieses gilt es auch zukünftig zu ermöglichen. Auf dem Weg zur Klimaneutralität ist es daher wichtig, mögliche Wechselwirkungen zwischen Klima-, Abfall- und Ressourcenpolitik, die sich heute bei bestimmten Stoffströmen abzeichnen, frühzeitig aufzulösen und entsprechend auszutarieren. Der Einsatz alternativer Brennstoffe in der Zementindustrie bietet aufgrund der gleichzeitigen energetischen und stofflichen Nutzung (Co-Processing) im Herstellungsprozess in dieser Hinsicht große Vorteile.

15) Unter „grünem Wassersto “ wird die Herstellung von Wassersto durch Elektrolyse unter ausschließlichem Einsatz erneuerbarer Energien verstanden. Sogenannter „türkiser Wassersto “ wird aus Methan hergestellt, wobei der verbleibende Kohlensto als Feststo anfällt (Methanpyrolyse). „Grauer Wassersto “ wird demgegenüber aus fossilen Brennsto en (z. B. Erdgas) hergestellt, wobei CO_2 in die Atmosphäre emittiert wird (Dampfreformierung). „Blauer Wassersto “ wird ähnlich wie „grauer Wassersto “ hergestellt, wobei das entstehende CO_2 abgeschieden und in der Regel gespeichert wird (Dampfreformierung mit CCS).

16) Dies liegt u.a daran, in welchen Sektoren der zusätzliche Strombedarf z.B. für die Wassersto herstellung bilanziert wird und inwiefern Energieimporte z. B. in Form von Wassersto und mit erneuerbaren Energien erzeugtem Strom einbezogen werden.

5.2 Infrastruktur für den CO_2-Transport

Das Szenario für eine klimaneutrale Zementindustrie zeigt, dass nach Ausschöpfung aller Potenziale auch die Abscheidung von rund 10 Mio. Tonnen CO_2 pro Jahr erforderlich ist. Diese Mengen dürfen nicht in die Atmosphäre gelangen, sondern müssen dauerhaft gebunden oder gespeichert werden. Der Aufbau funktionierender Infrastrukturen wird daher entscheidend sein für die Entstehung von neuen CCUS-Wertschöpfungsketten. Das gilt nicht nur für den sicheren Transport des CO_2 von der Quelle zur Senke. Letztlich erfordert auch die Versorgung mit Wassersto und CO_2-freiem Strom den Aufbau und Betrieb geeigneter Infrastrukturen. Dieses Handlungsfeld eint im Übrigen alle Grundsto ndustrien, allen voran die Zementherstellung sowie die Chemie- und die Stahlindustrie.

In Regionen, in denen eng verzahnte industrielle Cluster und damit kurze Transportwege existieren, kann CCU perspektivisch einen relevanten CO_2-Minderungsbeitrag leisten. Gemessen am Ziel der Klimaneutralität wird diese Technologie allerdings nur einer von mehreren Bausteinen sein, nicht zuletzt da die Aufnahmekapazität für CO_2 als Rohsto in der chemischen Industrie und der Mineralölwirtschaft in den kommenden Jahre erst zunehmend aufgebaut werden muss [21]. Zu prüfen ist dabei auch, in welchem Maße das CO_2 dauerhaft gebunden oder in Teilen nach einer gewissen Zeit wieder emittiert wird.

Vor diesem Hintergrund wird der dauerhaften Einbindung und Speicherung von CO_2 mit Blick auf das Ziel der Klimaneutralität eine Schlüsselrolle zukommen. Wie bei CCU besteht hierbei eine Herausforderung darin, das im Zementwerk abgeschiedene CO_2 per Schi , Zug, LKW oder perspektivisch auch per Pipeline zu geeigneten Speicherstätten beispielsweise in der Nordsee zu transportieren. Zur Orientierung: Überschlägig gerechnet würde die sich im klimaneutralen Szenario ergebende jährliche CO_2-Menge von rund 10 Mio. Tonnen für CCUS in der Zementindustrie eine Transportkapazität von rund 10.000 Güterzugfahrten oder von 500.000 LKW-Fahrten pro Jahr in Deutschland notwendig machen [59].

In der Anfangsphase gilt es, einen di erenzierten Modal-Split aus verschiedenen Transportformen zu entwickeln. Letztlich wird es aber erforderlich sein, ein geeignetes Pipelinesystem als Rückgrat einer CO_2-Infrastruktur aufzubauen und in ein gesamteuropäisches System zu integrieren. Im Sinne einer vorausschauenden Bedarfsplanung von CO_2-Transportkazitäten (z. B. Tankwagen, Kesselwagen, Schi e, Pipelines etc.) sollten entsprechende Anbieter von Logistikdienstleistungen und Infrastrukturbetreiber frühzeitig in die Entwicklung regionaler Klimaschutzstrategien eingebunden werden.

Die hiermit einhergehenden rechtlichen Fragen sollten frühzeitig angegangen werden. Konkret ist zu prüfen, ob die bisherigen Rechtsgrundlagen des Genehmigungs-, Immissionsschutz-, Umwelt-, Abfall-, Klima- und Energierechtes für die Realisierung von CCUS-Projekten im Industriemaßstab ausreichen oder ob ggf. Konkretisierungen oder Ergänzungen zu bestehenden Regelungen notwendig sind.

Wie dringend ein schlüssiges Konzept für eine CO_2-Infrastruktur ist, zeigen die vielen industriellen Carbon-Capture-Projekte, die sich aktuell in Planung be nden. In den meisten Fällen müssen hier Lösungen erarbeitet werden, wie das abgeschiedene CO_2 aus dem Zementwerk zu seinem Bestimmungsort, z.B. einem Chemiepark oder einer Ra nerie oder gar zu einer der Speicherstätten in der Nordsee, transportiert werden kann. In der Regel werden es am Anfang kleinere Mengen an CO_2 sein, die es zu handhaben gilt. Hier sind schnelle und intelligente Konzepte erforderlich, um die Projekte initiieren zu können. Später wird es dann darauf ankommen, eine zusammenhängende Infrastruktur für CO_2 zu entwickeln, die eine optimale Verbindung von CO_2-Quellen und -Senken gewährleistet.

5.3 Bauen mit zunehmend CO_2-freien Zementen und Betonen

Auch wenn für die Dekarbonisierung der Zementherstellung die Abscheidung und anschließende Nutzung oder Speicherung von CO_2 unerlässlich ist, kann dieses Verfahren wegen seiner hohen Kosten und des immensen Aufwandes nur zum Einsatz kommen, wenn alle vergleichsweise konventionellen Minderungsverfahren ausgeschöpft sind. Insofern wird es in den kommenden Jahren ganz besonders wichtig sein, den e zienten Einsatz von Klinker und Zement entlang der Wertschöpfungskette weiter voranzutreiben. Allen Beteiligten ist klar, dass dabei die Herstellung von klinkere zienten Zementen alleine nicht ausreicht, vielmehr müssen sie auch ihren Weg in die Anwendung nden. Gerade in der Übergangszeit, in der klinkere ziente Zemente und Betone sich im Markt noch etablieren müssen, dürfen diese nicht dadurch benachteiligt werden, dass sie höhere Herstellkosten mit sich bringen oder dass ihre Anwendung komplizierter ist.

Vor diesem Hintergrund wird es darauf ankommen, das heutige technische Regelwerk für die Anwendung von Zement im Beton weiterzuentwickeln. Dabei gilt es, diejenigen bausto ichen Konzepte auszubauen, mit denen die CO_2-Bilanz des Betons verbessert werden kann, ohne dabei die technische Leistungsfähigkeit der Betonbauwerke aus den Augen zu verlieren. CO_2-e ziente Zemente nden bereits heute zunehmend Eingang in die entsprechenden Produktnormen. In gleicher Weise wird es entscheidend sein, dass diese auch Berücksichtigung in den Anwendungsregeln und Normen für Beton nden. Bislang waren Zemente überwiegend All-Purpose-Zemente, sie konnten in nahezu allen Betonen für unterschiedliche Anwendungsgebiete eingesetzt werden. Mit der Di erenzierung der Zemente nach ihrem CO_2-Fußabdruck wird es zunehmend auch zu einer Differenzierung in der Anwendbarkeit dieser Zemente im Beton kommen. Auf der einen Seite wird das Bauen dadurch komplexer. Auf der anderen Seite investieren die Zementhersteller derzeit in besonderem Maße in ihre Anlagen- und Herstelltechnik, sodass die klinkere zienten Zemente eine Qualität aufweisen, durch die auch zukünftig im jeweiligen Anwendungsfall die Voraussetzungen für robuste Betone erfüllt sind. Das gilt sowohl für die Eigenschaften des Frischbetons als auch für die jeweiligen Dauerhaftigkeitsanforderungen.

Um den Weg für einen solchen breiten Einsatz klinkere zienter Zemente und Betone in der Praxis zu ebnen, ist eine enge Kooperation entlang der gesamten Wertschöpfungskette von Zement und Beton entscheidend. Bereits heute arbeiten die Gemeinschaftsorganisationen und Forschungseinrichtungen von Bausto herstellern und bauausführender Industrie regelmäßig in verschiedenen Projekten zusammen. Für die Zukunft geht es nun darum, den bestehenden Dialog zu intensivieren und weitere Akteure, vor allen Dingen auch Architekten, Planer sowie ö entliche und private Bauherren, stärker in den Prozess einzubinden.

Dem Thema CO_2 muss letztlich beim Bauen insgesamt eine größere Bedeutung zukommen. Während beispielsweise der Energieverbrauch eines Gebäudes schon heute einen hohen Stellenwert hat, gibt es kaum Anforderungen, die auf den CO_2-Fußabdruck von Bauwerken abstellen. So ist es für Bauherren heute nicht ohne weiteres ersichtlich, welche CO_2-Emissionen mit der Errichtung eines Gebäudes einhergehen, geschweige denn dass es Anreize gibt, diese entsprechend in den Planungen zu berücksichtigen und zu minimieren. Nur wenn auf allen Stufen der Wertschöpfungskette Bau CO_2 eine relevante Rolle spielt, werden Zukunftsmärkte und neue Bauweisen entstehen.

Anforderungen an einen geeigneten Rahmen für die Dekarbonisierung

- **Die gesamte Wertschöpfungskette Bau beim Klimaschutz in den Blick nehmen**, von Klinker über Zement und Beton bis hin zur Baustelle, dem Bauwerk, der Wiederverwendung von Bauteilen und der Verwertung der Bauabfälle (u.a. Baurecht aktualisieren, Normen und Regelwerke im Sinne des Klimaschutzes rasch weiterentwickeln, Normung CO_2-e zienter Produkte beschleunigen).

- **Anreize für Investitionen in klimafreundlichere Zemente und Betone schaffen** und diese wettbewerbsfähig gegenüber konventionellen Produkten machen.

- **Dem Klimafußabdruck** der Baumaterialien in den Nachhaltigkeitszerti zierungen für Hoch- und Tiefbau **einen höheren Stellenwert geben.**

- **Ausreichende Anreize für Kunden setzen**, sehr CO_2-e ziente und perspektivisch CO_2-freie Zemente und Betone zu nutzen, trotz höherer Kosten im Vergleich zu Produkten mit einem größeren CO_2-Fußabdruck.

- **Klimaschutzkriterien für die Vergabe öffentlicher Bauaufträge im Dialog mit der Industrie entwickeln und zur Anwendung bringen** (u.a Green Public Procurement konsequent bundesweit umsetzen).

- **Ganzheitlichen Lebenszyklus-Ansatz** für die Bewertung der CO_2-Performance von Bausto en bzw. Bauweisen **in den Vordergrund stellen** (Betrachtung der Wertschöpfungskette, Lebensdauer von Bauwerken/Bauteilen, Energie- und CO_2-E zienz über Herstellung und Nutzungsphase inkl. Wiederverwendung oder Verwertung der Bausto e beim Abbruch des Bauwerks).

- **Wirtschaftliche Anreize technologieoffen ausgestalten**; bautechnischen Eigenschaften (Stabilität, Brandschutz und Umweltverträglichkeit eines Bauwerks) auch künftig Vorrang bei der Wahl des geeigneten Bausto es geben.

- **Training und Potenziale der Digitalisierung nutzen**; Bauausführende, Architekten und Bauherren entsprechend schulen und informieren, Bauprojekte klimagerecht mit digitalen Methoden wie Building Information Modeling (BIM) planen.

- **Unerwünschte Carbon-Leakage-Effekte** bei der Klinkerproduktion **verhindern**; Level Playing Field insbesondere für Investitionen in CO_2-e ziente Technologien scha en. Instrumente wie z. B. einen CO_2-Grenzausgleich als Ergänzung zur kostenfreien Benchmark-Zuteilung im EU-Emissionshandel ergebniso en prüfen.

- **Breakthrough-Innovationen fördern**, z.B. CAPEX/OPEX für CO_2-Abscheidung, Nutzung, Transport, Speicherung sowie neue Bindemittelkonzepte (u. a. durch Carbon Contracts for Di erence (CCfDs) und Verknüpfung von Förderinstrumenten auf nationaler/europäischer Ebene). Europäisches Beihilferecht auf Anforderungen der Klimaneutralität ausrichten.

- **Konzepte für (regionale) CO_2-Infrastrukturnetze entwickeln** sowie verlässlichen Rahmen für Infrastrukturinvestitionen und -betrieb setzen.

- **Die erneuerbare Stromversorgung ausbauen**, um dem steigenden Bedarf an elektrischer Energie bei der Klinkerherstellung und der Umwandlung von CO_2gerecht zu werden; neben der technischen Verfügbarkeit gleichermaßen Versorgungssicherheit und Wirtschaftlichkeit gewährleisten.

5.4 Rahmen für Wettbewerbsfähigkeit und Innovationen

Die Dekarbonisierung von Zement und Beton führt zu einem Transformationsprozess von bislang nicht vorstellbarem Ausmaß. Die Zementhersteller in Deutschland wissen um die Verantwortung, die sie hierbei übernehmen müssen. In vielen technischen Fragen sind sie bereits heute, auch im weltweiten Vergleich, Technologieführer. Diese Technologieführerschaft gilt es zu erhalten und hierfür die entsprechenden Rahmenbedingungen zu scha en.

Wettbewerbsfähigkeit und Innovation sind dabei letztlich zwei Seiten einer Medaille. So sollte ein Mix von Politikinstrumenten entlang der gesamten Wertschöpfungskette von Zement und Beton die richtigen Anreize und Rahmenbedingungen setzen, um wirtschaftliches Handeln an Klimaschutzgesichtspunkten ausrichten zu können. Aus Sicht der Zementindustrie sollte sich der Instrumentenmix primär auf folgende Fixpunkte konzentrieren:

Level Playing Field zum Erhalt der Wettbewerbsfähigkeit und Technologieführerschaft

Eine CO_2-e ziente Grundsto produktion wird nur mit sehr viel höheren Kapital- und Betriebskosten zu schultern sein. Entsprechende Produkte stehen dabei vor allem im Wettbewerb mit solchen, die mit konventionellen Technologien hergestellt wurden. International gilt es, unerwünschte Carbon-Leakage-E ekte zu verhindern, ergänzende Instrumente zur kostenfreien Benchmark-Zuteilung im Rahmen des europäischen Emissionshandels müssen entwickelt werden. National sind Anreize für CO_2-ef ziente Produkte zu scha en. Dem CO_2-Fußabdruck entlang der Wertschöpfungskette Bau muss hierfür mehr Bedeutung zukommen. Hierfür sollten bestehende technische Regeln sowie das Bau- und Vergaberecht angepasst werden.

Infrastruktur für CO_2, Wasserstoff und grünen Strom

Die CO_2-Abscheidung ist ein wesentlicher, unerlässlicher Baustein der Dekarbonisierung von Zement und Beton. Nach und nach ist daher eine CO_2-Infrastruktur aufzubauen, in die nicht nur bestehende Standorte der Zementindustrie, sondern auch andere Industriecluster in Deutschland eingebunden werden. Während für die unmittelbare Anbindung der Standorte gegebenenfalls ein Modal-Split unterschiedlicher Transportsysteme denkbar ist, wird perspektivisch ein Pipelinesystem als Rückgrat einer entsprechenden Infrastruktur unerlässlich sein. Dasselbe gilt für eine entsprechende Infrastruktur für Wassersto und erneuerbaren Strom. Beide sind unabdingbar für die Umwandlung von CO_2 in chemische Grundsto e und synthetische Kraftsto e. Insofern ist es erforderlich, den Aufbau dieser Infrastrukturen politisch zu ankieren, sektorübergreifende Bedarfe zu ermitteln und rechtliche Rahmenbedingungen zu scha en, die CO_2/H_2-Logisitikketten ermöglichen.

Rahmen für Innovationen

Bereits heute investieren die deutschen Zementhersteller, zum Teil mit ö entlicher Förderung, in innovative CO_2-Minderungsverfahren. Die Wirtschaftlichkeit solcher Verfahren wird sich aber letztlich auch an dem aktuellen CO_2-Preis festmachen. Von daher rechnen sich viele Verfahren derzeit noch nicht. Gerade solche Breakthrough-Innovationen bedürfen daher einer Förderung, die deutlich über bisherige Instrumente hinaus geht. Insbesondere die Investitionen in Bau (CAPEX) und Betrieb (OPEX) von Vorhaben zur CO_2-Abscheidung mit anschließender Nutzung oder Speicherung erfordern neue Förderinstrumente, die darüber hinaus national und europäisch verknüpft werden sollten. Diese können aus entsprechenden direkten Zuschüssen zu den Aufwendungen bestehen oder sich durch sogenannte Carbon Contracts for Di erence (CCfD) an der Di erenz zwischen den CO_2-Kosten und dem jeweils aktuellen CO_2-Preis orientieren.

5.5 Gesellschaftlicher Konsens über Technologiemix der Zukunft

Mit der vorliegenden Studie haben die deutschen Zementhersteller den Weg zur Dekarbonisierung ihrer Industrie vorgezeichnet. Schon heute steht aber fest, dass die Zementhersteller die Ziele nicht alleine aus eigener Kraft erreichen können. Für diesen gewaltigen Transformationsprozess bedarf es eines Miteinanders von Industrie, Politik und Gesellschaft, um gemeinsam nach den besten Lösungen zu suchen. Das erfordert Erklären und Zuhören, aber auch die Bereitschaft aller Beteiligten, alte Denkmuster zu hinterfragen.

Die Dekarbonisierung von Zement und Beton erfordert einen Mix aus verschiedenen Instrumenten. Dabei zeigt die vorliegende Studie, dass es viele vergleichsweise leicht umzusetzende Maßnahmen gibt. Diese betre en vor allem das Einbinden der am Bau Beteiligten und darüber hinaus ein Regelwerk, das auch zukünftig ein sicheres und zudem klimaneutrales Bauen ermöglicht.

Diese Maßnahmen dürfen aber nicht darüber hinwegtäuschen, dass der weitaus größte Beitrag zur Dekarbonisierung von Zement und Beton durch die CO_2-Abscheidung im Zementwerk erfolgen muss. Ohne diese neue Technologie wird die Zementindustrie es nicht scha en, bis zum Jahre 2050 klimaneutral zu werden. Damit einher geht die Frage, wie mit dem abgeschiedenen CO_2 zu verfahren ist. Die Umwandlung zum Beispiel in chemische Grundsto e oder Brennsto e ist möglich, erfordert jedoch einen äußerst hohen Energieaufwand. Ungeachtet dessen gilt es, für die vergleichsweise großen Mengen an CO_2 aus der Zementindustrie und sicherlich auch aus anderen Industriebereichen die entsprechenden Märkte und die hierfür erforderlichen Infrastrukturen zu entwickeln. Bis dies umgesetzt ist, wird letztlich auch die Speicherung von CO_2 zu adressieren sein, ohne die – zumindest für eine Übergangszeit – das Klimaziel seitens der Zementindustrie nicht erreicht werden kann.

Der VDZ und die Zementindustrie sind sich bewusst, dass es nach wie vor Vorbehalte bei der Speicherung von CO_2 gibt. Gleichzeitig versachlicht sich die Diskussion zur Frage des Transports und der O -shore-Speicherung von CO_2 im Kontext der Pariser Klimaziele und des Europäischen Green Deals zunehmend. Insbesondere für prozessbedingte CO_2-Emissionen, die ansonsten nicht weiter minderbar sind, wird den CCUS-Technologien auf dem Weg zur Klimaneutralität eine wichtige Bedeutung zukommen [56, 57, 58, 59, 60].

Insofern besteht die Aufgabe für die kommenden Jahre aus Sicht der Zementindustrie darin, einen neuen Grundkonsens zwischen Politik, Wirtschaft, Wissenschaft und Zivilgesellschaft für einen klimaneutralen Technologiemix der Zukunft zu entwickeln. Dieser wird aus einer Vielzahl an teils sektorspezi schen, teils -übergreifenden Minderungsoptionen bestehen, er wird aber den Einsatz von CCUS-Technologien für ansonsten nicht minderbare CO_2-Mengen in der Zementindustrie beinhalten müssen.

Die deutschen Zementhersteller haben das Thema CO_2-Minderung in den letzten Jahren in bemerkenswerter, bis dahin nicht geahnter Weise adressiert. Sie sind dabei bereit, zunehmend mehr Verantwortung in Sachen Klimaschutz zu übernehmen. Auch in der Gesellschaft nehmen die Fokussierung auf den Klimawandel und die Fragen an die Industrie deutlich zu. Die Zementindustrie nimmt diese Diskussion an und die Führungskräfte der Unternehmen und Verbände haben das Thema Klimawandel in den Mittelpunkt ihres Handelns bzw. ihrer unternehmerischen Ausrichtung gestellt. Von daher werden sich der VDZ und seine Mitgliedsunternehmen in den notwendigen gesellschaftlichen Informations- und Transformationsprozess, gemeinsam mit den Partnern aus Zivilgesellschaft, Politik, Wissenschaft und Wirtschaft einbringen, um diesen aktiv mitzugestalten.

Literaturverzeichnis

[1] Cembureau, Hrsg. Cementing the European Green Deal: Reaching climate neutrality along the cement and concrete value chain by 2050: Cembureau, o.J. [2020] Verfügbar unter: https:/cembureau.eu/media/1948/cembureau-2050-roadmap_ nal-versi-on_web.pdf/https:/cembureau.eu/media/1949/cembureau-2050-roadmap_executive-summary_ nal-version_web.pdf

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

[3] 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/ leadmin/redaktion/ les/pdf/CSI_ECRA_Techno-logy_Papers_2017.pdf

[4] Verein Deutscher Zementwerke, VDZ, Hrsg. Zahlen und Daten: Zementindustrie in Deutschland 2020; Stand August 2020. Berlin: Verein Deutscher Zementwerke, VDZ, 2020 (Zahlen und Daten 2020)

[5] Wagener, Carina; Ruppert, Johannes;Scheuer, Wilfried; Palm, Sebastian; Hoenig, Volker. Prozesskettenorientierte Ermittlung der Material- und Energiee zienzpotentiale in der Zementindustrie: Abschlussbericht. Düsseldorf: VDZ gGmbH, 2019 (Umweltforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit Forschungskennzahl [3716 36 320 0])

[6] Verein Deutscher Zementwerke, VDZ, Hrsg. Umweltdaten der deutschen Zementindustrie 2019: Environmental data of the German cement industry 2019. Düsseldorf, 2020

[7] Hoenig, Volker; Hoppe, Helmut; Koring, Kristina; Lemke, Jost. ECRA CCS Project: Report on Phase III. Düsseldorf: European Cement Research Academy, ECRA, 2012 (Technical Report TR-ECRA-119/2012) Verfügbar unter: https:/ecra-online.org/fileadmin/redaktion/files/pdf/ECRA_Technical_Report_CCS_Phase_III.pdf

[8] IEAGHG (2013). Deployment of CCS in the Cement Industry. 2013/19, Dezember 2013, verfügbar unter: www.ieaghg.org/docs/General_Docs/Reports/2013-19.pdf

[9] Creating value chains for CO_2 capture, transport, storage and use: Carbon neutrality in the cement industry needs a complete CO_2 economy. ecra Newsletter. 2020, (2), S.3-4

[10] Ausfelder, Florian u.a »Sektorkopplung« – Untersuchungen und Überlegungen zur Entwicklung eines integrierten Energiesystems. Brüssel, 2020 Verfügbar unter: https:/energiesysteme-zukunft.de/publikationen/analyse/sek - torkopplung/

[11] Hoenig, Volker; Hoppe, Helmut; Koring, Kristina; Lemke, Jost. ECRA CCS Project: Report about Phase II. Düsseldorf, 2009 (Technical Report TR-ECRA-106/2009) Verfügbar unter: https:/ecra-online.org/ leadmin/redaktion/ les/pdf/ECRA__Technical_Report_CCS_Phase_II.pdf

[12] Voldsund, Mari; Anantharaman, Rahul; Berstad, David; De Lena, Edoardo; Fu, Chao; Gardarsdottir, Stefania; Jamali, Armin; Pérez-Calvo, José-Fransisco; Romano, Matteo; Roussanaly, Simon; Ruppert, Johannes; Stallmann, Olaf; Sutter, Daniel. D4.6 CEMCAP comparative techno-economic analysis of CO_2 capture in cement plants: WP4: Comparative capture process analysis. Trondheim: SINTEF Energy Research, 2018 (CEMCAP 641185) Verfügbar unter: https:/www.sintef.no/globalassets/project/cemcap/2018-11-14-del iverab-les/d4.6-cemcap-comparative-techno-economic-analysis-of-co 2-capture-in-cement-plants.pdf

[13] Hoppe, Helmut; Hoenig, Volker; Ruppert, Johannes; Voldsund, Mari; Berstad, David; Sutter, Daniel; Romano, Matteo. D4.5 Retro tability study for CO_2 capture technologies in cement plants: WP4: Comparative capture process analysis. Trondheim: SINTEF Energy Research, 2018 (CEMCAP 641185) Verfügbar unter: https:/www.sintef.no/globalassets/project/cemcap/2018-11-14-deliverables/d4.5-retro tability-study-for-CO_2-capture-technologie s-in-cement-plants.pdf

[14] Thomas, Emily. Cement producers have founded an oxyfuel research corporation Verfügbar unter: https:/www.worldcement.com/europe-cis/11122019/cement-producers-have-founded-an-oxyfuel-research-corporation/

[15] Brevik, Per. The full scale CCS-project at Norcem Brevik Can it be realised?. In: European Cement Research Academy, ECRA; Research Group CEMCAP, Ed. Presentations and Posters of the ECRA/CEMCAP Workshop 2017 on Carbon Capture Technologies in the Cement Industry (Duesseldorf 06.-07.11.2017)., 17 S. Verfügbar unter: https:/ecra-online.org/ leadmin/ecra/media/ECRA-CEMCAP_Workshop_2017/Presentations/11_Full-Scale_CCS_Project_Norcem_P-Brevik.pdf

16] Carbon capture is a loss-maker for Anhui Conch Verfügbar unter: https:/www.cemnet.com/News/story/167315/carbon-capture-is-a-loss-maker-for-anhui-conch.html

[17] Taiwan Cement Corp., Hrsg. 2017 Corporate Sustainability Report. Taipeh City, 2018 Verfügbar unter: https:/www.taiwancement.com/en/csrComponent/report_2017.pdf

[18] Laboratorio Energia e Ambiente Piacenza, LEAP, Hrsg. Cleanker: CLEAN clinKER by calcium looping for low CO_2 cement Verfügbar unter: http:/www.cleanker.eu/

[19] Low Emissions Intensity Lime & Cement – LEILAC: A project of the European Union Horizon 2020 Research & Innovation Verfügbar unter: https:/www.project-leilac.eu/

[20] LEILAC 2 is in the pipeline Verfügbar unter: https://www.cemnet.com/News/story/167975/leilac-2-is-in-the-pipeline.html Dezember 2019

[21] Deutsche Gesellschaft für Chemisches Apparatewesen, Chemische Technik und Biotechnologie, DECHEMA, Hrsg. Roadmap Chemie 2050: Auf dem Weg zu einer treibhausgasneutralen chemischen Industrie in Deutschland; Eine Studie von DECHEMA und FutureCamp für den VCI. München, 2020 Verfügbar unter: https://dechema.de/dechema_media/Downloads/Positionspapiere/2019_Studie_Roadmap_Chemie_2050-p-20005590.PDF

[22] Monkman, Sean; MacDonald, Mark; Hooton, R. Doug; Sandberg, Paul. Properties and durability of concrete produced using CO_2 as an accelerating admixture. Cement and Concrete Composites. 2016, 74, S.218-224

[23] Monkman, Sean; MacDonald, Mark. CO_2 Utilization in Concrete Mix Design Optimization. Dartmouth, 2016

[24] CO_2 Value Europe, Hrsg. Carbon Capture and Utilisation (CCU) and EU ETS, 2020 Verfügbar unter: https://www.CO2value.eu/wp-content/uploads/2020/06/CVE-paper-on-CCU-in-ETS-Recommendations-for-the-revision-of-the-Monitoring-and-Reporting-Regulation-MRR.pdf

[25] Global CCS Institute, Hrsg. The Global Status of CCS 2018, 2018 Verfügbar unter: https://indd.adobe.com/view/2dab1be7-edd0-447d-b020-06242ea2cf3b

[26] European Environment Agency, EEA, Hrsg. EU Emissions Trading System (ETS) data viewer Verfügbar unter: https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/dashboards/emissions-tra ding-viewer-1

[27] Oil and Gas Climate Initiative, OGCI, Hrsg. CO_2 storage resource catalogue Verfügbar unter: https://oilandgasclimateinitiative.com/CO_2-storage-resource-catalogue/

[28] Global CCS Institute, Hrsg. Global Storage Resource Assessment – 2019 Update: June 2020, 2020 Verfügbar unter: https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2020/07/Global-Storage-Resource-Assessment_-2019-Update_-June-2020.pdf

[29] Algermissen, D.. Zukünftige Schlackenerzeugung in einer CO_2-armen Stahlindustrie, Mineralische Nebenprodukte und Abfälle. In: Thiel, Stephanie; Thome-Kozmiensky, Elisabeth; Senk, Dieter G.; Wotruba, Hermann; Antrekowitsch, Helmut; Pomberger, Roland. Mineralische Nebenprodukte und Abfälle 7: Aschen, Schlacken, Stäube und Baurestmassen. Neuruppin, S.182

[30] Schulze, Simone E.; Rickert, Jörg. Pozzolanic Activity of calcined clays. In: V.M.: Twelfth International Conference on Recent Advances in Concrete Technology and Sustainability Issues (Prag 30.10.-02.11.2012). Farmington Hills: American Concrete Institute, ACI, 2012 (ACI Publication SP-289), S.277-287

[31] Müller, Christoph; Severins, Katrin; Spanka, Gerhard. Brechsand als Zementhauptbestandteil: Leitlinien künftiger Anwendung im Zement und Beton. Beton. 2020, (9), S.336-345

[32] Institut Bauen und Umwelt; InformationsZentrum Beton, IZB, Hrsg. Umwelt-Produktdeklaration nach ISO 14025 und EN 15804: Beton der Druckfestigkeitsklasse C 25/30; EPDIZB20180101IBG1DE; Ausstellungsdatum 03.09.2018; Gültig bis 02.09.2023. Königswinter, 2018 Verfügbar unter: https://www.beton.org/ leadmin/beton-org/media/Dokumente/PDF/Wissen/Beton-Bautechnik/Nachhaltig - keit/Beton_der_Druckfestigkeitsk las-se_C_2530.pdf

[33] Bundesverband Spannbeton-Fertigdecken, Hrsg. Die Zukunft Spannbeton-Fertigdecken: schnell – exibel – wirtschaftlich. Berlin, 2019 Verfügbar unter: https://www.spannbetonfertigdecken.de/images/BVSF-Imagebroschuere_2019.pdf

[34] Seifert, W.; Lieboldt, M.. Ressourcenverbrauch im globalen Stahlbetonbau und Potenziale der Carbonbetonbauweise: Globale Herausforderungen des Bauwesens. Beton- und Stahlbetonbau. 2020, 115(6), S.469-478

[35] Seifert, W.; Lieboldt, M.; Curbach, M.. Ressourcenverfügbarkeit und Konsequenzen bei der Planung von Betonbauwerken. Beton. 2019, 69(9), S.321-322

[36] Robert J. Flatt, Timothy Wangler. Digital Concrete 2018: Special Issue. Cement and Concrete Research. 2018, 112(SI)

[37] Digital Concrete 2020: Sonderheft. CPT Worldwide – Construction Printing Technology. 2020, (2), S.1-71

[38] Lösch, Claudia; Rieseberg, Philip. Infraleichtbeton: Entwurf, Konstruktion, Bau. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verl., 2018

[39] Fischer, Oliver; Gehrlein, Sebastian; Lechner, Thomas; Mensinger, Martin; Ndogmo, Josef; Seidl, Günter. Entwicklung ressourcenschonender, modularer Betonkonstruktionen aus Ultrahochleistungsbeton (UHPC). Stuttgart, 2017 (IRB-Forschungsbericht F 3053) Verfügbar unter: https://www.irbnet.de/daten/rswb/17119008933.pdf

[40] Wörner, Mark; Schmeer, Daniel; Schuler, Benjamin; P nder, Julian; Garrecht, Harald; Sawodny, Oliver; Sobek, Werner. Gradientenbetontechnologie: Von der Mischungsentwick - lung über den Bauteilentwurf bis zur automatisierten Herstellung. Beton- und Stahlbetonbau. 2016, 111(12), S.794-805

[41] BetonMarketing Deutschland, Hrsg. Nachhaltiges Bauen mit Beton : Ein Fachbeitrag für Architekten, Planer und Bauherren. Erkrath, 2011

[42] Bundesverband Bausto e Steine und Erden, BBS, Hrsg. Mineralische Bauabfälle Monitoring 2016 : Bericht zum Aufkommen und zum Verbleib mineralischer Bauabfälle im Jahr 2016. Berlin, 2018 Verfügbar unter: http://kreislaufwirtschaft-bau.de/Arge/Bericht-11.pdf

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

[44] Technische Universität Darmstadt, Hrsg. Nachhaltigkeit von Ein- und Zweifamilienhäusern aus Mauerwerk. Darmstadt, 2016. Verfügbar unter: https://www.dgfm.de/ leadmin/01-DGFM/downloads/studien-mauerwerksbau/ Mauerwerk_und_Nachhaltigkeit.pdf

[45] Bitt ermann, H.-J.. Warmer Beton, kalter Beton: Betonkernaktivierung bringt Ökologie und Ökonomie in Einklang. IKZ-Planer. 2020, (3), S.16-19

[46] Kalz, Doreen; Koenigsdor , Roland; Nichtwohngebäude ezient heizen und kühlen: Erfahrungen mit thermoaktiven Bauteilsystemen und Wärmepumpen. Bonn, 2016 (Bine Informationsdienst 2/2016) Verfügbar unter: https://www.bine.info/fileadmin/content/Publikationen/Themen-Infos/II_2016/themen_0216_internetx.pdf

[47] Cembureau, Hrsg. Structural thermal energy storage in heavy weight buildings – analysis and recommendations to provide exibility to the electricity grid: Final report. Brüssel, 2016 Verfügbar unter: https://www.theconcreteinitiative.eu/images/Newsroom/Publications/small_-_3E_StructuralThermalEnergyStorageHeavyWeightBuildings_2016-10-25_Light.pdf

[48] Spaun, Sebastian; Kuster, H.; Kuster, A.; Lindenthal, J.; Lechner, C.; Dankl, C.. Einfamilienhaus H. (Wind) und Einfamilienhaus F. (Solar). Wien, 2019 (Berichte aus Energie- und Umweltforschung 13/2019) Verfügbar unter: https://www.zement.at/downloads/downloads_2019/monitoringprojekt_stadt_der_zukunft_schriftenreihe-2019-13.pdf

[49] Xi, Fengming; Davis, Steven J.; Ciais, Philippe; Crawford-Brown, Douglas; Guan, Dabo; Pade, Claus; Shi, Tiemao; Syddall, Mark; Lv, Jie; Ji, Lanzhu; Bing, Longfei; Wang, Jiaoyue; Wei, Wei; Yang, Keun-Hyeok; Lagerblad, Björn; Galan, Isabel; Andrade, Carmen; Zhang, Ying; Liu, Zhu. Substantial global carbon uptake by cement carbonation: Letters; published online 21. November 2016. Nature geoscience. 2016, 8 S.

[50] Norm DIN EN 16757 2017-10. Nachhaltigkeit von Bauwerken – Umweltproduktdeklarationen: Produktkategorieregeln für Beton und Betonelemente; Deutsche Fassung EN 16757:2017

[51] Andersson, R.; Stripple, H.; Gustafsson, T.; Ljungkrantz, C.. Carbonation as a method to improve climate performance for cement based material. Cement and Concrete Research. 2019, 124, 105819

[52] European Cement Research Academy, ECRA, Hrsg. Release and uptake of carbon dioxide in the life cycle of cement. Düsseldorf: European Cement Research Academy, ECRA, o.J. (Technical Report TR-ECRA 0004/2008)

[53] Zero Emissions Platform, zep, Hrsg. Europe needs a de - nition of carbon dioxide removal. Brüssel, 2020 Verfügbar unter: https://zeroemissionsplatform.eu/wp-content/uploads/Europe-needs-a-definition-of-Carbon-Dioxide-Removal-July-2020-3.pdf

[54] Intergovernmental Panel of Climate Change, IPCC, Hrsg. Global Warming of 1.5°C : an IPCC special report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty (Incheon, Korea Oktober 2018). Geneva: IPCC, 2018 Verfügbar unter: http://ipcc.ch/report/sr15/

[55] Bundesverband Bausto e Steine und Erden, BBS, Hrsg. Die Nachfrage nach Primär- und Sekundärrohsto en der Steine- und-Erden-Industrie bis 2035 in Deutschland. Berlin, 2019 Verfügbar unter: https://www.bausto ndustrie.de/ fileadmin/user_upload/bbs/Dateien/Downloadarchiv/ Rohsto e/Rohsto studie_2019.pdf

[56] Agora Energiewende; Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie, Hrsg. Klimaneutrale Industrie : Schlüsseltechnologien und Politikoptionen für Stahl, Chemie und Zement. Berlin, 2019

[57] Bundesverband der Deutschen Industrie, BDI, Hrsg. Klimapfade für Deutschland. München, 2018 Verfügbar unter: https://bdi.eu/publikation/news/klimapfade-fuer-deutschland/

[58] Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena) Energiesysteme und Energiedienstleistungen, Hrsg. dena-Leitstudie Integrierte Energiewende : Impulse für die Gestaltung des Energiesystems bis 2050 - Ergebnisbericht und Handlungsempfehlungen. Berlin, 2018 Verfügbar unter: https://www.dena.de/fileadmin/dena/Dokumente/Pdf/9262_dena-Leitstudie_Integrierte_Energiewende_Ergebnisbericht.pdf

[59] Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, acatech, Hrsg. CCU und CCS – Bausteine für den Klimaschutz in der Industrie (acatech POSITION),. München, 2018 Verfügbar unter: https://www.acatech.de/publikation/ccu-und-ccs-bausteine-fuer-den-klimaschutz-in-der-industrie-analyse-handlungsoptionen-und-empfehlungen/download-pdf?lang=de

[60] Guidehouse, Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER), Forschungsstelle für Energiewirtschaft (FfE), BBG und Partner (2021): Energiewende in der Industrie: Potenziale, Kosten und Wechselwirkung mit dem Energiesektor, durchgeführt im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) (noch nicht veröentlicht)

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Ambitioniert es Referenzszenario – CO_2-Minderung bis 2050
Abbildung 2: Szenario Klimaneutralität – CO_2-Minderung bis 2050
Abbildung 3: Voraussetzungen und Handlungsfelder für Klimaneutralität
Abbildung 4: Zementwerke und Rohsto vorkommen in Deutschland
Abbildung 5: Direkte CO_2-Emissionen aus der Zementherstellung
Abbildung 6: CO_2-Emissionen der deutschen Zementindustrie
Abbildung 7: CO_2-Minderung entlang der Wertschöpfungskette
Abbildung 8: Prozess der Zementherstellung
Abbildung 9: Spezi scher Energieeinsatz der deutschen Zementindustrie
Abbildung 10: Elektrischer Energieeinsatz im Zement-herstellungsprozess
Abbildung 11: Brennsto mix der deutschen Zementindustrie 2019
Abbildung 12: Verfahren zur CO_2-Abscheidung bei der Zementklinkerherstellung
Abbildung 13: CO_2-Nutzung in der Chemischen Industrie – Anwendungsfelder
Abbildung 14: Geplante Projekte zur CO_2-Speicherung in der Nordsee
Abbildung 15: Trend zu klinkere zienten Zementen im heutigen Produktmix
Abbildung 16: Zusammensetzung besonders klinkere zienter CEM II/C-M und CEM VI-Zemente
Abbildung 17: Verwertung von Recycling-Gesteinskörnungen in Deutschland 2016
Abbildung 18: Schematische Darstellung der Beton-kernaktivierung
Abbildung 19: Ambitioniert es Referenzszenario – CO_2-Minderung bis 2050
Abbildung 20: Szenario Klimaneutralität – CO_2-Minderung bis 2050
Abbildung 21: Annahmen zum Technologiemix in den Szenarien bis 2050
Abbildung 22: Zementportfolio im ambitionierten Referenzszenario
Abbildung 23: Zementportfolio im Szenario Klimaneutralität

Impressum

Herausgeber
Verein Deutscher Zementwerke e.V. (VDZ)
Toulouser Allee 71
40476 Düsseldorf
T +49 (0)211 45 78 0
F +49 (0)211 45 78 296
vdz@vdz-online.de
www.vdz-online.de

Verantwortlich
Dr. Martin Schneider

Projektkoordinierung
Manuel Mohr

Projektteam
Dennis Behrouzi
Dr. Kristina Fleiger
Dr. Volker Hoenig
Dr. Helmut Hoppe
Manuel Mohr
Dr. Christoph Müller
Dr. Sebastian Palm
Jochen Reiners
Dr. Thomas Richter
Dr. Jörg Rickert
Jens Romeike
Dr. Johannes Ruppert
Albrecht Schall

Düsseldorf, November 2020

Bildnachweis
S. 1: HeidelbergCement AG/Ste en Fuchs
S. 15: gettyimages/fhm
S. 19: VDZ
S. 21: Stefanie Grebe
S. 31: Bundesverband Spannbeton-Fertigdecken (BVSF)
S. 32: PERI GmbH
S. 48: gettyimages/zorazhuang
S. 51: Südbayerisches Portland-Zementwerk
Gebr. Wiesböck & Co. GmbH

Design
arndtteunissen GmbH, Düsseldorf

Konzeption und Gestaltung
Servicedesign GmbH, Heidelberg

Druck
abcdruck, Heidelberg

Zitierung
Verein Deutscher Zementwerke, VDZ,
Hrsg. Dekarbonisierung von Zement und Beton –
Minderungspfade und Handlungsstrategien.
Düsseldorf, 2020

Online-Ausgabe unter
www.vdz-online.de/dekarbonisierung

Die vorliegende Studie wurde durch die Sozialpolitische Arbeitsgemeinschaft der Deutschen Zementindustrie (SPADZ) gefördert.