

CLIMATE CHANGE

07/2024

Teilbericht

Dekarbonisierung der industriellen Produktion (DekarbInd)

AP3: Bewertung von Dekarbonisierungsmaßnahmen und Erarbeitung von Eckpunkten einer Roadmap für die Zementindustrie

von:

Dietmar Schüwer, Georg Holtz, Valentin Espert
Wuppertal Institut für Klima, Umwelt Energie (Wuppertal)

Philine Warnke
Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI (Karlsruhe)

unter Mitwirkung von:
Jacqueline Klingen und Ansgar Taubitz (Wuppertal Institut)
Ali Aydemir (Fraunhofer ISI)

Herausgeber:
Umweltbundesamt

CLIMATE CHANGE 07/2024

Ressortforschungsplan des Bundesministeriums für
Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und
Verbraucherschutz

Forschungskennzahl 3719 41 303 0
FB001169

Teilbericht

Dekarbonisierung der industriellen Produktion (DekarInd)

AP3: Bewertung von Dekarbonisierungsmaßnahmen und
Erarbeitung von Eckpunkten einer Roadmap für die
Zementindustrie

von

Dietmar Schüwer, Georg Holtz, Valentin Espert
Wuppertal Institut für Klima, Umwelt Energie (Wuppertal)

Philine Warnke
Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI (Karlsruhe)

unter Mitwirkung von:

Jacqueline Klingen und Ansgar Taubitz (Wuppertal Institut)
Ali Aydemir (Fraunhofer ISI)

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber

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

Durchführung der Studie:

Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH
Döppersberg 19
42103 Wuppertal

Abschlussdatum:

Juli 2022

Redaktion:

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

Publikationen als pdf:

www.umweltbundesamt.de/publikationen

ISSN 1862-4359

Dessau-Roßlau, Januar 2024

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

Kurzbeschreibung: Dekarblnd – Eckpunkte einer Roadmap für die Dekarbonisierung der Zementindustrie

Deutschland soll bis zum Jahr 2045 treibhausgasneutral werden. 2021 emittierte der deutsche Industriesektor etwa 181 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalente. Damit trägt er mit 24 Prozent zu den nationalen Treibhausgasemissionen bei und ist nach der Energiewirtschaft die zweitgrößte Emissionsquelle in Deutschland¹. Etwa zwei Drittel der industriellen Emissionen stammen aus der energieintensiven Industrie. Die Stahl- und Zementindustrien wiederum verursachen mehr als die Hälfte dieser Emissionen und sind aufgrund ihrer prozessbedingten Emissionen sowie hoher Prozesstemperaturen besonders herausfordernd. Die Dekarbonisierung der Stahl- und Zementindustrien ist daher für das Erreichen der Treibhausgasneutralität von zentraler Bedeutung.

Die Dekarbonisierung der energieintensiven Industrie erfordert innovative technologische Konzepte und passende, langfristig angelegte politische Rahmenbedingungen, die den Industrieakteuren frühzeitig Transformationspfade eröffnen und größtmögliche Planungssicherheit für die erforderlichen Investitionen bieten. Im Projekt entwickelten die Forschenden Eckpunkte für Roadmaps zur Dekarbonisierung der Stahlindustrie (Federführung Fraunhofer ISI) und Zementindustrie (Federführung Wuppertal Institut). Die im Arbeitspaket 3 erarbeiteten und hier vorgestellten Eckpunkte einer Roadmap für die Zementindustrie geben konkrete Hinweise darauf, welche technologischen Konzepte für eine Dekarbonisierung in dieser Industriebranche existieren, wie diese im Zeitverlauf umgesetzt werden können, welche Treiber und Hemmnisse diese technologischen Pfade begünstigen oder hemmen und welche Maßnahmen Akteure und Akteurinnen in verschiedenen Handlungsfeldern kurz-, mittel- und langfristig umsetzen können.

Das Vorhaben hat in einem zweieinhalb-jährigem Partizipationsprozess über eine Reihe von Workshops und Interviews mit Expertinnen und Experten sowie weiterer Veranstaltungen zahlreiche Stakeholder und Stakeholderinnen aus Industrie, Verbänden, gesellschaftlichen Interessengruppen sowie Politik, Behörden und Wissenschaft eingebunden. Diese Einbindung ermöglichte Transparenz, Mitwirkung sowie Praxisnähe der Resultate. Im Ergebnis liegt eine Gesamt-Roadmap für die Dekarbonisierung der deutschen Zement- und Betonindustrie vor, die alle technologischen Hebel und assoziierte Treiber, Hemmnisse und Handlungsfelder im Überblick darstellt. Ergänzt wird diese durch drei Detail-Roadmaps für die vertieft betrachteten Teilbereiche „Thermische Energie“, „Neue Zemente und Betonbautechniken“ sowie „Carbon-Capture and Usage/Storage (CCUS)“.

¹ UBA März 2022: Emissionsübersichten in Sektoren
www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/361/dokumente/2022_03_15_trendtabellen_thg_nach_sektoren_v1.0.xlsx

Abstract: DekarBlnd – Key points of a roadmap for the decarbonisation of the cement industry

Germany is to become greenhouse gas neutral by 2045. In 2021, the German industrial sector emitted about 181 million tonnes of CO₂ equivalents. This means that it accounts for 24 percent of national greenhouse gas emissions and is the second largest source of emissions in Germany after the energy industry². About two thirds of industrial emissions come from energy-intensive industry. The steel and cement industries in turn cause more than half of these emissions and are particularly challenging due to their process-related emissions and high process temperatures. The decarbonisation of the steel and cement industries is therefore central to achieving greenhouse gas neutrality.

The decarbonisation of energy-intensive industry requires innovative technological concepts and suitable, long-term political framework conditions that open up transformation paths for industry players at an early stage and offer the greatest possible planning security for the necessary investments. In the project, the researchers developed key points for roadmaps for the decarbonisation of the steel industry (led by Fraunhofer ISI) and the cement industry (led by the Wuppertal Institute). The cornerstones of a roadmap for the cement industry developed in work package 3 and presented here give concrete indications of which technological concepts for decarbonisation exist in this industry sector, how these can be implemented over time, which drivers and barriers favour or inhibit these technological paths, and which measures can be implemented by actors in various fields of action in the short, medium and long term.

In a two-and-a-half-year participation process, the project involved numerous stakeholders from industry, associations, social interest groups, politics, authorities and science through a series of workshops and interviews with experts as well as other events. This involvement enabled transparency, participation and practical relevance of the results. The result is an overall roadmap for the decarbonisation of the German cement and concrete industry, which presents an overview of all technological levers and associated drivers, barriers and fields of action. This is supplemented by three detailed roadmaps for the subsectors "Thermal energy supply", "New cements and concrete technologies" and "CO₂ capture and use or storage (CCUS)", which are examined in depth.

² UBA March 2022: Emission overviews in sectors
www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/361/dokumente/2022_03_15_trendtabellen_thg_nach_sektoren_v1.0.xlsx

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	7
Abbildungsverzeichnis.....	10
Tabellenverzeichnis	12
Abkürzungsverzeichnis	13
Zusammenfassung.....	15
Summary	29
1 Ausgangslage	43
2 Grundlagen, Ziele und Vorgehen	44
2.1 Grundlagen zu Roadmaps	44
2.1.1 Roadmap: Darstellung einer vielschichtigen Veränderung im Zeitverlauf.....	44
2.1.2 Roadmapping: Interaktiver Stakeholder-Prozess	45
2.1.3 Im Projekt gewählte Roadmap-Layer	46
2.2 Methodisches Vorgehen zum Einbezug von Stakeholdern und Stakeholderinnen.....	48
2.3 Kerngruppentreffen	50
2.3.1 Kerngruppentreffen 1: Visionen und Ziele	51
2.3.2 Kerngruppentreffen 2: Technologien	52
2.3.3 Kerngruppentreffen 3: Roadmap (Teil 1).....	56
2.3.4 Kerngruppentreffen 4: Roadmap (Teil 2).....	57
2.4 Interviews und Vertiefungswerkshops	58
2.4.1 Workshop Abfallbasierte Brennstoffe (ABS).....	59
2.4.2 Workshop Neue Zemente & Betonbautechniken (NZB).....	59
2.4.3 Workshop CCUS & Infrastrukturen	61
2.4.4 Workshop (Politik-)Instrumente / Markt / Akzeptanz.....	62
2.5 Stakeholderdialoge	63
2.5.1 Erster Stakeholderdialog (SD1)	63
2.5.2 Zweiter Stakeholderdialog (SD2)	63
3 Ergebnisse aus Stakeholderprozessen zu Layern der Roadmap	64
3.1 Visionen und Ziele	64
3.2 Technologien.....	67
3.2.1 Ausgangslage und Einführung in die Technologien	68
3.2.2 Bereitstellung thermischer Energie	70
3.2.3 Neue Zemente und Betonbautechniken (NZB).....	72
3.2.4 CO ₂ -Abscheidung und Nutzung oder Speicherung (CCUS)	75

3.2.5	Wechselwirkungen zwischen technologischen Teilbereichen.....	82
3.3	Treiber und Hemmnisse.....	83
3.3.1	Treiber.....	83
3.3.2	Hemmnisse	84
3.4	Handlungsfelder.....	88
3.4.1	Regulatorische Rahmenbedingungen.....	88
3.4.2	Schaffung und Erhalts eines Level-Playing Fields	88
3.4.3	Integrierte, sektorübergreifende Energiestrategie.....	88
3.4.4	Fördern von und Schaffen von Märkten für CO ₂ - und ressourceneffizientes Bauen	89
3.4.5	Integration von neuen Zementen, Bindemitteln, Betonen und Bautechniken in die Baupraxis.....	89
3.4.6	Kreislaufwirtschaft im Bauwesen.....	89
3.4.7	Planung und der Aufbau einer CO ₂ -Transportinfrastruktur	90
3.4.8	Gesellschaftlicher Dialog zu CO ₂ -Infrastrukturen	90
3.4.9	Forschung und Entwicklung.....	90
4	Eckpunkte für eine Roadmap zur Dekarbonisierung der Zementindustrie.....	91
4.1	Vision.....	93
4.2	Transformationspfad.....	94
4.2.1	Bereitstellung thermischer Energie	94
4.2.2	Neue Zemente und Betonbautechniken.....	95
4.2.3	CCUS.....	96
4.3	Treiber.....	98
4.4	Hemmnisse.....	98
4.5	Handlungsfelder.....	100
5	Vertiefung ausgewählter Aspekte in Detail-Roadmaps	104
5.1	Detail-Roadmap Thermische Energie.....	105
5.1.1	Vision.....	106
5.1.2	Transformationspfad	106
5.1.3	Treiber.....	106
5.1.4	Hemmnisse	107
5.1.5	Handlungsfelder.....	107
5.2	Detail-Roadmap Neue Zemente und Betonbautechniken (NZB).....	109
5.2.1	Vision.....	110
5.2.2	Transformationspfad	110

5.2.3	Treiber.....	111
5.2.4	Hemmnisse	112
5.2.5	Handlungsfelder.....	112
5.3	Detail-Roadmap Carbon Capture/Utilization and Storage (CCUS)	114
5.3.1	Vision.....	115
5.3.2	Transformationspfad	115
5.3.3	Treiber.....	116
5.3.4	Hemmnisse	117
5.3.5	Handlungsfelder.....	118
6	Ausgewählte Politikinstrumente und Maßnahmen in den Bereichen NZB und CCUS.....	119
6.1	Instrumente für neue Zemente und Betonbautechniken (NZB).....	120
6.2	Instrumente für CCUS-Infrastrukturen	122
7	Quellenverzeichnis	125

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Einbindung des Stakeholder-Know-hows über Kerngruppe, Experten-Interviews und -Workshops sowie Stakeholderdialoge.....	16
Abbildung 2:	Schematische Darstellung technischer CO ₂ -Minderungshebel (orange) entlang der Wertschöpfungskette Zementherstellung und Betonbau	17
Abbildung 3:	Vision und Roadmap zur Dekarbonisierung der Zementindustrie	19
Abbildung 4:	Typische Schritte beim Roadmapping	45
Abbildung 5:	Schema der DekarbInd-Roadmap mit gewählten Layern und Zeitstrahl.....	47
Abbildung 6:	Einbindung des Stakeholder-Know-hows über Kerngruppe, Experten-Interviews und -Workshops sowie Stakeholderdialoge.....	48
Abbildung 7:	Zusammenspiel zwischen Kerngruppe und Projektteam	49
Abbildung 8:	Darstellung des Roadmapping-Prozesses und ihrer spezifischen Leitfragen entlang der vier Kerngruppengruppentreffen	51
Abbildung 9:	Beispielhafter Ausschnitt aus einer Mindmap zu positiven Visionen der Zementindustrie-Dekarbonisierung aus dem KGT1	52
Abbildung 10:	Ergebnisgrafik zur (nicht-repräsentativen) Umfrage im Bereich Klinkerbrennprozess.....	54
Abbildung 11:	Ergebnisgrafik zur (nicht-repräsentativen) Umfrage im Bereich Neue Zemente und Betonbautechniken	55
Abbildung 12:	Ergebnisgrafik zur (nicht-repräsentativen) Umfrage im Bereich CCUS und Infrastrukturen.....	56
Abbildung 13:	Ergebnis der (nicht repräsentativen) Umfrage zur Hebelwirkung verschiedener Instrumente zur Einführung neuer Zemente und Betonbautechniken in KGT4	58
Abbildung 14:	Ergebnisgrafik zur (nicht repräsentativen) Umfrage im Bereich Neue Zemente und Betonbautechniken	61
Abbildung 15:	Schematische Darstellung technischer CO ₂ -Minderungshebel (orange) entlang der Wertschöpfungskette Zementherstellung und Betonbau	68
Abbildung 16:	Wechselwirkungen zwischen technologischen Teilbereichen	83
Abbildung 17:	Vision und Roadmap zur Dekarbonisierung der Zementindustrie	92
Abbildung 18:	Vision und Detail-Roadmap Thermische Energie	105
Abbildung 19:	Vision und Detail-Roadmap Neue Zemente und Betonbautechniken	109
Abbildung 20:	Vision und Detail-Roadmap CCUS	114

Abbildung 21: Grundsätzliche Klassifizierung der im Fokus des Projektes
stehenden Politikinstrumente120

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Hauptakteure zur Umsetzung von zentralen Maßnahmen in den Handlungsfeldern der Roadmap	26
Tabelle 2:	Veranstaltungen im Rahmen des AP3 Zement.....	48
Tabelle 3:	Zusammensetzung der Kerngruppe Zement	50
Tabelle 4:	Liste der Interviews und Vertiefungsworkshops.....	58
Tabelle 5:	Benötigte CO ₂ -Transport-Kapazitäten.....	82
Tabelle 6:	Legende zu den Stakeholder-Icons in der Roadmap (Hauptakteure Nebenakteure)	93
Tabelle 7:	Hauptakteure zur Umsetzung von zentralen Maßnahmen in den Handlungsfeldern der Roadmap	102

Abkürzungsverzeichnis

3D	dreidimensional
ABS	Alternativbrennstoff
AfA	Absetzung für Abnutzung (steuerrechtlicher Begriff für Abschreibung)
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
BMWK	Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz
BNetzA	Bundesnetzagentur
BTB	Bundesverband der Deutschen Transportbetonindustrie e.V.
bzgl.	bezüglich
bzw.	beziehungsweise
CAPEX	Capital Expenditures (Investitionsausgaben)
CBAM	Carbon Border Adjustment Mechanism
CCfD	Carbon Contract for Differences
CCS	Carbon Capture and Storage (deutsch: CO ₂ -Abscheidung und -Speicherung)
CCU	Carbon Capture and Utilization (deutsch: CO ₂ -Abscheidung und -Nutzung)
CCUS	Carbon Capture Use and Storage
CESR	Universität Kassel, Center for Environmental Systems Research
CSI	Cement Sustainability Initiative
DAfStb	Deutscher Ausschuss für Stahlbeton
DE	Deutschland
DECHEMA	Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V.
Dekarblind	Dekarbonisierung der industriellen Produktion
DGNB	Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen
DIN	Deutsches Institut für Normung
DRI	Direct Reduced Iron
E-Kfz	Elektroauto
ECRA	European Cement Research Academy
etc.	et cetera
EU-ETS	European Emissions Trading System
EU	Europa
F&E	Forschung und Entwicklung
FDB	Fachvereinigung Deutscher Betonfertigteilbau
GCCA	Global Cement and Concrete Association
ggf.	gegebenenfalls
ggü.	gegenüber
HOAI	Honorarordnung für Architekten und Ingenieure
i.d.R.	in der Regel
IEA	Internationale Energieagentur
IEAGHG	IEA Greenhouse Gas R&D Programme
KEI	Kompetenzzentrum Klimaschutz in energieintensiven Industrien
KGT	Kerngruppentreffen

KSpG	Kohlendioxidspeichergesetzes
LEILAC	Projektname für "Low Emissions Intensity Lime and Cement" (CO ₂ -Direktabscheidetechnologie am Calcinator)
Lkw	Lastkraftwagen
Mio.	Millionen
NGO	Non-Governmental Organization (Nichtregierungsorganisation)
NZB	Neue Zemente und Betonbautechniken
OPEX	Operational Expenditures (Betriebskosten)
PtX	Power-to-X (Umwandlung von Ausgangsstoffen in Brennstoffe bzw. chemische Grundstoffe mit Hilfe von Strom)
RC-Beton	Recycling-Beton
RCFs	rekarbonisierter Zementstein
s. u.	siehe unten
SD	Stakeholderdialog
UBA	Umweltbundesamt, Dessau
UK	United Kingdom
VDZ	Verein Deutscher Zementwerke
Vgl.	vergleiche
VT	Vertiefungsthema
z. B.	zum Beispiel

Zusammenfassung

Ziel des DekarbInd-Arbeitspakets 3 war es, in einem breit angelegten Stakeholder-Dialogprozess Eckpunkte für eine Roadmap zur Dekarbonisierung der Zementindustrie zu entwickeln. Zentraler Hintergrund ist das Klimaschutzgesetz³ der Bundesregierung mit dem Ziel der Treibhausgasneutralität bis 2045 und dem Zwischenziel einer 65-prozentigen Reduktion der Treibhausgasemissionen bis 2030 gegenüber 1990. Die Zementindustrie ist mit einer Emissionsmenge von knapp 21 Mio. t CO₂ im Jahr 2021 für etwa 2,7 % der deutschen Treibhausgasemissionen verantwortlich (eigene Berechnung nach UBA, 2022; VDZ, 2022). Aufgrund der mit der Herstellung von Zementklinker verbundenen prozessbedingten CO₂-Entstehung gehört die Zementindustrie zu den besonders schwer zu dekarbonisierenden⁴ Sektoren. Die Minderung der Treibhausgasemissionen in der Zementindustrie ist daher elementar für das Erreichen der Klimaziele.

Methodisches Vorgehen

Für eine Roadmap existieren verschiedene Definitionen. Grundsätzlich bildet eine Roadmap eine grafische Repräsentation von Veränderungsprozessen über der Zeit. Gemeinsam ist ihnen (i) ein Zukunftsbezug (aber keine Vorhersage), (ii) die zeitliche Verknüpfung der dargestellten Aspekte und (iii) die Arbeit in Richtung auf eine Vision oder ein Ziel hin. Zudem haben Roadmaps in der Regel mehrere Ebenen (auch „Layer“ genannt).

Im Rahmen des Projekts wurden in Abstimmung mit im Projekt involvierten Stakeholdern und Stakeholderinnen folgende fünf Layer für das Roadmapping gewählt:

- ▶ **Visionselemente:** Wesentliche Charakteristika des Zielsystems 2045/50
- ▶ **Transformationspfade Markt / Technologie:** Umsetzung und Skalierung innovativer (technischer) Ansätze im Zeitverlauf
- ▶ **Treiber:** Externe Entwicklungen, welche die Transformation zur CO₂-Neutralität im Zementsektor begünstigen
- ▶ **Hemmnisse:** Technische, wirtschaftliche, regulatorische und gesellschaftliche Aspekte, welche die Transformation zur CO₂-Neutralität im Zementsektor hemmen
- ▶ **Handlungsfelder / Maßnahmen:** Ansatzpunkte, um Hemmnisse zu beseitigen bzw. abzumildern, um somit die Transformation zu ermöglichen bzw. zu beschleunigen.

Im Rahmen des Projekts wurde die Betrachtungsgrenze des Roadmappings wie folgt gewählt: das Ziel einer Dekarbonisierung der Zementindustrie in Deutschland wurde so interpretiert, dass CO₂-Emissionen der Zementindustrie in die Atmosphäre möglichst weitgehend vermieden und zudem Möglichkeiten aufgezeigt werden, um ggf. verbleibende geringfügige Restemissionen⁵ durch die Zement- und Betonindustrie selbst zu kompensieren – z.B. durch den Einsatz von biogenen Brennstoffen in Kombination mit CO₂-Abscheidung und dauerhafter Bindung des abgeschiedenen CO₂. Eine Kompensation von Emissionen auf anderem Wege – z.B. durch Direktabscheidung von CO₂ aus der Luft (Direct Air Capture) an anderen Orten, Aufforstung o.ä. – ist prinzipiell auch möglich, stand jedoch nicht im Fokus des Projektes. Zudem

³ Gesetzesnovelle vom 31.8.2021

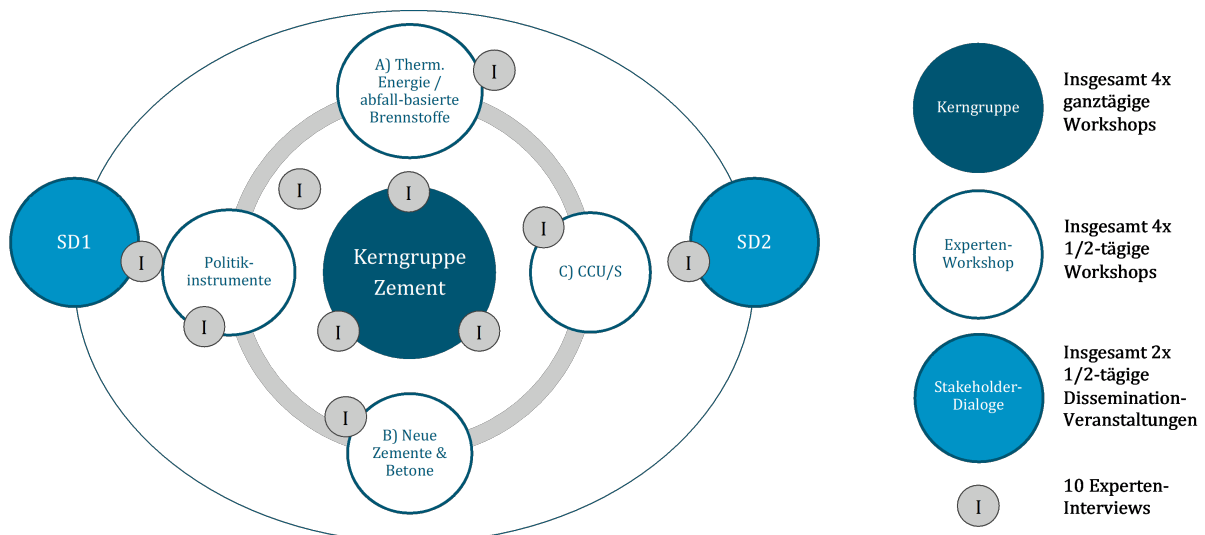
⁴ Der Begriff der „Dekarbonisierung“ wird hier verwendet, um den Prozess hin zur Klimaneutralität zu bezeichnen. Streng genommen ist der Begriff nicht ideal, da Kohlenstoff, der essentieller Bestandteil von Kalkstein ist, auch in einer zukünftigen, klimaneutralen Zementindustrie eine Rolle spielen wird.

⁵ Z.B. aus unvollständiger CO₂-Abscheidung, da eine Abscheiderate von 100% technisch nicht erreichbar ist.

wurde von einer gleichbleibenden Bauleistung des Betonbausektors ausgegangen. Eine veränderte Baunachfrage sowie andere Bauweisen (z.B. Holzbau) könnten zwar auch zu einer Minderung des CO₂-Ausstoßes durch die Zementindustrie führen, waren jedoch nicht Teil der Betrachtungen. Als Zeithorizont für die Dekarbonisierung wurde das Jahr 2050 gewählt⁶.

Die Erstellung der Roadmap-Eckpunkte erfolgte in einem partizipativen Prozess, in den Stakeholder*innen mit einer großen Breite von Fachwissen einbezogen wurden (Abbildung 1). Zu Beginn des Projektes wurde mit der sogenannten *Kerngruppe* eine zentrale Stakeholder-Gruppe gebildet, die über den gesamten Zeitraum das Projekt inhaltlich begleitet haben. Insgesamt nahmen 33 Stakeholder*innen aus 18 Institutionen an den vier Kerngruppentreffen teil. Die primäre Aufgabe der Kerngruppen war es, Visionen, Maßnahmen, Transformationspfade und Handlungsempfehlungen zu entwickeln sowie die Ergebnisse der Arbeitsschritte zu reflektieren, zu diskutieren und mit eigenem Wissen zu ergänzen. Im Rahmen des Projekts wurden zudem insgesamt zehn Experten-Interviews und vier Vertiefungsworkshops durchgeführt. Etwa zur Mitte und gegen Ende des Projektes wurden Zwischen- bzw. Endergebnisse einem breiteren Kreis von Stakeholder*innen in sogenannten Stakeholderdialogen vorgestellt und diese diskutiert. Über die gesamte Projektlaufzeit waren insgesamt mehr als 120 Stakeholder*innen in den Dialogprozess eingebunden.

Abbildung 1: Einbindung des Stakeholder-Know-hows über Kerngruppe, Experten-Interviews und -Workshops sowie Stakeholderdialoge



Quelle: eigene Darstellung, Wuppertal Institut

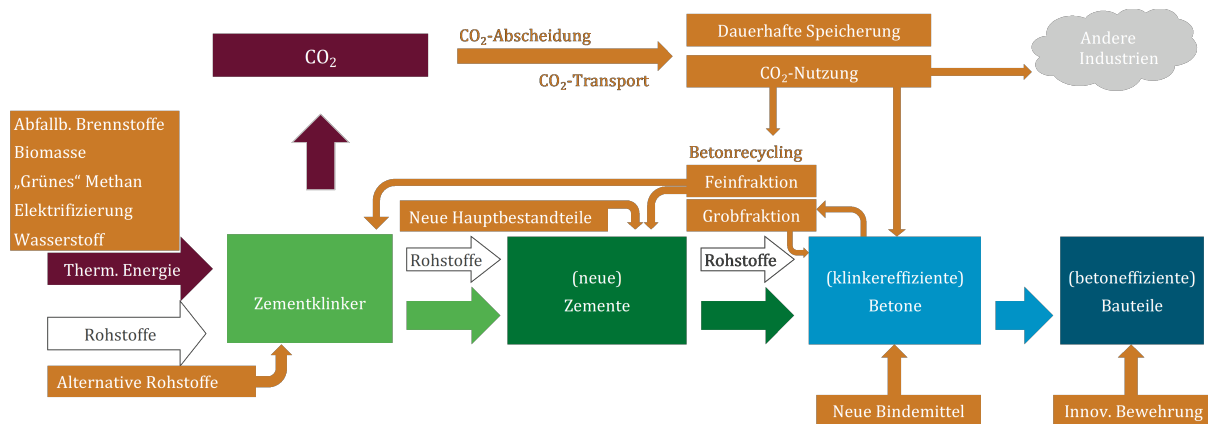
Es wurden im Rahmen des Projekts zunächst drei „Detail-Roadmaps“ entlang der Technologiebereiche „Bereitstellung thermischer Energie“, „Neue Zemente und Betonbautechniken“ (inklusive neuer Bindemittel) sowie „CO₂-Abscheidung und Nutzung oder Speicherung“ erstellt, und diese anschließend zu einer (vierten) „Gesamt-Roadmap“ verdichtet. Die vier Roadmaps stellen aus Sicht des Projektteams die Synthese der Ergebnisse der vielfältigen Diskussion mit den Stakeholdern und Stakeholderinnen sowie eigener Analysen des Projektteams dar. Dennoch spiegeln die Roadmaps nicht notwendigerweise in jedem Detail die Sichtweise aller Teilnehmerinnen und Teilnehmer der Workshops oder aller interviewten Expertinnen und Experten wider.

⁶ Da das Projekt bereits im Februar 2020 startete, wurde der grobe Rahmen des Roadmappings bereits festgelegt, bevor Mitte 2021 im Rahmen der Änderung des Klimaschutzgesetzes das Vorziehen des Zieljahres für Klimaneutralität in Deutschland von 2050 auf 2045 beschlossen wurde. Aufgrund der qualitativen Natur der Projektergebnisse sind diese jedoch auch für die verschärften Zielvorgaben des geänderten Klimaschutzgesetzes unverändert von Relevanz.

Technologische Grundlagen der Dekarbonisierung der Zementindustrie

Die Klimaneutralität der Zement- und Betonherstellung ist langfristig (bis 2045 bzw. 2050) technisch machbar, insofern die dafür erforderlichen Rahmenbedingungen geschaffen werden. Für die Dekarbonisierung der Zementindustrie stehen eine große Vielzahl an Techniken und Maßnahmen zur Verfügung, die an unterschiedlichen Stellen der Wertschöpfungskette Betonbau ansetzen und in vielen Fällen komplementär zueinander sind. Abbildung 2 gibt einen schematischen Überblick über die im Projekt betrachteten Minderungshebel entlang der Wertschöpfungskette Zementherstellung und Betonbau.

Abbildung 2: Schematische Darstellung technischer CO₂-Minderungshebel (orange) entlang der Wertschöpfungskette Zementherstellung und Betonbau



Quelle: eigene Darstellung, Wuppertal Institut

Die CO₂-Entstehung in der Wertschöpfungskette Betonbau ist nahezu vollständig auf die Herstellung von Zementklinker zurückzuführen. Aus heutiger Sicht bleibt Zementklinker auch langfristig (bis mind. 2050) ein unverzichtbarer Baustoff. Mit Blick auf eine Dekarbonisierung der Zementindustrie stand im Projekt daher die Minderung bzw. Vermeidung der CO₂-Emissionen aus der Klinkerherstellung im Mittelpunkt der Betrachtungen.

CO₂ entsteht bei der Klinkerherstellung zum einen durch die im Klinkerbrennprozess eingesetzten Brennstoffe (ca. 1/3 der CO₂-Mengen) und zum anderen durch die Entsäuerung des als Rohstoff eingesetzten Kalksteins (ca. 2/3 der CO₂-Mengen). Bei der Klinkerherstellung kann insbesondere der Anteil der brennstoffbedingten CO₂-Entstehung durch eine veränderte Bereitstellung von Prozesswärme vermindert bzw. prinzipiell gänzlich vermieden werden. Hingegen erscheint eine Reduktion der prozessbedingten CO₂-Entstehung pro Tonne Klinker, die durch die Entsäuerung des eingesetzten Kalksteins bedingt ist, aus heutiger Sicht nur sehr geringfügig durch den Einsatz alternativer, bereits entsäuerter Rohmaterialien möglich.

Durch einen effizienten Einsatz von Beton⁷ und durch einen effizienten Einsatz von Zement und Klinker in Betonen kann der Bedarf an CO₂-intensivem Klinker reduziert, jedoch nicht auf null abgesenkt, werden. Innovative Ansätze im Betonbau und neue Zemente unter Verwendung innovativer Hauptbestandteile sind essentiell für solch einen klinkereffizienten Betonbau. Neue Bindemittel, die ohne konventionellen Klinker auskommen, können in gewissem Umfang ebenfalls eine Rolle spielen – bei ihrer Herstellung fällt jedoch ebenfalls CO₂ an.

⁷ Im Rahmen des Projekts wurde die Betrachtungsgrenze so gewählt, dass von einer gleichbleibenden Bauleistung des Betonbausektors ausgegangen wird. Ein effizienter Einsatz von Beton bezieht sich demnach hier auf die pro Betonbauteil benötigte Menge Beton.

Da aus heutiger Sicht Zementklinker auch zukünftig eine wichtige Rolle zukommt und insbesondere die mit seiner Herstellung verbundene prozessbedingte CO₂-Entstehung nicht vermieden werden kann, kommt der CO₂-Abscheidung sowie der möglichst dauerhaften Bindung des abgeschiedenen CO₂ eine wichtige Rolle für die Dekarbonisierung der Zementindustrie zu. Das abgeschiedene CO₂ kann entweder genutzt oder dauerhaft gespeichert werden. Der Verbleib des abgeschiedenen CO₂ ist Gegenstand vielfältiger Diskussionen und Überlegungen.

Beim Betonrecycling kann die Grobfraktion (Gesteinskörnung) in der Betonherstellung wiederverwendet werden (RC-Beton), und die Feinfraktion ggf. zukünftig in verschiedenen Teilprozessen der Zementherstellung genutzt werden. Das Betonrecycling bietet durch verschiedene Verfahren zudem Möglichkeiten zur Nutzung und dauerhaften Bindung von CO₂.

Eckpunkte für eine Roadmap zur Dekarbonisierung der Zementindustrie

Die im folgenden dargestellte Gesamt-Roadmap (Abbildung 3) stellt aus Sicht des Projektteams die Synthese der Ergebnisse der vielfältigen Diskussion mit den Stakeholder*innen sowie eigener Analysen des Projektteams dar. Dennoch spiegelt die Roadmap nicht notwendigerweise in jedem Detail die Sichtweise aller Teilnehmerinnen und Teilnehmer der Workshops oder aller interviewten Expertinnen und Experten wider. Aspekte, zu denen in den Workshops abweichende Perspektiven besonders deutlich wurden, sind in der Roadmap markiert (s. „Blitz“-Symbole) und die unterschiedlichen Perspektiven werden für diese Fälle im Folgenden skizziert.

Vision

Das zentrale Element der Vision zur Dekarbonisierung der Zementindustrie bis (spätestens) zum Jahr 2050 ist eine ggü. heute deutliche Minderung der CO₂-Entstehung durch die Klinkerproduktion. Dies umfasst einerseits die Minderung (fossiler) CO₂-Mengen aus der Bereitstellung von Prozesswärme durch einen Wechsel der eingesetzten Energieträger. Zum anderen werden in der Vision die prozessbedingten CO₂-Mengen durch einen möglichst effizienten Einsatz von Klinker entlang der gesamten Wertschöpfungskette und einem dadurch bei gleicher Bauleistung verringerten Klinkerbedarf minimiert. Die Emission der verbleibenden, nicht vermeidbaren CO₂-Mengen in die Atmosphäre wird durch CCUS (weitgehend) unterbunden. Das abgeschiedene CO₂ wird möglichst dauerhaft gebunden bzw. gespeichert, um dem Kohlenstoffkreislauf der Erde keine zusätzlichen fossilen Kohlenstoffmengen zuzuführen. Dennoch kann es in einzelnen Fällen sinnvoll sein, CO₂ aus der Zementindustrie als Kohlenstoffquelle für andere Sektoren nutzbar zu machen, auch wenn dadurch keine dauerhafte Bindung gewährleistet werden kann. Nicht vermeidbare CO₂-Restemissionen, z.B. durch unvollständige CO₂-Abscheidung, werden durch negative Emissionen aus der Nutzung biogener Brennstoffe (inkl. biogener abfallbasierter Brennstoffe) in Kombination mit CO₂-Abscheidung und einer dauerhaften Bindung bzw. Speicherung des abgeschiedenen CO₂ kompensiert bzw. überkompensiert – ggf. bis hin zu einem insgesamt klimapositiven Beitrag der Zementindustrie. Die Zement- und Betonindustrie leistet in der Vision zudem einen Beitrag zu einer möglichst weitgehenden Kreislaufwirtschaft und damit zur Ressourceneffizienz. Dies beinhaltet die thermische und stoffliche Nutzung von Abfallstoffen im Klinkerbrennprozess als auch eine umfassende Kreislaufwirtschaft im (Beton-)Bau.

Abbildung 3: Vision und Roadmap zur Dekarbonisierung der Zementindustrie

Hinweis: Zur Definition der für die Umsetzung der Maßnahmen relevanten Akteursgruppen (= Icons am rechten Rand der Handlungsfelder in der Roadmap) siehe die Erläuterungen und die Tabelle 6 am Anfang von Kapitel 4.



Quelle: eigene Darstellung, Wuppertal Institut

Transformationspfad

Bereitstellung thermischer Energie

Die Bereitstellung thermischer Energie durch fossile Brennstoffe wird in der Roadmap kontinuierlich verringert und mittel- bis langfristig vollständig aufgegeben. Langfristig kommen fossile Brennstoffe nur in dem (aus heutiger Sicht unwahrscheinlichen und unerwünschten) Fall zum Einsatz, das nicht ausreichend alternative Energieträger verfügbar gemacht werden können.

Als Ersatz fossiler Brennstoffe wird zum einen der anteilige Einsatz abfallbasierter Brennstoffe ausgeweitet, wobei hierfür auch zukünftig nur solche Abfallfraktionen zum Einsatz kommen, die nicht recycelt werden können. In Ergänzung zu abfallbasierten Brennstoffen werden in der Roadmap zur Bereitstellung von Prozesswärme möglichst erneuerbare Energieträger genutzt. Für eine direkte Nutzung von (erneuerbarem) Strom sind noch technische Weiterentwicklungen erforderlich. Eine direkte Nutzung von Strom erscheint aus technischer Sicht mittelfristig zumindest anteilig möglich. Der Einsatz von (grünem) Wasserstoff im Klinkerbrennprozess ist technisch möglich, der maximal mögliche Anteil von H₂ an der Wärmebereitstellung ist aus heutiger Sicht jedoch aus technischen Gründen begrenzt und Gegenstand von Forschung und Entwicklung. Aufgrund der mindestens kurz- und mittelfristig erwarteten Knappheit von Wasserstoff erfolgt sein Einsatz im Klinkerbrennprozess in der Roadmap erst langfristig. Der Einsatz (nachhaltiger) Biomasse aus dem Anbau von Energiepflanzen⁸ ist aus technischer Sicht prinzipiell bis zu 100% der Prozesswärmebereitstellung möglich. Zentrales Kriterium für den Einsatz von Biomasse in der Zementindustrie ist in der Roadmap die Gewährleistung der Nachhaltigkeit der Biomasse.

Letztlich bleiben voraussichtlich alle erneuerbaren Energieträger auch mittel- und langfristig knappe Güter. Zu berücksichtigen ist zudem, dass sich die Verfügbarkeit und Kosteneffizienz verschiedener erneuerbarer Energieträger zwischen Standorten der Zementindustrie unterscheiden können. Entsprechend gab es in der Akteursgruppe des Projekts kein einheitliches Bild dazu, welche erneuerbaren Energieträger zukünftig (primär) im Klinkerbrennprozess zum Einsatz kommen können und werden (s. Blitz-Symbol).

Neue Zemente und Betonbautechniken (NZB)

Für die Klinkereffizienz durch neue Zemente, Bindemittel und Betonbautechniken spielen Ansätze aus der und ein Zusammenspiel über die gesamte Wertschöpfungskette Betonbau eine Rolle. Neue Zemente und Bindemittel⁹ sind teilweise bereits heute in Nischen am Markt und ihr Einsatz wird in der Roadmap kurz- bis mittelfristig weiter ausgeweitet. Mittel- bis langfristig ist jedoch der Rückgang und schlussendlich Wegfall von Hüttsand aus der Stahlherstellung sowie von Flugaschen aus der Kohleverstromung zu berücksichtigen, so dass einige neue Zemente, die kurz- und mittelfristig zur Klinkereffizienz beitragen können, langfristig nicht mehr produziert werden können. Daher muss der Einsatz weiterer Ausgangsstoffe – z.B. calcinierte Tone, Betonbrechsande und reaktivierte Stahlwerksschlacken – (weiter) erforscht und diese in ausreichenden Mengen verfügbar gemacht werden, so dass diese mittel- und langfristig als Zementhauptbestandteile verwendet werden und einen substanziellen Beitrag zur Klinkereffizienz leisten können.

⁸ Z.B. Kurzumtriebsplantagen

⁹ Als „neue Zemente“ werden hier Bindemittel bezeichnet, in denen Portlandzementklinker ein Hauptbestandteil neben anderen Hauptbestandteilen ist, die jedoch heute (bzw. vor Erscheinen der DIN EN 197-5) in dieser Form nicht oder nur per Zulassung im Einzelfall oder per allgemeiner bauaufsichtlicher Zulassung am Markt angeboten wurden. Als „neue Bindemittel“ werden hier Bindemittel bezeichnet, die keinen konventionellen Portlandzementklinker enthalten.

Im Bereich der neuen Betone wird in der Roadmap zunächst ein von heute an kontinuierlich steigender Einsatz von Betonen mit rezyklierter Gesteinskörnung (RC-Beton) vorgesehen, wodurch insbesondere ein Beitrag zur Ressourceneffizienz geleistet werden kann.¹⁰ Mittel- und langfristig sieht die Roadmap zudem das Potenzial, durch die Weiterentwicklung und Markteinführung neuer Betone mit ggü. heutigen Betonen reduziertem Zementgehalt einen Beitrag zur Klinkereffizienz zu leisten. Hierfür ist eine präzise Sortierung und Feinabstimmung der Betonbestandteile erforderlich und für die Markteinführung sind sowohl Anpassungen bei Regelwerken als auch ein umfassender Aufbau von Fachwissen und Praxiserfahrung erforderlich.

Für einen betoneffizienten Betonbau, der zukünftig mindestens genauso leistungsfähig ist wie heute, stehen bereits heute Betonbautechniken zur Verfügung, deren Einsatz in der Roadmap weiter ausgeweitet wird (z.B. Einbringen von Hohlkörpern, vorgespannte Decken). Die Verwendung von alternativen Bewehrungen aus nicht-korrosionsanfälligen Materialien – z.B. Carbon, Basalt – anstelle des heute üblichen Baustahls bietet ein großes Potenzial zur Verringerung der Bauteildicke und somit zur Betoneffizienz.¹¹ Aus bautechnischer Sicht gibt es keine Einschränkungen bzgl. einer weitreichenden Skalierung des Ansatzes, es besteht jedoch noch Forschungsbedarf bzw. ein Markthochlauf muss noch erfolgen. In der Roadmap wird davon ausgegangen, dass einige alternative Materialien in geeigneten Marktsegmenten zeitnah skaliert werden können (z.B. Basalt) und andere mittel- bis langfristig eine Rolle spielen (z.B. Carbon). Weitere betoneffiziente Bauweisen wie Gradientenbeton, ultrahochfeste Betone und 3D-Druck-Verfahren werden bereits in Nischen verwendet bzw. wurden in Pilotvorhaben demonstriert. In der Roadmap erfolgt spätestens mittelfristig eine Skalierung dieser Bauweisen zu größeren Marktanteilen.

Die heute in großen Mengen gehandelten Zemente sind prinzipiell für alle Anwendungen im Betonbau geeignet und i.d.R. erfolgt die Wahl eines Zements durch den Betonhersteller primär anhand des Zementpreises. Neue, klinkereffiziente Zemente und Bindemittel sind jedoch i.d.R. nicht mehr gleichermaßen für alle Betonbauanwendungen geeignet. Insbesondere im Bereich der Innenräume und bei einfachen Außenbauteilen ohne erhöhte Anforderungen an die Dauerhaftigkeit der Betone bestehen große Potenziale für den Einsatz klinkereffizienter Zemente. Ihr Markthochlauf erfordert daher einen im Vergleich zu heute stärker nach Anwendungszweck differenzierten Einsatz von Bindemitteln. Im Bereich des Betonbaus ermöglicht die Betonnorm zudem eine Bemessung des Zementgehalts von Betonen entsprechend der Anforderungen an den Beton. Hier bestehen heute in der Praxis noch Potenziale, diese Bemessung mit Blick auf die Klinkereffizienz zu optimieren. Ein stärker nach Anwendungszweck differenzierter Einsatz von Bindemitteln und Betonen ist daher eine Voraussetzung für die Hebung verschiedener oben aufgeführter Minderungspotenziale und als Querschnittsaufgabe von großer Relevanz.

CCUS

Für die Abscheidung verbleibender, nicht anderweitig systemdienlich vermeidbarer CO₂-Mengen¹² ist der Aufbau von CO₂-Abscheideanlagen an Klinkeröfen erforderlich. In Deutschland werden gemäß der Roadmap kurzfristig Pilot- und Demonstrationsanlagen errichtet, um die

¹⁰ Der Beitrag von RC-Betonen zur CO₂-Effizienz hängt von den Details ab, ist jedoch prinzipiell gering, da sich der Klinkerbedarf durch den Einsatz rezyklierter Gesteinskörnung nicht oder zumindest nicht wesentlich verändert.

¹¹ Die Bemessung der Bauteildicke muss bei Einsatz von Baustahl den Korrosionsschutz berücksichtigen, so dass Bauteile häufig dicker geplant werden, als dies aus statischen Gründen erforderlich wäre.

¹² Mit einbezogen sind hier auch fossile CO₂-Mengen aus der thermischen Nutzung von nicht anderweitig recycelbaren Abfällen. Diese CO₂-Mengen ließen sich zwar prinzipiell in der Zementindustrie durch Nutzung CO₂-neutraler Energieträger vermeiden, würden dann jedoch an anderer Stelle (Abfallsektor) entstehen.

verschiedenen Verfahren zur CO₂-Abscheidung zu testen und weiterzuentwickeln.¹³ Mittel und langfristig (spätestens ab ca. 2030) erfolgt sukzessive der Aufbau von CO₂-Abscheideanlagen im industriellen Maßstab und die ggf. erforderliche Umrüstung bzw. ein Neubau der Öfen.

Ein Teil des abgeschiedenen CO₂ wird gemäß der Roadmap für Verfahren genutzt, bei denen es durch Mineralisierung dauerhaft gebunden wird. Viele dieser Verfahren setzen an verschiedenen Arbeitsschritten des Betonbaus (z.B. Injektion von CO₂ in Frischbeton, Aushärtung von Betonfertigbauteilen in CO₂-Atmosphäre) bzw. des Betonrecyclings (Rekarbonatisierung von Betonabbruch) an. Betonherstellung und -recycling erfolgen in hohem Maße dezentral, so dass eine im Vergleich zur CO₂-Nutzung für chemische Grundstoffe und Kraftstoffe bzw. zur CO₂-Speicherung stärker dezentrale Infrastruktur aufgebaut werden muss, mittels derer CO₂ und Beton bzw. Betonabbruch an geeigneten Orten zusammengeführt werden.

Ein mengenmäßig größeres Potenzial für eine CO₂-Nutzung als für die Mineralisierungsverfahren besteht aus heutiger Sicht für die CO₂-basierte Herstellung von chemischen Grundstoffen und Kraftstoffen. Zu berücksichtigen ist jedoch, dass das CO₂ hierdurch nur für die Lebensdauer der hergestellten Produkte gebunden wird und für die Verfahren große Mengen von Wasserstoff benötigt werden. Ein Teil des abgeschiedenen CO₂ wird gemäß der Roadmap ggf. für die Herstellung von chemischen Grundstoffen und Kraftstoffen dort genutzt, wo eine dauerhafte Bindung des CO₂ nicht gewährleistet werden kann, ausreichend grüner Wasserstoff auf systemdienliche¹⁴ Weise bereitgestellt werden kann und sich bzgl. der Bereitstellung von Kohlenstoff Vorteile ggü. Alternativen (z.B. Direct Air Capture) ergeben. Aufgrund der (angenommenen) kurz- und mittelfristigen Knappheit von erneuerbarem Strom und grünem Wasserstoff erfolgt eine CO₂-Nutzung für die Herstellung von chemischen Grundstoffen und Kraftstoffen in der Roadmap erst langfristig. Pilot- und Demonstrationsanlagen zur Weiterentwicklung der CCU-Verfahren werden jedoch bereits kurz- und mittelfristig errichtet und betrieben.

Abgeschiedenes CO₂, das keiner Nutzung zugeführt wird, wird in der Roadmap geologisch gespeichert. Eine geologische Speicherung ist derzeit und absehbar in Deutschland rechtlich nicht möglich und gesellschaftlich bzw. politisch nicht erwünscht. Als Speicherstätten kommen daher aus heutiger Sicht v.a. ausgeförderte Erdgas- und Ölfelder sowie saline Aquifere unter der Nordsee im europäischen Ausland (Norwegen, Niederlande, UK, Dänemark, ggf. Island) in Betracht, die derzeit für den Zweck einer geologischen CO₂-Speicherung erschlossen werden. Die Demonstration der gesamten CCS-Kette vom Zementwerk bis zur Speicherung wird in Norwegen bis 2024 angestrebt und erfolgt in der Roadmap für deutsche Zementwerke und CO₂-Infrastrukturen noch bevor CO₂-Abscheideanlagen im industriellen Maßstab errichtet werden. Es gab zwischen den im Projekt aktiven Akteuren und Akteurinnen unterschiedliche Auffassungen darüber, ob die geologische Speicherung von CO₂ eine langfristig tragfähige Lösung darstellt oder ob diese nur vorübergehend und möglichst kurzzeitig eine Rolle spielen sollte, bis andere Verfahren zur dauerhaften Bindung von CO₂ gefunden und zur Marktreife entwickelt wurden.

In der Roadmap wird davon ausgegangen, dass in den allermeisten Fällen eine Nutzung (bzw. Speicherung) des CO₂ nicht direkt am Zementwerk erfolgt. Daher ist der frühzeitige Aufbau einer CO₂-Infrastruktur, die Zementwerke mit CO₂-Nutzern und Seehäfen verbindet, eine Voraussetzung für den Hochlauf der CO₂-Abscheidung im industriellen Maßstab. Aufgrund der zu transportierenden CO₂-Mengen und der geographischen Lage der Zementwerke, von denen

¹³ Eine Priorisierung bestimmter CO₂-Abscheidungsverfahren erfolgt in der Roadmap nicht.

¹⁴ D.h. dass der Wasserstoff bzw. der Strom, der für seine Herstellung benötigt wird, nicht an anderer Stelle mit größerer Klimaschutzwirksamkeit (z.B. Wärmepumpen, E-Kfz) eingesetzt werden könnte.

nur wenige über einen Zugang zu ausreichend großen Schifffahrtsstraßen verfügen, können Züge und Schiffe zwar eine gewisse Rolle in dieser CO₂-Infrastruktur spielen – insbesondere in einer Hochlaufphase, in der die CO₂-Quellen/Abnehmer-Beziehungen noch unsicher sind. Mittel- und langfristig erfolgt der Transport des CO₂ gemäß der Roadmap jedoch zu großen Teilen mittels eines CO₂-Pipelinennetzwerks. Um ein solches Netzwerk mittelfristig realisieren zu können, sind sehr zeitnah erste Schritte erforderlich.

Treiber

Ein zentraler Treiber der Dekarbonisierung der Zementindustrie ist ein zukünftig weiter steigender CO₂-Preis. Die verschiedenen, im Transformationspfad skizzierten, CO₂-Minderungsansätze haben unterschiedlich hohe CO₂-Vermeidungskosten. Bereits heute unterstützt der CO₂-Preis Bemühungen zur CO₂-Minderung der Zementindustrie (z.B. verstärkter Einsatz abfallbasierter Brennstoffe) und durch einen zukünftig weiter steigenden CO₂-Preis gelangen immer weitere CO₂-Minderungsansätze in den Bereich der wirtschaftlichen Konkurrenzfähigkeit zu konventionellen Verfahren. Ein CO₂-Preis alleine ist jedoch kein Garant für das Gelingen der Transformation der Zementindustrie.

Verschiedene weitere Treiber unterstützen einzelne CO₂-Minderungsansätze. Die Digitalisierung unterstützt den effizienten Einsatz von Zementklinker entlang der Wertschöpfungskette Betonbau, indem Informationsmanagement und Qualitätskontrolle verbessert und z.B. durch den Einsatz von künstlicher Intelligenz Herstellungsprozesse weiter optimiert werden können. Ein zunehmendes Bewusstsein für die Beschränktheit von Ressourcen und die damit einhergehenden Bestrebungen und Entwicklungen hin zu einer möglichst umfassenden Kreislaufwirtschaft unterstützen die Entwicklung von Recyclingverfahren im Betonbau, welche wiederum Ansatzpunkte für eine CO₂-Nutzung durch Mineralisierung bieten.

Die Erschließung von CO₂-Speicherstätten und der Aufbau zugehöriger CO₂-Transportinfrastrukturen im europäischen Ausland bieten eine Perspektive für den Verbleib des CO₂ aus deutschen Zementwerken und befördern entsprechende Überlegungen und Planungen zum Aufbau von Abscheideanlagen durch Zementhersteller. Der zukünftige Kohlenstoffbedarf der Chemie- und Kraftstoffindustrie sowie die Perspektive einer möglichen (anteiligen) Bereitstellung dieses Kohlenstoffs aus inländischem CO₂ schaffen einen Anreiz für die Weiterentwicklung und Erprobung entsprechender CCU-Verfahren.

Hemmnisse

Im Rahmen des Roadmappings erfolgte bzgl. der zeitlichen Perspektive der Hemmnisse keine vertiefte Diskussion. Der Abbildung 3 in dargestellte Zeitverlauf der Hemmnisse stellt daher aus Sicht der Autoren eine grobe Annäherung daran dar, innerhalb welchen Zeithorizonts (kurzfristig, mittelfristig, langfristig) Hemmnisse überwunden werden können bzw. überwunden werden müssen, um den oben skizzierten Transformationspfad realisieren zu können.

Ein zentrales Hemmnis für die Skalierung CO₂-effizienter Bindemittel, Betone und Bautechniken ist deren heute in vielen Fällen fehlende Wirtschaftlichkeit gegenüber konventionellen Produkten und Verfahren bzw. ggü. Importen von Zementen. So sind CO₂-neutrale¹⁵ Energieträger – Strom, Wasserstoff und Biomasse – heute knapp und entsprechend in der Zementindustrie (noch) nicht wirtschaftlich einsetzbar. Es wird erwartet, dass diese CO₂-neutralen Energieträger auch zukünftig (mindestens mittelfristig, ggf. auch langfristig) knappe Güter mit entsprechend hohen Kosten bleiben werden. Entsprechend hemmt diese Knappheit die Nutzung erneuerbarer Energieträger für die Bereitstellung thermischer Energie als auch den

¹⁵ Bezogen auf die direkten Emissionen.

Einsatz von grünem Wasserstoff bzw. von Strom aus erneuerbaren Quellen für die CO₂-basierte Herstellung von chemischen Grundstoffen und Kraftstoffen. Der Nutzung von neuen Zementen, Bindemitteln, Betonen und Bautechniken stehen in einigen Fällen ggf. auch im Vergleich zur konventionellen Bauweise höhere Kosten entgegen. In anderen Fällen werben Anbieter jedoch sogar mit Kostenvorteilen ggü. einer konventionellen Bauweise. Eine ökonomische Analyse verschiedener Ansätze wurde im Rahmen des Projekts nicht durchgeführt, so dass zur Wettbewerbsfähigkeit im Zeitverlauf hier keine Aussage getroffen werden kann. CCUS-Verfahren sind mindestens kurz- und mittelfristig im Vergleich zu einer konventionellen Produktion mit deutlich erhöhten Kapital- und Betriebskosten verbunden.

Eine begrenzte Verfügbarkeit geeigneter Ausgangsstoffe hemmt einen klinker- und ressourceneffizienten Betonbau auf verschiedene Weise: eine kurz- und mittelfristig verringerte Verfügbarkeit von Hüttensand und Flugaschen reduziert die Möglichkeiten des Einsatzes von heute etablierten klinkereffizienten Zementen sowie von Portlandkompositzementen und Kompositzementen. Eine – Stand heute – begrenzte Verfügbarkeit von calcinierten Tonen in Deutschland hemmt kurzfristig den Markthochlauf von Portlandkompositzementen unter Verwendung dieser Tone. Ein verstärkter Einsatz von RC-Beton wird fallweise durch einen Mangel an geeigneter rezyklierter Gesteinskörnung gehemmt.

Die Integration neuer Zemente, Bindemittel, Betone und Bautechniken in die Baupraxis stellt heute oftmals noch eine Herausforderung dar. Regulatorische und organisatorische Hemmnisse – wie z.B. starre technische Normen, Nicht-Berücksichtigung von CO₂-Effizienz in der Planung sowie ein Mehraufwand für den differenzierten Einsatz von Zementen und Betonen, der heute nicht standardmäßig entsprechend vergütet wird – stehen (heute) einem schnellen Markthochlauf klinkereffizienter Ansätze entgegen. Prinzipiell stellt die Integration auch zukünftig immer neu- bzw. weiterentwickelter Produkte und Bautechniken eine dauerhafte Herausforderung dar. Zentrale Hemmnisse, die heute bestehen – wie z.B. die Nicht-Berücksichtigung von CO₂-Effizienz in der Planung – werden gemäß der Roadmap jedoch kurzfristig überwunden.

Der heutige Rechtsrahmen für CCUS wurde im Projekt als zentrales Hemmnis für die Entwicklung von CCUS-Projekten identifiziert. Neben der fehlenden Anrechenbarkeit für CCU im EU ETS¹⁶ sowie der rechtlichen Unzulässigkeit von CCS bestehen weitere rechtliche Hemmnisse für das Errichten von Anlagen für CCU sowie für den CO₂-Transport, welche in der Roadmap kurzfristig überwunden werden, um den Hochlauf von CCUS-Verfahren zu ermöglichen.

Die fehlende Möglichkeit für den Abtransport von CO₂ von den Standorten der Klinkerherstellung ist heute ein zentrales Hemmnis für CCUS. Für die Planung und den Aufbau einer CO₂-Infrastruktur besteht neben rechtlichen Fragen ein Hemmnis darin, dass noch Unklarheit darüber herrscht, zwischen welchen Orten zukünftig CO₂ in welchen jeweiligen Mengen transportiert werden soll. Dies erschwert insbesondere die Planung von Pipelines, die von vornherein auf bestimmte CO₂-Mengen ausgelegt werden müssen, und die nach Errichtung auch räumlich nicht mehr verändert werden können. Gemäß der Roadmap werden zentrale offene Fragen bzgl. einer CO₂-Infrastruktur kurzfristig geklärt und es findet zeitnah eine Infrastrukturplanung statt, so dass ein Aufbau einer CO₂-Infrastruktur in dem im Transformationspfad skizzierten Zeitrahmen gelingt.

Ein sehr wesentliches Hemmnis für den Aufbau einer CO₂-Pipeline-Infrastruktur besteht auch in der (vermuteten) geringen gesellschaftlichen Akzeptanz dafür. Insbesondere auf der lokalen Ebene ist – basierend auf Erfahrungen aus anderen Infrastrukturprojekten – mit Widerstand

¹⁶ Eine Ausnahme besteht nach einem Urteil des Europäischen Gerichtshofs („Schaefer Kalk Urteil“) für den Fall, dass CO₂ zur Herstellung von gefällttem Kalziumkarbonat genutzt wird.

und langwierigen gerichtlichen Auseinandersetzungen zu rechnen. Es ist davon auszugehen, dass lokale Widerstände jeweils dort auftreten, wo eine CO₂-Infrastruktur errichtet wird, so dass dieses Hemmnis zeitlich und räumlich verteilt über den gesamten Zeitraum des Aufbaus einer CO₂-Infrastruktur zu adressieren ist.

Handlungsfelder

Das Schaffen zielführender gesetzlicher Rahmenbedingungen wird gemäß der Roadmap zeitnah angegangen, um insbesondere für den Einsatz von CCUS heute bestehende regulatorische Hemmnisse kurzfristig zu beseitigen – z.B. durch eine Änderung des KSpG sowie eine Ratifizierung des Zusatzes zu §6 im London Protokoll. Mittel- und langfristig ist eine kontinuierliche Weiterentwicklung von gesetzlichen Regelwerken und Rahmenbedingungen erforderlich, um die (erwartete) dynamische Entwicklung zu begleiten und zu unterstützen.

Die Wirtschaftlichkeit CO₂-effizienter Bindemittel, Zemente, Betone und Betonbautechniken wird in der Roadmap kurzfristig sichergestellt und ein Level Playing Field geschaffen. Der Europäische Emissionshandel sowie das derzeit auf europäischer Ebene verhandelte CO₂-Grenzausgleichssystem (Carbon Border Adjustment Mechanism – CBAM) sind hierfür zentrale Instrumente. Kurz- und ggf. mittelfristig – solange der wettbewerbliche Rahmen eine Wirtschaftlichkeit ohne zusätzliche Maßnahmen noch nicht ermöglicht – werden erhöhte CAPEX und OPEX auf geeignete Weise abgedeckt, z.B. durch Klimaschutzverträge.

Eine integrierte, sektorübergreifende Energiestrategie wird gemäß Roadmap kurz- bis mittelfristig partizipativ entwickelt und bietet spätestens mittelfristig, wenn der Hochlauf des Einsatzes erneuerbarer Energieträger für den Klinkerbrennprozess erfolgt, Richtungssicherheit für die dafür erforderlichen Investitionen.

Um den Markthochlauf CO₂- und ressourceneffizienter Bauweisen auch im Hinblick auf das Wissen und die Praxiserfahrung von Marktakteuren vorzubereiten, werden gemäß der Roadmap bereits kurzfristig Marktnischen geschaffen und diese im Zeitverlauf skaliert, in denen eine Nachfrage nach den entsprechenden Produkten bzw. Bauweisen besteht. Dies ist insbesondere für neue Bindemittel, Betone und für solche Bautechniken relevant, die signifikant veränderte Arbeitsschritte ggü. dem heute üblichen Vorgehen erfordern. Die öffentliche Hand spielt durch eine nachhaltige Beschaffung eine Schlüsselrolle für die Schaffung entsprechender Marktsegmente.

Die Integration von neuen Zementen, Bindemitteln, Betonen und Bautechniken in die Baupraxis ist gemäß der Roadmap eine dauerhafte Aufgabe, da immer wieder neue Entwicklungen in den einschlägigen Regelwerken berücksichtigt sowie die Kenntnisse von Akteurinnen und Akteuren aus der Praxis entsprechend weiterentwickelt werden müssen. Die Einführung eines CO₂-Fußabdrucks für Bauwerke ist eine zentrale Maßnahme, die gemäß der Roadmap kurzfristig umgesetzt wird.

Die Entwicklung einer umfassenden Kreislaufwirtschaft im Bauwesen ist eine mittel- bis langfristige Herausforderung, da hierfür zunächst noch technologische Weiterentwicklungen im Bereich der Separierung verschiedener Fraktionen von Betonabbruch erforderlich sind. Erste Schritte wie eine verstärkte Nutzung von recycelter Gesteinskörnung in RC-Beton werden jedoch zeitnah angegangen.

Die Klärung offener Fragen bzgl. einer zukünftigen CO₂-Infrastruktur – z.B. technische und nicht-technische Zugangsvoraussetzungen – erfolgt in der Roadmap ebenso zeitnah wie eine (erste) Planung von Trassenverläufen und Transportvolumina. Hierdurch kann kurz- bis mittelfristig mit dem Aufbau einer solchen Infrastruktur begonnen werden, so dass der CO₂-Abtransport von ersten Standorten bis spätestens 2030 gewährleistet ist und der Hochlauf der CO₂-Abscheidung

gemäß des Transformationspfads ab diesem Zeitpunkt erfolgen kann. Die CO₂-Infrastruktur wird im Zeitverlauf weiter ausgebaut und erschließt weitere Standorte der Zementindustrie, wobei die Planung kontinuierlich an die Entwicklung angepasst wird. Bzgl. des Anschlusses von Standorten gab es im Projekt abweichende Stimmen dazu, ob ein „diskriminierungsfreier“ Zugang aller Standorte gewährleistet sollte oder unter Berücksichtigung von zu überbrückenden Entfernungen und geographischen Gegebenheiten eher eine Auswahl von Standorten nach dem Kriterium der Effizienz¹⁷ erfolgen sollte.

Ein gesellschaftlicher Dialog zu Notwendigkeit, Umfang und Ausgestaltung einer CO₂-Infrastruktur wird zeitnah angestoßen, um eine Grundlage für den Infrastruktur-Planungsprozess sowie den Aufbau der CO₂-Infrastruktur zu schaffen. Aufgrund des nur noch kurzen Zeitfensters, innerhalb dessen die CO₂-Emissionen (aus der Zementindustrie) signifikant gesenkt werden müssen, wird ein idealtypischer Ablauf – zunächst gesellschaftlicher Dialog, dann Planung, dann Aufbau der Infrastruktur – nicht gewährleistet werden können. Vielmehr werden Dialog, Planung und ggf. Aufbau erster CO₂-Transportmöglichkeiten teilweise parallel verlaufen (müssen). Dies erfordert besonders große Sensibilität bei der Durchführung der Dialogformate sowie eine klare Kommunikation über die Ziele und Entscheidungsbefugnisse der beteiligten Akteure und Akteurinnen.

Forschung und Entwicklung sind über den gesamten Zeitraum der Roadmap erforderlich, um bestehende Ansätze weiter zu verbessern sowie ggf. innovative Lösungen zu finden und zu entwickeln.

Tabelle 1 gibt einen Überblick über zentrale Maßnahmen innerhalb der hier beschriebenen Handlungsfelder sowie über die Hauptakteure für die Umsetzung dieser Maßnahmen. Weitere Akteure sollten in beratender und unterstützender Funktion einbezogen werden (vgl. Abbildung 3).

Tabelle 1: Hauptakteure zur Umsetzung von zentralen Maßnahmen in den Handlungsfeldern der Roadmap

Handlungsfeld	Maßnahmen	Akteure
Gesetzliche Rahmenbedingungen	Änderung des Kohlendioxidspeichergesetzes (KSpG) (Erweiterung auf CO ₂ -Nutzung, bisher auf Speicherung begrenzt)	Bundesregierung bzw. BMWK
	Erweiterung Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) auf CO ₂ -Abscheidungsanlagen für CCU (bisläng nur CCS)	Bundesregierung
	Ratifizierung des Zusatzes zu §6 im London Protokoll (für grenzüberschreitenden CO ₂ -Transport zwecks Speicherung)	Ratifizierung durch Bundesregierung Bilaterale Abkommen mit Staaten, in denen CO ₂ gespeichert werden soll (alternativ supranationale Regelung auf EU-Ebene) sowie Verhandlungen mit Unternehmen als CO ₂ -Anbieter
Schaffung Level-Playing Field	Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM)	EU-Kommission, Rat und Parlament

¹⁷ Welcher Aufwand (z.B. Länge einer Pipeline) darf / soll betrieben werden, um welche Menge CO₂ abtransportieren zu können.

Handlungsfeld	Maßnahmen	Akteure
	Carbon Contracts for Difference (CCfD)	Verträge zwischen Unternehmen und dem Bund zur Abfederung von Mehrkosten einer klimafreundlichen Produktionsweise (Entwicklung eines nationalen CCfD-Pilotprogramms im BMWK)
Integrierte, sektorenübergreifende Energiestrategie	Systementwicklungsstrategie ¹⁸	BMWK unter Mitwirkung der Wissenschaft
Nischen für bzw. Förderung von CO₂-effizienten Bauweisen	Nachhaltige öffentliche Beschaffung	Öffentliche Hand als Bauträger (Bund, Länder, Kommunen, öffentliche Unternehmen)
	Kampagnen und Informationsangebote (insb. für Planer und Bauherren)	Betonhersteller, Planer, Bauherren und Verbände
Integration von neuen Zementen / Bindemitteln / Betonen / Bautechniken in die Baupraxis	Änderung von Bau- und Produktnormen	Bauherren, Bauaufsicht, Baustoffindustrie, Bauwirtschaft sowie Wissenschaft und beratende Ingenieure/Prüfingenieure im Rahmen des Deutschen Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb)
	Informations-, Aus- und Weiterbildungsangebote (insb. für Architekt*innen und Planer*innen), um Einführung von NZB in der Baupraxis zu unterstützen	Bauaufsicht, Branchenverbände, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb) Hochschulen und Forschungseinrichtungen (bspw. für Integration in Lehre), Branchenverbände und Einrichtungen wie „InformationsZentrum Beton“ (Angebot von Informationen und Schulungen) und Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb) (Erstellung von Planungshilfen)
	Einführung eines CO ₂ -Fußabdrucks für Bauwerke (verpflichtende Ausweisung, ggf. Klassifizierung, ggf. Begrenzung)	Bundesregierung und Fachministerien (BMWK bzw. BMWSB) als Akteure für eine verpflichtende Einführung eines CO ₂ -Fußabdrucks Schaffung einer fundierter Datenbasis zu den Gebäudeemissionen unter Berücksichtigung ihrer jeweiligen Baustoffe bspw. durch die Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (DGNB eV).

¹⁸ www.bmwk.de/Redaktion/DE/Dossier/ses.html

Handlungsfeld	Maßnahmen	Akteure
Entwicklung einer umfassenden Kreislaufwirtschaft im Bauwesen	Forschung, Pilotprojekte und Demonstrationsprojekte zu RC-Beton, Separierung von Betonabbruch, modulares Bauen	Wissenschaft, Betonhersteller, integrierte Zement-/Betonunternehmen, Anlagenbauer, Planer/Architekten
Planung und Aufbau CO₂-Infrastruktur	Klärung offener Fragen wie z.B. technische und nicht-technische Zugangsvoraussetzungen, (erste) Planung von Trassenverläufen und Transportvolumina	Gasnetzbetreiber, Länder (Ausführung/Genehmigung), Bund/Regulierungsbehörden (Regulatorik und Carbon Management Strategie), Unternehmen als Eigentümer der Punktquellen
Gesellschaftlicher Dialog zu CO₂-Infrastruktur und lokale Beteiligungsprozesse	Initiierung, Organisation und Durchführung von Beteiligungs- und Dialogformaten	Bund/Länder, zivilgesellschaftliche Organisationen unter Einbindung von wissenschaftlichen Expert*innen und Unternehmen, Gasnetzbetreiber, professionelles Dialog-/Kommunikationsmanagement
F&E	Forschung zu Direktelektrifizierung, H ₂ -Einsatz, neue Zemente und Betone, innovative Verfahren für dauerhafte CO ₂ -Bindung	Unternehmen, Hochschulen und Forschungseinrichtungen (u.a. der Verbände), ggf. auch öffentliche Fördermittelgeber

Summary

The aim of the DekarBlnd working package 3 was to develop cornerstones for a roadmap for the decarbonisation of the cement industry in a broad-based stakeholder dialogue process. The central background is the German Federal Government's Climate Protection Act, with the goal of greenhouse gas neutrality by 2045 and the interim target of a 65% reduction in greenhouse gas emissions by 2030 compared to 1990. With emissions of just under 21 million tonnes of CO₂ in 2021, the cement industry is responsible for around 2.7% of German greenhouse gas emissions (own calculation based on UBA, 2022; VDZ, 2022). Due to the process-related CO₂ emissions associated with the production of cement clinker, the cement industry is one of the sectors that is particularly difficult to decarbonise. The reduction of greenhouse gas emissions in the cement industry is therefore crucial for achieving the climate goals.

Methodical approach

There are various definitions of a roadmap. Basically, a roadmap is a graphical representation of change processes over time. What they have in common is (i) a reference to the future (but not a prediction), (ii) the temporal linking of the aspects represented and (iii) the work towards a vision or a goal. In addition, roadmaps usually have several levels (also called "layers").

Within the scope of the project, the following five layers were chosen for the roadmapping in consultation with stakeholders involved in the project:

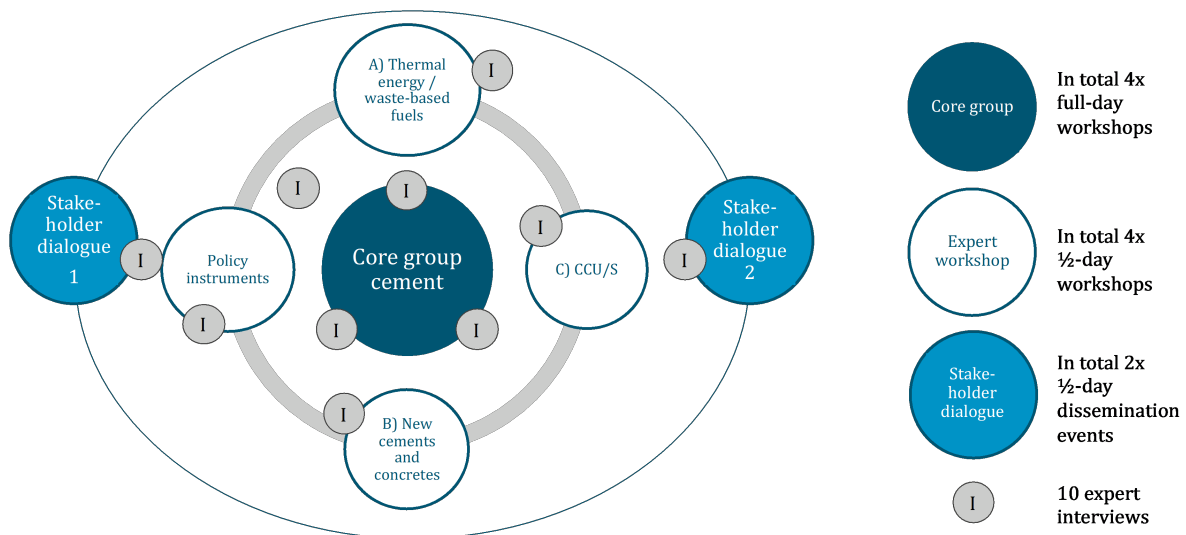
- ▶ **Vision elements:** Essential characteristics of the target system 2045/50
- ▶ **Transformation paths market / technology:** Implementation and scaling of innovative (technical) approaches over time
- ▶ **Drivers:** External developments that favour the transformation to CO₂ neutrality in the cement sector
- ▶ **Barriers:** Technical, economic, regulatory and social aspects that inhibit the transformation to CO₂ neutrality in the cement sector
- ▶ **Fields of action / measures:** Starting points to remove or mitigate barriers in order to enable or accelerate the transformation.

In the project, the boundary of consideration for roadmapping was chosen as follows: the goal of decarbonising the cement industry in Germany was interpreted in such a way that CO₂ emissions from the cement industry into the atmosphere are avoided as far as possible and, in addition, possibilities are identified to compensate for any remaining minor residual emissions by the cement and concrete industry itself - e.g. through the use of biogenic fuels in combination with CO₂ capture and permanent binding of the captured CO₂. Compensation of emissions by other means - e.g. direct air capture of CO₂ at other locations, reforestation or similar - is also possible in principle, but was not the focus of the project. In addition, a constant construction activity of the concrete construction sector was assumed. Although a change in construction demand and other construction methods (e.g. timber construction) could also lead to a reduction in CO₂ emissions by the cement industry, they were not part of the considerations. The year 2050 was chosen as the time horizon for decarbonisation.¹⁹

¹⁹ As the project already started in February 2020, the rough framework of the roadmapping was already defined before the decision was made in mid-2021 to push forward the target year for climate neutrality in Germany from 2050 to 2045 as part of the amendment to the Climate Protection Act. However, due to the qualitative nature of the project results, they continue to be relevant for the more stringent targets of the amended Climate Protection Act.

The roadmap cornerstones were drawn up in a participatory process involving stakeholders with a wide range of expertise (Figure 1). At the beginning of the project, a core group of stakeholders was formed, which accompanied the project in terms of content throughout the entire period. A total of 33 stakeholders from 18 institutions took part in the four core group meetings. The primary task of the core groups was to develop visions, measures, transformation paths and recommendations for action, as well as to reflect on and discuss the results of the work steps and to supplement them with their own knowledge. A total of ten expert interviews and four in-depth workshops were also conducted as part of the project. Around the middle and towards the end of the project, interim and final results were presented to a wider circle of stakeholders in so-called stakeholder dialogues and these were discussed. Over the entire duration of the project, more than 120 stakeholders were involved in the dialogue process.

Figure 1: Integration of stakeholder know-how via core group, expert interviews and workshops as well as stakeholder dialogues



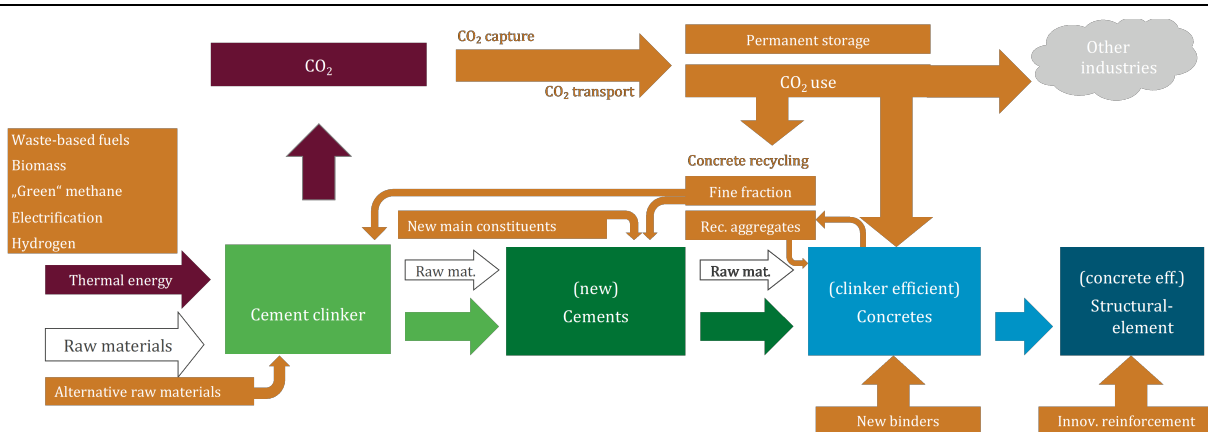
Source: own representation, Wuppertal Institute

Within the framework of the project, three "detailed roadmaps" were initially drawn up along the technology areas "Thermal energy supply", "New cements and concrete technologies" (including new binders) and "CO₂ capture and use or storage (CCUS)", and these were then condensed into a (fourth) "overall roadmap". From the project team's point of view, the four roadmaps represent the synthesis of the results of the diverse discussions with stakeholders and the project team's own analyses. Nevertheless, the roadmaps do not necessarily reflect the views of all workshop participants or all interviewed experts in every detail.

Technological background of the decarbonisation of the cement industry

Climate neutrality in cement and concrete production is technically feasible in the long term (by 2045 or 2050), provided that the necessary framework conditions are created. A large number of technologies and measures are available for the decarbonisation of the cement industry, which are applied at different points in the concrete construction value chain and in many cases are complementary to each other. Figure 2 provides a schematic overview of the reduction levers considered in the project along the value chain of cement production and concrete construction.

Figure 2: Schematic representation of technical CO₂ reduction levers (orange) along the value chain of cement production and concrete construction



Source: own representation, Wuppertal Institute

CO₂ emissions in the concrete construction value chain are almost entirely attributable to the production of cement clinker. From today's perspective, cement clinker will remain an indispensable building material in the long term (until at least 2050). With a view to decarbonising the cement industry, the project therefore focused on reducing or avoiding CO₂ emissions from clinker production.

CO₂ is produced in clinker production on the one hand by the fuels used in the clinker burning process (approx. 1/3 of the CO₂ volumes) and on the other hand by the decarbonation of the limestone used as raw material (approx. 2/3 of the CO₂ volumes). In clinker production, the proportion of fuel-related CO₂ emissions can be reduced or, in principle, completely avoided by changing the way process heat is provided. On the other hand, a reduction in process-related CO₂ emissions per tonne of clinker, which is caused by the decarbonation of the limestone used, appears from today's perspective to be possible only to a limited degree through the use of alternative, already decarbonated raw materials.

Through efficient use of concrete and efficient use of cement and clinker in concretes, the need for CO₂-intensive clinker can be reduced, but not reduced to zero. Innovative approaches in concrete construction and new cements using innovative main constituents are essential for such clinker-efficient concrete construction. New binders that do not require conventional clinker can also play a role to some extent - but their production also generates CO₂.

Since, from today's perspective, cement clinker will continue to play an important role in the future and, in particular, the process-related CO₂ generation associated with its production cannot be avoided, CO₂ capture and the permanent binding of the captured CO₂, if possible, play an important role in the decarbonisation of the cement industry. The captured CO₂ can either be used or permanently stored. The destination of the captured CO₂ is the subject of many discussions and considerations.

In concrete recycling, the coarse fraction (aggregate) can be reused in concrete production (RC concrete), and the fine fraction can possibly be used in the future in various sub-processes of cement production. Concrete recycling also offers opportunities for the use and permanent binding of CO₂ through various processes.

Cornerstones of a roadmap for the decarbonisation of the cement industry

From the project team's point of view, the overall roadmap presented below (Figure 3) represents the synthesis of the results of the diverse discussions with stakeholders and the project team's own analyses. Nevertheless, the roadmap does not necessarily reflect

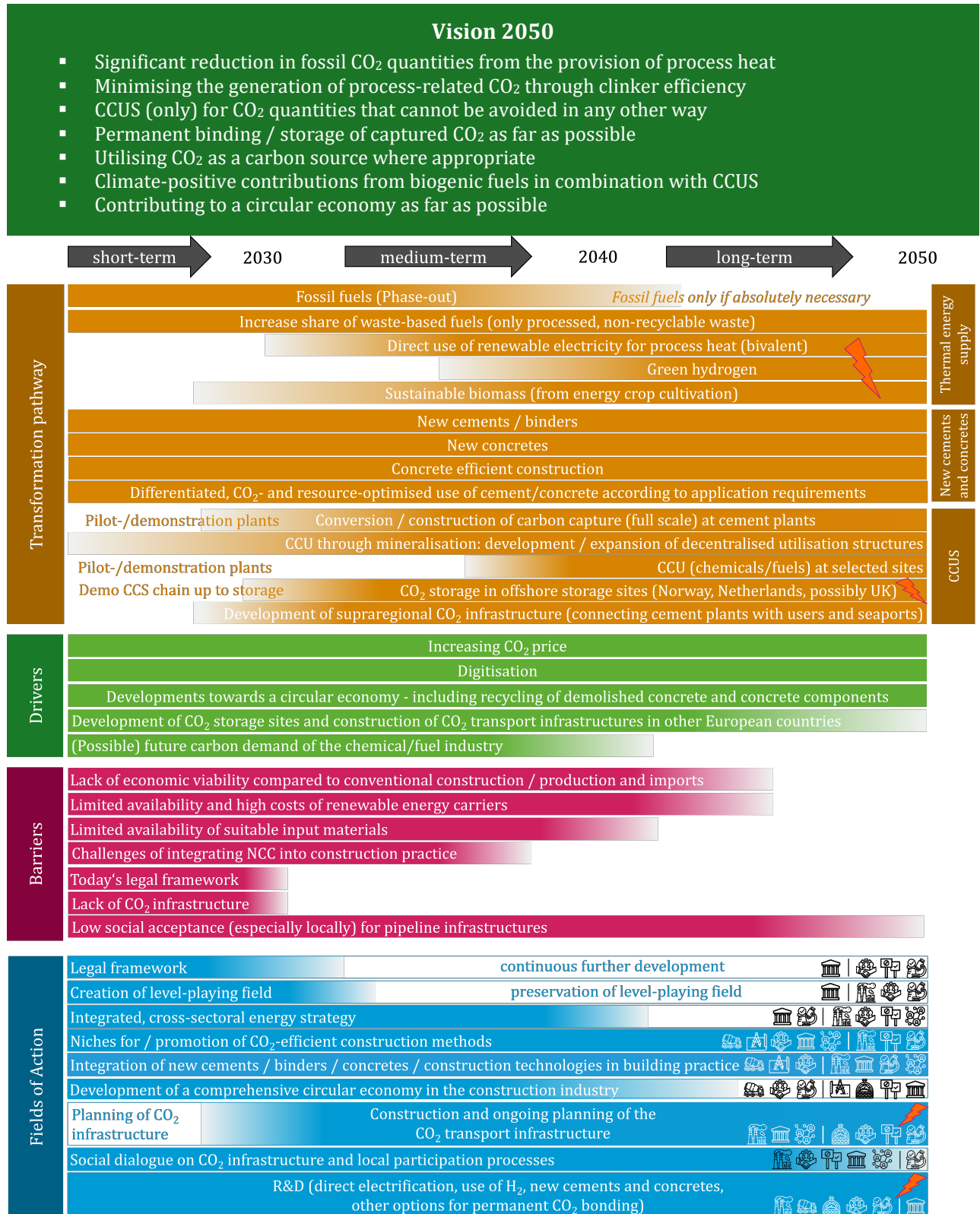
the views of all workshop participants or all interviewed experts in every detail. Aspects on which divergent perspectives became particularly clear in the workshops are marked in the roadmap (see "lightning" symbols) and the different perspectives for these cases are outlined below.

Vision

The central element of the vision for decarbonisation of the cement industry by (at the latest) 2050 is a significant reduction in CO₂ emissions from clinker production compared to today. On the one hand, this includes the reduction of (fossil) CO₂ quantities from the provision of process heat through a change in the energy sources used. On the other hand, the vision minimises the process-related CO₂ quantities by using clinker as efficiently as possible along the entire value chain and thus reducing the need for clinker for the same construction performance. The emission of the remaining, unavoidable CO₂ quantities into the atmosphere is (largely) prevented by CCUS. The captured CO₂ is bound or stored as permanently as possible so as not to add any additional fossil carbon to the earth's carbon cycle. Nevertheless, in individual cases it may make sense to make CO₂ from the cement industry usable as a carbon source for other sectors, even if this does not ensure permanent sequestration. Unavoidable CO₂ residual emissions, e.g. due to incomplete CO₂ capture, are compensated or overcompensated by negative emissions from the use of biogenic fuels (incl. biogenic waste-based fuels) in combination with CO₂ capture and a permanent binding or storage of the captured CO₂ - possibly up to an overall climate-positive contribution of the cement industry. In the vision, the cement and concrete industry also contributes to the recycling economy as far as possible and thus to resource efficiency. This includes the thermal and material use of waste materials in the clinker burning process as well as a comprehensive circular economy in (concrete) construction.

Figure 3: Vision and Roadmap for the decarbonisation of the cement industry

For the definition of the actor groups (= icons on the right edge of the fields of action in the roadmap) that are relevant for the implementation of the measures, see the explanations and Tabelle 6 at the beginning of chapter 4.



Source: own representation, Wuppertal Institute

Transformation pathway

Thermal energy supply

The provision of thermal energy by fossil fuels is continuously reduced in the roadmap and completely abandoned in the medium to long term. In the long term, fossil fuels will only be used in the (from today's point of view unlikely and undesirable) case that not enough alternative energy sources can be made available.

As a substitute for fossil fuels, the share use of waste-based fuels will be increased, whereby also in future only those waste fractions will be used that cannot be recycled. In addition to waste-based fuels, renewable energy sources are used as far as possible in the Roadmap for the provision of process heat. Further technical developments are still required for the direct use of (renewable) electricity. From a technical point of view, direct use of renewable electricity appears to be possible in the medium term, at least to a certain extent. The use of (green) hydrogen in the clinker burning process is technically possible, but the maximum possible share of H₂ in the heat supply is limited from today's perspective for technical reasons and is the subject of research and development. Due to the shortage of hydrogen expected at least in the short and medium term, its use in the clinker burning process in the roadmap only takes place in the long term. From a technical point of view, the use of (sustainable) biomass from the cultivation of energy crops²⁰ is in principle possible for up to 100% of the process heat supply. The central criterion for the use of biomass in the cement industry in the roadmap is to ensure the sustainability of the biomass.

After all, all renewable energy types are likely to remain scarce resources in the medium and long term. It must also be taken into account that the availability and cost efficiency of various renewable energy sources can differ between locations of the cement industry. Accordingly, there was no uniform view in the project stakeholder group as to which renewable energy sources can and will be used (primarily) in the clinker burning process in the future (see lightning symbol).

New cements and concrete technologies (NCC)

For clinker efficiency through new cements, binders and concrete construction techniques, approaches from and interaction across the entire concrete construction value chain play a role. Some new cements and binders²¹ are already on the market today in niches and their use will be further expanded in the short to medium term in the roadmap. In the medium to long term, however, the decline and eventual disappearance of granulated blast furnace slag from steel production and fly ash from coal-fired power generation must be taken into account, so that some new cements that can contribute to clinker efficiency in the short and medium term can no longer be produced in the long term. Therefore, the use of other raw materials - e.g. calcined clays and reactivated steel slags - must be (further) researched and made available in sufficient quantities so that they can be used as main cement constituents in the medium and long term and make a substantial contribution to clinker efficiency.

In the area of new concretes, the roadmap initially envisages a continuously increasing use of concretes with recycled aggregate (RC concrete), which can make a contribution to resource

²⁰ E.g. short rotation forestry

²¹ The term "new cements" is used here to describe binders in which Portland cement clinker is a main constituent along with other main constituents, but which were not offered on the market in this form today (or before DIN EN 197-5 was published) or were offered only by a case-by-case approval or by a general building authority approval. The term "new binders" is used here to describe binders that do not contain conventional Portland cement clinker.

efficiency in particular.²² In the medium and long term, the roadmap also sees the potential to contribute to clinker efficiency through the further development and market launch of new concretes with reduced cement content compared to today's concretes. This requires precise sorting and fine-tuning of the concrete constituents, and for the market launch, both adjustments to regulations and a comprehensive build-up of expertise and practical experience are necessary.

For concrete-efficient concrete construction that is at least as performing in the future as it is today, concrete construction technologies are already available today, the use of which will be further expanded in the roadmap (e.g. insertion of hollow bodies, prestressed slabs). The use of alternative reinforcement made of non-corrosive materials - e.g., carbon, basalt - instead of the structural steel commonly used today offers great potential for reducing the thickness of the component and thus for concrete efficiency²³. From a structural engineering point of view, there are no restrictions with regard to a far-reaching scaling of the approach, but there is still a need for research and a market ramp-up must still take place. The roadmap assumes that some alternative materials can be scaled up quickly in suitable market segments (e.g. basalt) and that others will play a role in the medium to long term (e.g. carbon). Other concrete-efficient construction methods such as gradient concrete, ultra-high-strength concrete and 3D printing processes are already being used in niches or have been demonstrated in pilot projects. In the roadmap, these construction methods will be scaled up to larger market shares in the medium term at the latest.

The cements traded in large quantities today are in principle suitable for all applications in concrete construction and, as a rule, the concrete manufacturer chooses a cement primarily on the basis of the cement price. However, new, clinker-efficient cements and binders are generally no longer equally suitable for all concrete construction applications. In particular, there is great potential for the use of clinker-efficient cements in the area of indoor spaces and simple outdoor components without increased demands on the durability of the concretes. Their market ramp-up therefore requires a more differentiated use of binders according to application purpose compared to today. In the area of concrete construction, the concrete standard also enables the cement content of concretes to be determined according to the requirements placed on the concrete. In practice, there is still potential to optimise this design with a view to clinker efficiency. A more differentiated use of binders and concretes according to the application purpose is therefore a prerequisite for raising the various reduction potentials listed above and is of great relevance as a cross-sectoral task.

CCUS

The construction of CO₂ capture plants at clinker kilns is necessary for the capture of remaining CO₂ quantities that cannot be avoided in any other way that is beneficial to the system.²⁴ According to the Roadmap, pilot and demonstration plants will be built in Germany in the short term to test and further develop the various CO₂ capture technologies. In the medium and long term (from around 2030 at the latest), CO₂ capture plants will be successively built on an industrial scale and, if necessary, the kilns will be converted or newly constructed.

²² The contribution of RC concretes to CO₂ efficiency depends on the details, but is in principle small, as the clinker demand does not change, or at least not significantly, through the use of recycled aggregates.

²³ The dimensioning of the component thickness must take corrosion protection into account when using structural steel, so that components are often planned thicker than would be necessary for structural reasons.

²⁴ Also included here are fossil CO₂ quantities from the thermal use of waste that cannot be recycled in any other way. Although these CO₂ quantities could in principle be avoided in the cement industry by using CO₂-neutral energy sources, they would then arise elsewhere (waste sector).

According to the roadmap, part of the captured CO₂ is used for processes in which it is permanently bound through mineralisation. Many of these processes are linked to various steps in concrete construction (e.g. injection of CO₂ into fresh concrete, curing of prefabricated concrete components in a CO₂ atmosphere) or concrete recycling (recarbonation of demolished concrete). Concrete production and recycling are to a large extent decentralised, so that – compared to the use of CO₂ for chemical raw materials and fuels or for CO₂ storage – a more decentralised infrastructure must be built up by means of which CO₂ and concrete or concrete demolition are brought together at suitable locations.

From today's perspective, the potential for CO₂ use for the CO₂-based production of chemical base materials and fuels is greater in terms of volume than that for mineralisation processes. However, it must be taken into account that the CO₂ is only captured for the lifetime of the manufactured products and that large quantities of hydrogen are required for the processes. According to the Roadmap, part of the captured CO₂ may be used for the production of chemical feedstocks and fuels where a permanent CO₂ bonding cannot be ensured, sufficient green hydrogen can be provided in a system-compatible way and there are advantages compared to alternatives (e.g. direct air capture) with regard to the provision of carbon. Due to the (assumed) short- and medium-term scarcity of renewable electricity and green hydrogen, CO₂ use for the production of chemical feedstocks and fuels in the roadmap is only considered in the long term. However, pilot and demonstration plants for the further development of CCU processes are already being built and operated in the short and medium term.

Captured CO₂ that is not put to any use is stored geologically in the Roadmap. Geological storage is currently and foreseeably not legally possible in Germany and is not socially or politically desirable. From today's point of view, storage sites are therefore mainly natural gas and oil fields as well as saline aquifers under the North Sea in other European countries (Norway, the Netherlands, the UK, Denmark, possibly Iceland), which are currently being developed for the purpose of geological CO₂ storage. The demonstration of the entire CCS chain from cement plant to storage is targeted in Norway by 2024, and takes place in the roadmap for German cement plants and CO₂ infrastructures even before industrial-scale CO₂ capture plants are built. There were differing opinions among the actors active in the project as to whether geological storage of CO₂ is a viable long-term solution or whether it should only play a temporary role for as short a time as possible until other processes for permanently capturing CO₂ have been found and developed to market maturity.

The roadmap assumes that in the vast majority of cases CO₂ will not be used (or stored) directly at the cement plant. Therefore, the early development of a CO₂ infrastructure that connects cement plants with CO₂ users and seaports is a prerequisite for the ramp-up of CO₂ capture on an industrial scale. Due to the quantities of CO₂ to be transported and the geographical location of the cement plants, only a few of which have access to sufficiently large shipping waterways, trains and ships can indeed play a certain role in this CO₂ infrastructure - especially in a ramp-up phase where the CO₂ source/receiver relationships are still uncertain. In the medium and long term, however, the transport of CO₂ according to the roadmap will largely be by means of a CO₂ pipeline network. In order to be able to realise such a network in the medium term, initial steps need to be taken very soon.

Drivers

A central driver of decarbonisation in the cement industry is a further increase of the CO₂ price in the future. The various CO₂ reduction approaches outlined in the transformation path have different CO₂ avoidance costs. The CO₂ price today already supports efforts to reduce CO₂ in the cement industry (e.g. increased use of waste-based fuels), and a further increase of the CO₂ price

in the future will bring more and more CO₂ reduction approaches into the range of economic competitiveness with conventional processes. However, a CO₂ price alone is no guarantee for the success of the transformation of the cement industry.

Various other drivers support individual CO₂ reduction approaches. Digitalisation supports the efficient use of cement clinker along the concrete construction value chain by improving information management and quality control and, for example, by enabling manufacturing processes to be further optimised through the use of artificial intelligence. An increasing awareness of the limited nature of resources and the associated efforts and developments towards the most comprehensive possible circular economy support the development of recycling processes in concrete construction, which in turn offer starting points for CO₂ utilisation through mineralisation.

The development of CO₂ storage sites and the construction of associated CO₂ transport infrastructures in other European countries offer a perspective for the storage of CO₂ from German cement plants and accordingly promote considerations and plans for the construction of capture plants by cement manufacturers. The future carbon demand of the chemical and fuel industry as well as the prospect of a possible (proportional) provision of this carbon from domestic CO₂ create an incentive for the further development and testing of corresponding CCU processes.

Barriers

Within the framework of the roadmapping, there was no in-depth discussion regarding the time perspective of the barriers. Therefore, the time course of barriers shown in Figure 3 represents, from the authors' point of view, a rough approximation of the time horizon (short-term, medium-term, long-term) within which barriers can or must be overcome in order to realise the transformation path outlined above.

A central barrier to the scaling up of CO₂-efficient binders, concretes and construction techniques is their lack of economic viability in many cases compared to conventional products and processes or to imports of cements. For example, CO₂-neutral²⁵ energy sources - electricity, hydrogen and biomass - are scarce today and accordingly cannot (yet) be used economically in the cement industry. It is expected that these CO₂-neutral energy sources will remain scarce goods with correspondingly high costs in the future (at least in the medium term, possibly also in the long term). Accordingly, this scarcity inhibits the use of renewable energy sources for the provision of thermal energy as well as the use of green hydrogen or electricity from renewable sources for the CO₂-based production of chemical feedstocks and fuels. The use of new cements, binders, concretes and construction techniques may in some cases also be hampered by higher costs compared to conventional construction methods. In other cases, however, suppliers even advertise cost advantages compared to conventional construction. An economic analysis of different approaches was not carried out within the scope of the project, so that no statement can be made here on competitiveness over time. CCUS methods are associated with significantly higher capital and operating costs compared to conventional production, at least in the short and medium term.

Limited availability of suitable raw materials hampers clinker- and resource-efficient concrete construction in various ways: reduced availability of granulated blast furnace slag and fly ash in the short and medium term reduces the possibilities of using today's established clinker-efficient cements as well as Portland composite cements and composite cements. A limited availability of calcined clays in Germany - as of today - inhibits the market ramp-up of Portland

²⁵ In terms of direct emissions.

composite cements using these clays in the short term. Increased use of RC concrete is inhibited on a case-by-case basis by a lack of suitable recycled aggregates.

The integration of new cements, binders, concretes and construction techniques into building practice is often still a challenge today. Regulatory and organisational barriers - such as rigid technical standards, non-consideration of CO₂ efficiency in planning, and additional costs for the differentiated use of cements and concretes, which are not remunerated accordingly as default - (today) stand in the way of a rapid market ramp-up of clinker-efficient approaches. In principle, the integration of new or further developed products and construction techniques will continue to be a permanent challenge in the future. However, central barriers that exist today - such as the failure to take CO₂ efficiency into account in planning - will be overcome in the short term according to the roadmap.

The current legal framework for CCUS was identified in the project as a central obstacle to the development of CCUS projects. In addition to the lack of eligibility for CCUs in the EU ETS²⁶ and the legal inadmissibility of CCS, there are further legal barriers to the construction of plants for CCUs and for CO₂ transport, which will be overcome in the short term in the roadmap to enable the ramp-up of CCUS processes.

The lack of possibilities for transporting CO₂ away from the clinker production sites is a central barrier to CCUS today. In addition to legal issues, one barrier to the planning and construction of a CO₂ infrastructure is the fact that it is still unclear between which locations CO₂ is to be transported in which respective quantities in the future. This makes it particularly difficult to plan pipelines that have to be designed from the outset for specific quantities of CO₂ and that cannot be changed spatially once they have been built. According to the roadmap, central open questions regarding a CO₂ infrastructure will be clarified in the short term and infrastructure planning will take place promptly so that a CO₂ infrastructure can be built within the timeframe outlined in the transformation path.

A very significant barrier to the development of a CO₂ pipeline infrastructure is also the (presumed) low level of social acceptance for it. Especially at the local level - based on experience from other infrastructure projects - resistance and prolonged legal disputes are to be expected. It can be assumed that local resistance will occur wherever a CO₂ infrastructure is built, so that this barrier must be addressed in a temporally and spatially distributed manner over the entire period of the construction of a CO₂ infrastructure.

Fields of action

In accordance with the roadmap, the creation of effective legal framework conditions will be tackled promptly in order to remove existing regulatory barriers in the short term, especially for the use of CCUS - e.g. through an amendment to the CCUS Act and ratification of the amendment to §6 in the London Protocol. In the medium and long term, a continuous development of legal regulations and framework conditions is necessary to accompany and support the (expected) dynamic development.

The economic viability of CO₂-efficient binders, cements, concretes and concrete construction technologies is ensured in the Roadmap in the short term and a level playing field is created. The European Emissions Trading Scheme and the Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM) currently being negotiated at European level are key instruments for this. In the short and, if necessary, medium term - as long as the market framework does not yet allow for economic

²⁶ According to a ruling of the European Court of Justice ("Schaefer Kalk ruling"), an exception exists in the case that CO₂ is used for the production of precipitated calcium carbonate.

viability without additional measures - increased CAPEX and OPEX will be compensated in a suitable manner, e.g. through climate protection contracts.

According to the roadmap, an integrated, cross-sectoral energy strategy will be developed in a participatory manner in the short to medium term and will provide orientation for the necessary investments in the medium term at the latest, when the use of renewable energy sources for the clinker burning process is ramped up.

In order to prepare for the market ramp-up of CO₂- and resource-efficient construction methods, also with regard to the knowledge and practical experience of market actors, market niches are already being created in the short term according to the roadmap and these are being scaled over a period of time in which there is a demand for the corresponding products or construction methods. This is particularly relevant for new binders, concretes and for those construction technologies that require significantly changed working steps compared to today's usual procedure. The public sector plays a key role in the creation of corresponding market segments through sustainable procurement.

According to the Roadmap, the integration of new cements, binders, concretes and construction technologies into building practice is a permanent task, as new developments in the relevant regulations must always be taken into account and the knowledge of actors from practice must be developed accordingly. The introduction of a carbon footprint for buildings is a central measure that will be implemented in the short term according to the Roadmap.

The development of a comprehensive circular economy in the construction industry is a medium to long-term challenge, as this initially requires further technological developments in the area of separating different fractions of concrete demolition waste. However, initial steps such as the increased use of recycled aggregate in RC concrete will be tackled in the near future.

The clarification of open questions regarding a future CO₂ infrastructure - e.g. technical and non-technical access requirements - is carried out in the roadmap just as promptly as the (initial) planning of routes and transport volumes. This means that the construction of such an infrastructure can begin in the short to medium term, so that CO₂ transport from the first sites is guaranteed by 2030 at the latest and the ramp-up of CO₂ capture in accordance with the transformation path can take place from this point onwards. The CO₂ infrastructure will be further expanded over time and will connect additional sites of the cement industry, whereby the planning will be continuously adapted to the development. With regard to the connection of sites, there were dissenting voices in the project as to whether "non-discriminatory" access of all sites should be guaranteed or whether, taking into account the distances to be bridged and geographical conditions, sites should rather be selected according to the criterion of efficiency.²⁷

A social dialogue on the necessity, scope and design of a CO₂ infrastructure will be initiated promptly in order to create a basis for the infrastructure planning process and the construction of the CO₂ infrastructure. Due to the short time window within which CO₂ emissions (from the cement industry) must be significantly reduced, an ideal-typical process - first social dialogue, then planning, then building the infrastructure - cannot be guaranteed. Rather, dialogue, planning and, if necessary, the establishment of initial CO₂ transport options will (have to) run partly in parallel. This requires great sensitivity in the implementation of the dialogue formats as well as clear communication about the goals and decision-making powers of the actors involved.

Research and development are required over the entire period of the roadmap to further improve existing approaches and, if necessary, to find and develop innovative solutions.

²⁷ What effort (e.g. length of a pipeline) may / should be made to be capable of transporting what amount of CO₂.

Table 1 gives an overview of central measures within the fields of action described here as well as the main actors for the implementation of these measures. Other actors should be involved in an advisory and supportive role (cf. Figure 3).

Table 1: Main actors for the implementation of key measures in the fields of action of the roadmap

Fields of action	Measure	Actor
Legal framework conditions	Amendment of the Carbon Dioxide Storage Act (KSpG) (extension to CO ₂ use, previously limited to storage)	Federal government resp. Federal Ministry for Economic Affairs and Climate Action (BMWK)
	Extension of the Federal Immission Control Act (BImSchG) to CO ₂ capture plants for CCU (so far only CCS)	Federal government
	Ratification of the amendment to §6 in the London Protocol (for transboundary CO ₂ transport for storage)	Ratification by the Federal Government Bilateral agreements with states in which CO ₂ is to be stored (alternatively supranational regulation at EU level) and negotiations with companies as CO ₂ suppliers
Creation of Level-Playing Field	Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM)	EU Commission, Council and Parliament
	Carbon Contracts for Difference (CCfD)	Contracts between companies and the federal government to compensate for the additional costs of climate-friendly production methods (development of a national CCfD pilot programme in the BMWK)
Integrated, cross-sector energy strategy	System development strategy („Systementwicklungsstrategie“) ²⁸	BMWK with the participation of science
Niches for or support of CO₂-efficient construction methods	Sustainable public procurement	Public sector as property developer (federal government, federal states, municipalities, public companies)
	Campaigns and information services (especially for planners and building owners)	Concrete manufacturers, planners, building owners and associations

²⁸ www.bmwk.de/Redaktion/DE/Dossier/ses.html

Fields of action	Measure	Actor
Integration of new cements / binders / concretes / construction technologies in building practice	Amendment of building and product standards	Building owners, construction supervision, building materials industry, construction industry and science and consulting engineers/test engineers within the framework of the German Committee for Reinforced Concrete (Deutscher Ausschuss für Stahlbeton; DAfStb)
	Information, training and further education offers (especially for architects and planners) to support the introduction of NCC in building practice	Construction supervision, industry associations, German Committee for Reinforced Concrete (DAfStb) Universities and research institutions (e.g. for integration in teaching), industry associations and institutions such as "InformationsZentrum Beton" (offering information and training) and the German Committee for Reinforced Concrete (DAfStb) (producing planning guides)
	Introduction of a carbon footprint for buildings (mandatory declaration, classification as appropriate, limitation as appropriate)	Federal government and sectoral ministries (BMWK and BMWStB) as stakeholders for a mandatory introduction of a carbon footprint Creation of a sound database on building emissions, taking into account their respective building materials, e.g. by the German Sustainable Building Council (Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen; DGNB eV)
Development of a comprehensive circular economy in the construction industry	Research, pilot projects and demonstration projects on RC concrete, separation of demolished concrete, modular construction	Science, concrete manufacturers, integrated cement/concrete companies, plant engineering companies, planners/architects
Planning and construction of CO₂ infrastructure	Clarification of open questions such as technical and non-technical access requirements, (initial) planning of routing and transport volumes	Gas grid operators, German federal states (execution/permitting), federal government/regulatory authorities (regulatory and carbon management strategy), companies as owners of point sources
Societal dialogue on CO₂ infrastructure and local participation processes	Initiation, organisation and implementation of participation and dialogue formats	Federal and state governments, civil society organisations with the involvement of scientific experts and companies, gas grid operators, professional dialogue/communication management

Fields of action	Measure	Actor
R&D	Research on direct electrification, H ₂ use, new cements and concretes, innovative processes for permanent CO ₂ sequestration	Companies, universities and research institutions (including associations), and possibly also public funding bodies

1 Ausgangslage

Das Klimaabkommen von Paris hat das Ziel, die Erderwärmung, im Vergleich zur vorindustriellen Zeit, auf deutlich unter 2 Grad Celsius zu begrenzen. Die Europäische Union hat daher das Ziel, ihre Treibhausgasemissionen bis zum Jahr 2050 auf netto null zu senken, und hat zur Erreichung dieses Ziels den EU Green Deal beschlossen, der einen Aktionsplan und einen Vorschlag für ein europäisches Klimaschutzgesetz umfasst. Auf nationaler Ebene verankert das Klimaschutzgesetz²⁹ der Bundesregierung das Ziel der Treibhausgasneutralität bis 2045 mit dem Zwischenziel einer 65-prozentigen Reduktion bis 2030 gegenüber 1990.

Die Zementindustrie ist für etwa 7 % der globalen CO₂-Emissionen verantwortlich (IEA, 2021). In Deutschland ist die Zementindustrie mit einer Emissionsmenge von knapp 21 Mio. t CO₂ im Jahr 2021 für etwa 2,7 % der gesamten Treibhausgasemissionen verantwortlich (eigene Berechnung nach UBA, 2022; VDZ, 2022). Aufgrund der mit der Herstellung von Zementklinker verbundenen prozessbedingten CO₂-Entstehung gehört die Zementindustrie zu den besonders schwer zu dekarbonisierenden³⁰ Sektoren. Die Minderung der Treibhausgasemissionen in der Zementindustrie ist daher elementar für das Erreichen der Pariser Klimaziele.

Die Zielvorgaben auf globaler, europäischer und nationaler Ebene umfassen keine Aufschlüsselung auf Minderungsbeiträge verschiedener Sektoren, aus der sich ein eindeutiger CO₂-Minderungspfad der Zementindustrie ableiten ließe.³¹ Die Zementindustrie selbst hat jedoch auf globaler (GCCA, 2021), europäischer (Cembureau, 2020) und nationaler (VDZ, 2020a) Ebene Roadmaps zum Erreichen der Klimaneutralität zum Jahr bis 2050 vorgelegt. Als Zielstellung für die im Projekt zu erarbeitenden Eckpunkte einer Dekarbonisierungs-Roadmap erscheint daher das Ziel der Treibhausgasneutralität bis (spätestens) 2050 naheliegend – dies wurde im Verlauf des Projekts auch in den Diskussionen mit den Stakeholdern und Stakeholderinnen bestätigt.

Für die Dekarbonisierung der Zementindustrie stehen eine große Vielzahl an Techniken und Maßnahmen zur Verfügung, die an unterschiedlichen Stellen der Wertschöpfungskette „Betonbau“ ansetzen und unterschiedlich große Beiträge zu einer möglichst vollständigen Dekarbonisierung leisten können. Die verfügbaren technischen Maßnahmen wurden u. a. von (CSI / ECRA, 2017; Nolting et al., 2018; Ruppert et al., 2020; Schneider, 2019; Scrivener et al., 2018) aufgearbeitet und in den letzten Jahren verschiedentlich in Roadmaps für unterschiedliche Ebenen (DE, EU, global) zusammengeführt (Cembureau, 2020; Favier et al., 2018; GCCA, 2021; IEA/CSI, 2018; Material Economics, 2019; VDZ, 2020a).

Die zentralen Herausforderungen bei der Transformation der Zementindustrie erwachsen daraus, dass (aus heutiger Sicht) der Bedarf an CO₂-intensivem Klinker reduziert, jedoch nicht auf null abgesenkt, werden kann. Sowohl die möglichst weitgehende Reduktion des Klinkereinsatzes in der Wertschöpfungskette „Betonbau“ sowie der Umgang mit dem „unvermeidbar“ auch zukünftig entstehenden CO₂ erfordern Veränderungen in bzw. den Aufbau von Wertschöpfungsketten, und damit den Einbezug von Akteuren außerhalb der Zementindustrie (im engeren Sinne). An dieser Stelle setzt das hier vorgestellte Projekt an, indem technische Minderungshebel zunächst aufgearbeitet und anschließend mit Maßnahmen und umsetzungsrelevanten Akteuren in Verbindung gebracht werden.

²⁹ Gesetzesnovelle vom 31.8.2021

³⁰ Der Begriff der „Dekarbonisierung“ wird hier verwendet, um den Prozess hin zur Klimaneutralität zu bezeichnen. Streng genommen ist der Begriff nicht ideal, da Kohlenstoff, der essentieller Bestandteil von Kalkstein ist, auch in einer zukünftigen, klimaneutralen Zementindustrie eine Rolle spielen wird.

³¹ Auf nationaler Ebene sind Sektorziele für den gesamten Industriesektor bis 2040 festgelegt.

2 Grundlagen, Ziele und Vorgehen

Ziel des DekarbInd-Arbeitspakets 3 war es, in einem breit angelegten Stakeholder-Dialogprozess Eckpunkte für eine Roadmap zur Dekarbonisierung der Zementindustrie zu entwickeln. Roadmaps liefern Entscheiderinnen und Entscheidern aus Wirtschaft und Politik eine Übersicht über Zusammenhänge, Bedingungen und Möglichkeiten eines Veränderungsprozesses im Zeitverlauf. Durch eine intensive Auseinandersetzung mit zukünftigen Chancen und Risiken können die Akteure und Akteurinnen in Politik und Wirtschaft kommende Entwicklungsschritte und Verantwortlichkeiten spezifizieren. Somit dient der Roadmap-Prozess nicht nur der Strukturierung und Strategiefindung, sondern auch der Kommunikation über Entwicklungsziele und deren Rahmenbedingungen. Die Erstellung von *Eckpunkten* bedeutet hier, dass im Rahmen des Projekts keine vollständige Einigung auf eine gemeinsame Roadmap angestrebt war, sondern vor allem eine Zusammenstellung aller wesentlichen Aspekte und das Herausarbeiten zentraler Spannungsfelder und Handlungsbedarfe vorgenommen werden sollte.

Im Rahmen des Projekts wurde die Betrachtungsgrenze des Roadmappings wie folgt gewählt: das Ziel einer Dekarbonisierung der Zementindustrie in Deutschland wurde so interpretiert, dass CO₂-Emissionen der Zementindustrie in die Atmosphäre möglichst weitgehend vermieden und zudem Möglichkeiten aufgezeigt werden, um ggf. verbleibende geringfügige Restemissionen³² durch die Zement- und Betonindustrie selbst zu kompensieren – z. B. durch den Einsatz von biogenen Brennstoffen in Kombination mit CO₂-Abscheidung und dauerhafter Bindung des abgeschiedenen CO₂. Eine Kompensation von Emissionen auf anderem Wege – z. B. durch Direktabscheidung von CO₂ aus der Luft (Direct Air Capture), Aufforstung o.ä. – ist prinzipiell auch möglich, stand jedoch nicht im Fokus des Projektes. Zudem wurde konservativ von einer gleichbleibenden Bauleistung des Betonbausektors ausgegangen. Eine veränderte Baunachfrage sowie andere Bauweisen (z. B. Holzbau) könnten zwar auch zu einer Minderung des CO₂-Ausstoßes durch die Zementindustrie führen, waren jedoch nicht Teil der Betrachtungen. Als Zeithorizont für die Dekarbonisierung wurde das Jahr 2050³³ gewählt.

2.1 Grundlagen zu Roadmaps

2.1.1 Roadmap: Darstellung einer vielschichtigen Veränderung im Zeitverlauf

Für eine Roadmap existieren verschiedene Definitionen. Grundsätzlich bildet eine Roadmap eine grafische Repräsentation von Veränderungsprozessen über der Zeit. Gemeinsam ist ihnen (i) ein Zukunftsbezug (aber keine Vorhersage), (ii) die zeitliche Verknüpfung der dargestellten Aspekte und (iii) die Arbeit in Richtung auf eine Vision oder ein Ziel hin. Zudem haben Roadmaps in der Regel mehrere Ebenen (auch „Layer“ genannt). Im Unternehmenskontext sind dies häufig Technologien, Märkte und Produkte. Politisch-strategische Roadmaps bilden dagegen oft Treiber und Hindernisse für die Veränderung sowie Maßnahmen zur Steuerung der Veränderung auf das Ziel hin ab. Je nach Ausrichtung werden die Veränderungsdimensionen noch feiner unterteilt (z. B. Treiber Gesellschaft, Treiber Wirtschaft, Treiber Technologie etc.).

³² Z. B. aus unvollständiger CO₂-Abscheidung, da eine Abscheiderate von 100% technisch nicht erreichbar ist.

³³ Da das Projekt bereits im Februar 2020 startete, wurde der grobe Rahmen des Roadmappings bereits festgelegt, bevor Mitte 2021 im Rahmen der Änderung des Klimaschutzgesetzes das Vorziehen des Zieljahres für Klimaneutralität in Deutschland von 2050 auf 2045 beschlossen wurde. Aufgrund der qualitativen Natur der Projektergebnisse sind diese jedoch auch für die verschärften Zielvorgaben des geänderten Klimaschutzgesetzes unverändert von Relevanz.

2.1.2 Roadmapping: Interaktiver Stakeholder-Prozess

Die Tätigkeiten, die zum Erstellen und Aktualisieren einer solchen Roadmap anfallen, werden als Roadmapping bezeichnet (Möhrle & Isenmann, 2008). In der Regel ist der Kern des Roadmappings ein interaktiver Prozess mit Akteuren und Akteurinnen der betroffenen Bereiche. Ein entscheidender Mehrwert des Roadmappings - im Vergleich zur reinen Planerstellung - ist die Verknüpfung verschiedener Aspekte, die sonst oft nicht zusammen betrachtet werden im Zeitverlauf. Auf diese Weise können Widersprüche, Konflikte und Leerstellen identifiziert werden. Zudem werden die Akteure und Akteurinnen der verschiedenen Bereiche für diese Spannungen sensibilisiert und können ihre Strategien entsprechend anpassen.

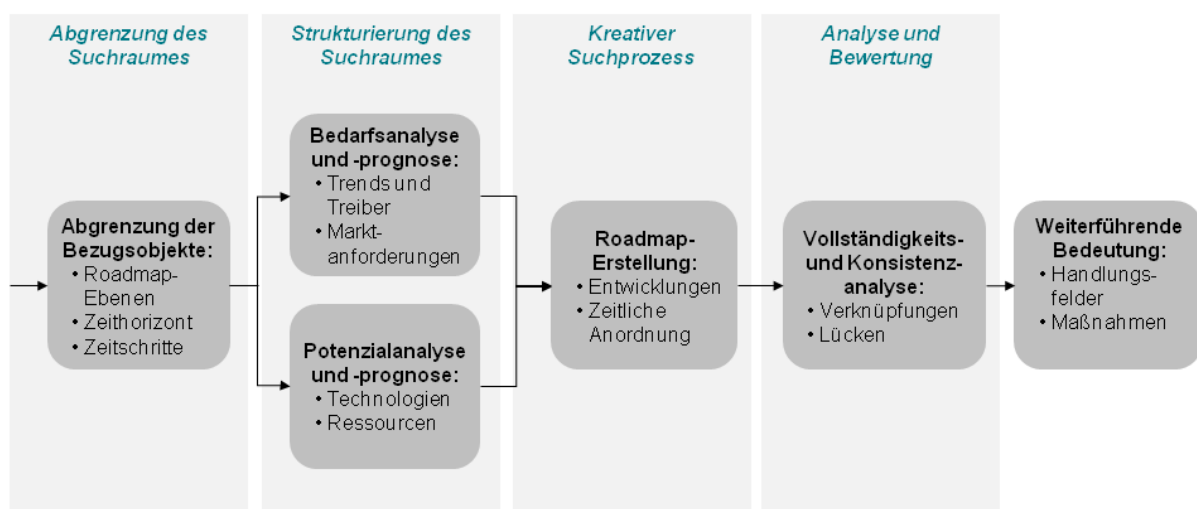
In einem Roadmapping-Prozess werden die Umfeld- und die Innenperspektive verknüpft. Dazu werden typischerweise folgende **Leitfragen** diskutiert:

- ▶ Warum müssen wir handeln? Interne und externe Treiber (z. B. Klimaschutzziele)
- ▶ Welche Rahmenbedingungen sind zu erwarten? (z. B. gesellschaftliche Bedarfe)
- ▶ Wo stehen wir jetzt? – gegenwärtige Situation
- ▶ Wohin wollen wir? – Vision / Alternative Szenarien / Strategische Ziele
- ▶ Wie kommen wir dahin? – Handlungsfelder - Regulierung, Investition, Kommunikation
- ▶ Wie sollten wir es angehen? – Ressourcen, Technologien, Akteure
- ▶ Wann soll was getan werden? – Zeitfenster und Abhängigkeiten

Die Antworten auf diese Fragen werden in einer Roadmap in einem interaktiven Prozess gemeinsam mit den Akteuren der verschiedenen Bereiche zusammengestellt und verortet.

Die nachfolgende Abbildung stellt einen typischen Roadmapping-Prozess in fünf Stufen dar. In der Regel ist der Prozess genauso wichtig wie die visuelle Darstellung als Ergebnis.

Abbildung 4: Typische Schritte beim Roadmapping



Quelle: eigene Darstellung angelehnt an Specht/Behrens 2008, Fraunhofer ISI

2.1.3 Im Projekt gewählte Roadmap-Layer

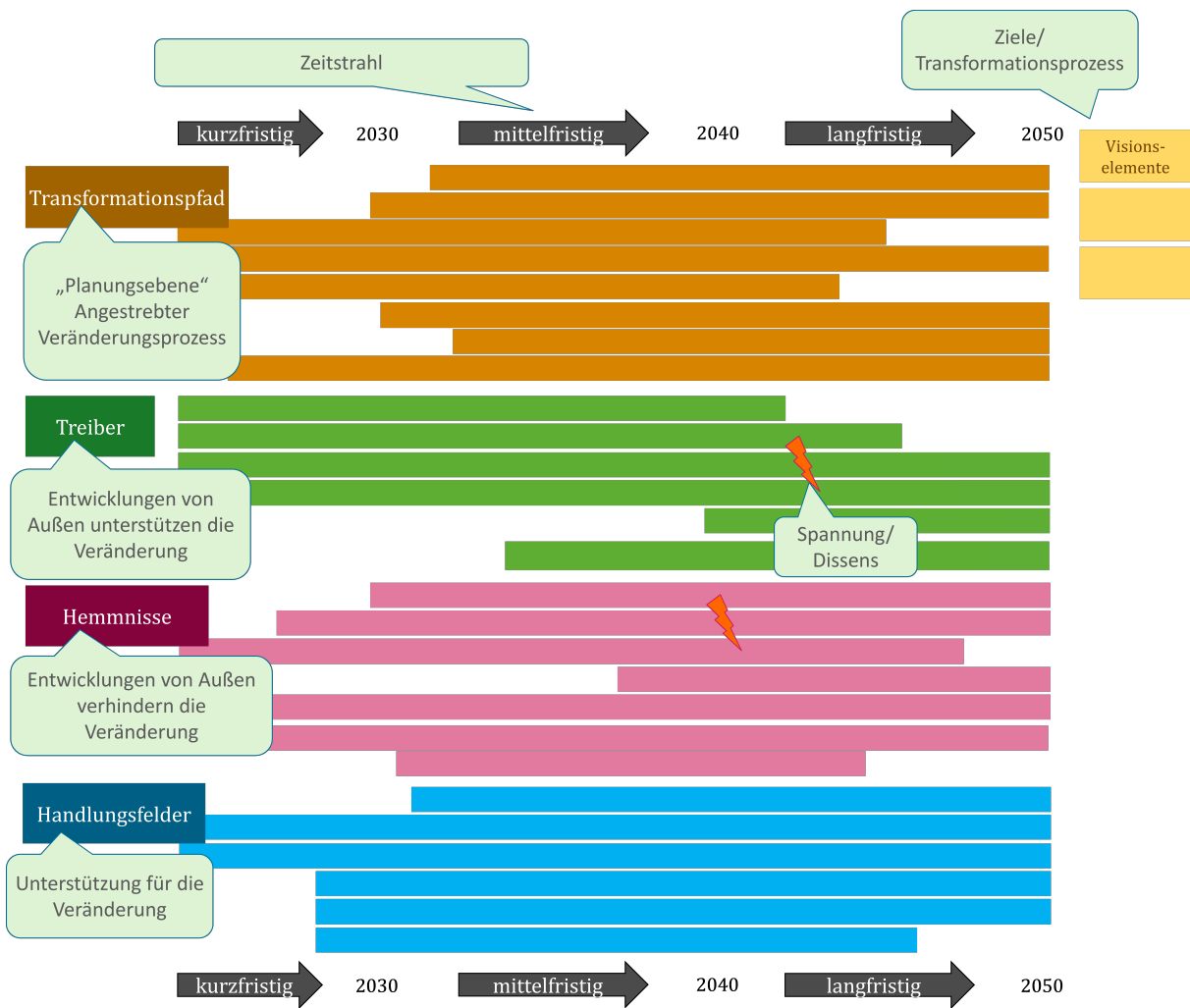
Im Rahmen des Projekts wurden in Abstimmung mit den Stakeholdern und Stakeholderinnen folgende fünf Layer für das Roadmapping gewählt:

- ▶ **Visionselemente:**
Wesentliche Charakteristika des Zielsystems 2045/50
- ▶ **Transformationspfade Markt / Technologie:**
Umsetzung und Skalierung innovativer (technischer) Ansätze im Zeitverlauf
- ▶ **Treiber:**
Externe Entwicklungen, welche die Transformation zur CO₂-Neutralität im Zementsektor begünstigen
- ▶ **Hemmnisse:**
Technische, wirtschaftliche, regulatorische und gesellschaftliche Aspekte, welche die Transformation zur CO₂-Neutralität im Zementsektor hemmen
- ▶ **Handlungsfelder / Maßnahmen:**
Ansatzpunkte, um Hemmnisse zu beseitigen bzw. abzumildern, um somit die Transformation zu ermöglichen bzw. zu beschleunigen.

Bis zum gewählten Zeithorizont für die Dekarbonisierung (Jahr 2050, s.o.) wurden drei Zeitperioden unterschieden:

- ▶ **Kurzfristig:** bis 2030
- ▶ **Mittelfristig:** 2030 bis 2040
- ▶ **Langfristig:** 2040 bis 2050

Abbildung 5: Schema der DekarbInd-Roadmap mit gewählten Layern und Zeitstrahl

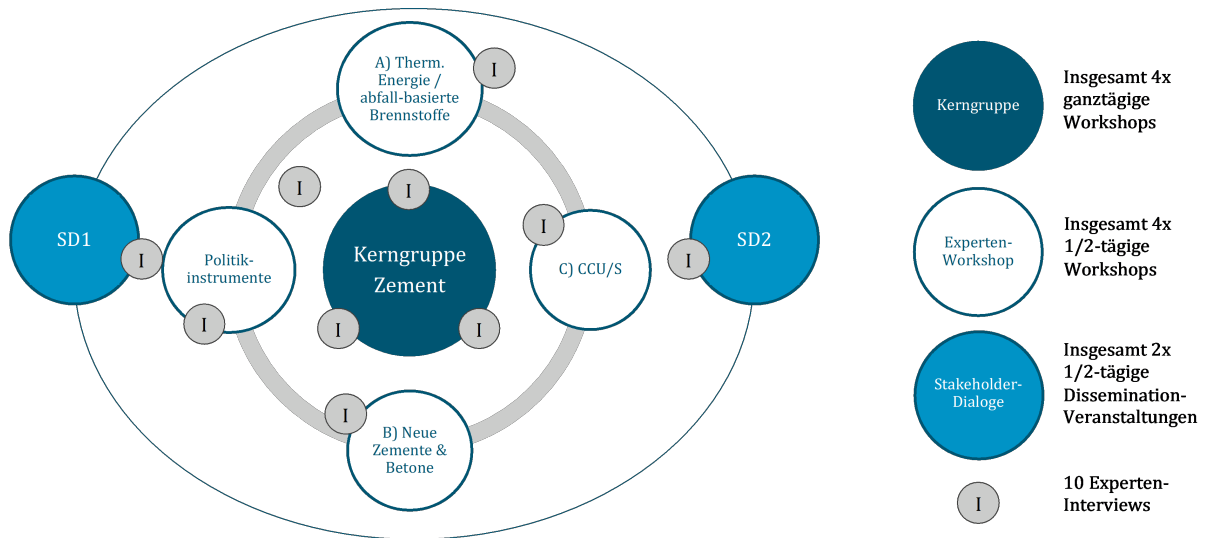


Quelle: eigene Darstellung, Wuppertal Institut

2.2 Methodisches Vorgehen zum Einbezug von Stakeholdern und Stakeholderinnen

Abbildung 6 zeigt im Überblick die methodische Vorgehensweise zur Einbindung der Stakeholder*innen und ihrer großen Breite von Fachwissen in den Roadmapping-Dialogprozess.

Abbildung 6: Einbindung des Stakeholder-Know-hows über Kerngruppe, Experten-Interviews und -Workshops sowie Stakeholderdialoge



Quelle: eigene Darstellung, Wuppertal Institut

In Tabelle 2 sind die unterschiedlichen Dialogformate sowie ihre Schwerpunktthemen und Produkte chronologisch aufgeführt.

Tabelle 2: Veranstaltungen im Rahmen des AP3 Zement

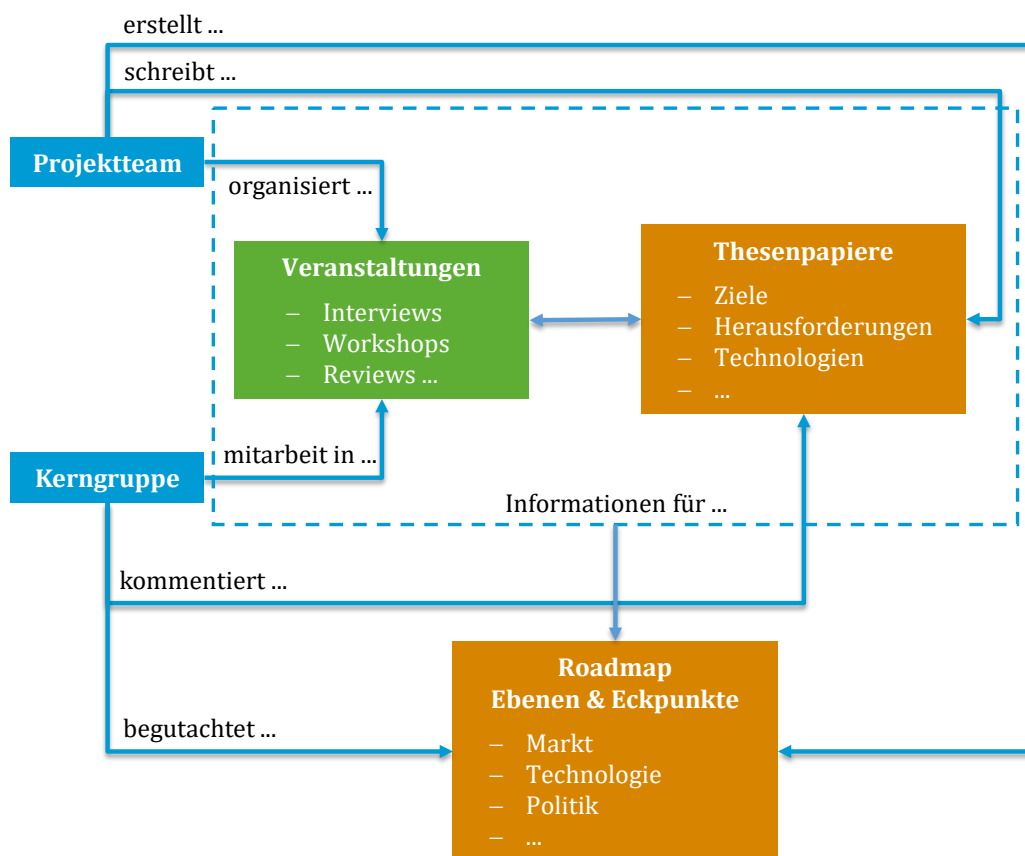
Gruppe	Datum	Thema
Kerngruppentreffen		
1. KGT	04.11.2020	Visionen und Ziele
2. KGT	15.06.2021	Technologien, Ressourcen & Transformationspfade
3. KGT	23.11.2021	Draft Roadmap & Instrumente
4. KGT	17.05.2022	Synthese Roadmap: Finale Zusammenhänge, Zeitkorridore, Instrumente & Akteure
Stakeholderdialoge		
SD 1	02.11.2021	Zwischenergebnisse DekarbInd-Projekt
SD 2	23.06.2022	Endergebnisse DekarbInd-Projekt
Vertiefungsworkshops		
VT-WS 1	10.03.2021	Alternativbrennstoffe
VT-WS 2	24.06.2021	CO ₂ -Abscheidung und Verwendung (CCUS)
VT-WS 3	28.09.2021	Neue Zemente und Betone

Gruppe	Datum	Thema
VT-WS 4	07.04.2022	(Politik-)Instrumente (Fokus NZB & CCUS)

Zu Beginn des Projektes wurde mit der sogenannten *Kerngruppe* eine zentrale Stakeholder-Gruppe gebildet, die über den gesamten Zeitraum das Projekt inhaltlich begleitet haben. Die Mitglieder der Kerngruppe setzten sich aus Vertretern und Vertreterinnen von Wirtschaft, Verbänden, Behörden und Politik, gesellschaftlichen Interessengruppen und Wissenschaft zusammen und trafen sich regelmäßig während des Projekts in den vier Kerngruppentreffen (s. Tabelle 2).

Die primäre Aufgabe der Kerngruppen war es, Visionen, Maßnahmen, Transformationspfade und Handlungsempfehlungen zu entwickeln sowie die Ergebnisse der Arbeitsschritte zu reflektieren, zu diskutieren und mit eigenem Wissen zu ergänzen. Die grundsätzliche Zusammenarbeit zwischen Projektteam und Kerngruppe ist in nachfolgender Abbildung dargestellt.

Abbildung 7: Zusammenspiel zwischen Kerngruppe und Projektteam



Quelle: eigene Darstellung, Wuppertal Institut

Gemeinsam mit der Kerngruppe wurden mehrere Vertiefungsthemen definiert, die aus Sicht der Experten und Expertinnen eine hohe Relevanz bei der Dekarbonisierung der Zementindustrie haben. Zu den Vertiefungsthemen wurden wiederum Reihen von Experten-Interviews durchgeführt, die jeweils mit einem Experten-Workshop des jeweiligen Vertiefungsthemas abgeschlossen wurden. So wurden z. B. für einen Workshop zum Thema abfallbasierte Brennstoffe gezielt Personen aus den Bereichen Abfallentsorgung und -aufbereitung eingeladen, für einen Workshop zum Thema CCUS wurden Vertreterinnen und Vertreter der Chemieindustrie und aus der Gasbranche eingeladen usw.

Tabelle 3 zeigt die Zusammensetzung der Kerngruppe für die Zementindustrie differenziert nach Gruppen und Institutionen. Insgesamt haben 33 Stakeholder*innen aus 18 Institutionen an den vier Kerngruppentreffen teilgenommen.

Tabelle 3: Zusammensetzung der Kerngruppe Zement

Stakeholdergruppe	Institution
Produzenten	CEMEX Zement GmbH, HeidelbergCement AG, Schwenk Zement KG, Spinner GmbH & Co. KG
Maschinen- und Anlagenbau	Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e. V. (VDMA)
Verbände und Fachgremien	Bundesverband der Deutschen Transportbetonindustrie e.V. (BTB), Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb), Fachvereinigung Deutscher Betonfertigteilebau (FDB) e.V., Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V. (DECHEMA), Verein Deutscher Zementwerke e.V. (VDZ)
Gesellschaftliche Interessengruppen	Bellona Europe, WWF Deutschland
Politik und Behörden	Bezirksregierung Arnsberg, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit (BMU), Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK, ehemals BMWi), Umweltbundesamt (UBA)
Wissenschaft	Bauhaus-Universität Weimar (F. A. Finger-Institut für Baustoffkunde), Kompetenzzentrum Klimaschutz in energieintensiven Industrien (KEI)

Über die gesamte Projektlaufzeit waren im Rahmen von Kerngruppentreffen, Stakeholderdialogen, Vertiefungsworkshops und Interviews mehr als 120 Stakeholder*innen in den Dialogprozess zur Dekarbonisierung der Zementindustrie eingebunden.

2.3 Kerngruppentreffen

Die Zement-Kerngruppe (s. Tabelle 3) als zentrale Stakeholder-Gruppe für den Roadmapping-Prozess tagte in insgesamt vier (virtuellen) Workshops, den sogenannten Kerngruppentreffen. In diesen Treffen und mit Hilfe des Wissens der Experten und Expertinnen dieser Gruppe wurden die in Abbildung 8 dargestellten inhaltlichen Roadmap-Leitfragen erörtert und im Nachgang entsprechende Thesenpapiere sowie Roadmap(draft)s erarbeitet oder konsolidiert. Nachfolgend werden die Inhalte der einzelnen Kerngruppentreffen näher beschrieben.

Abbildung 8: Darstellung des Roadmapping-Prozesses und ihrer spezifischen Leitfragen entlang der vier Kerngruppentreffen



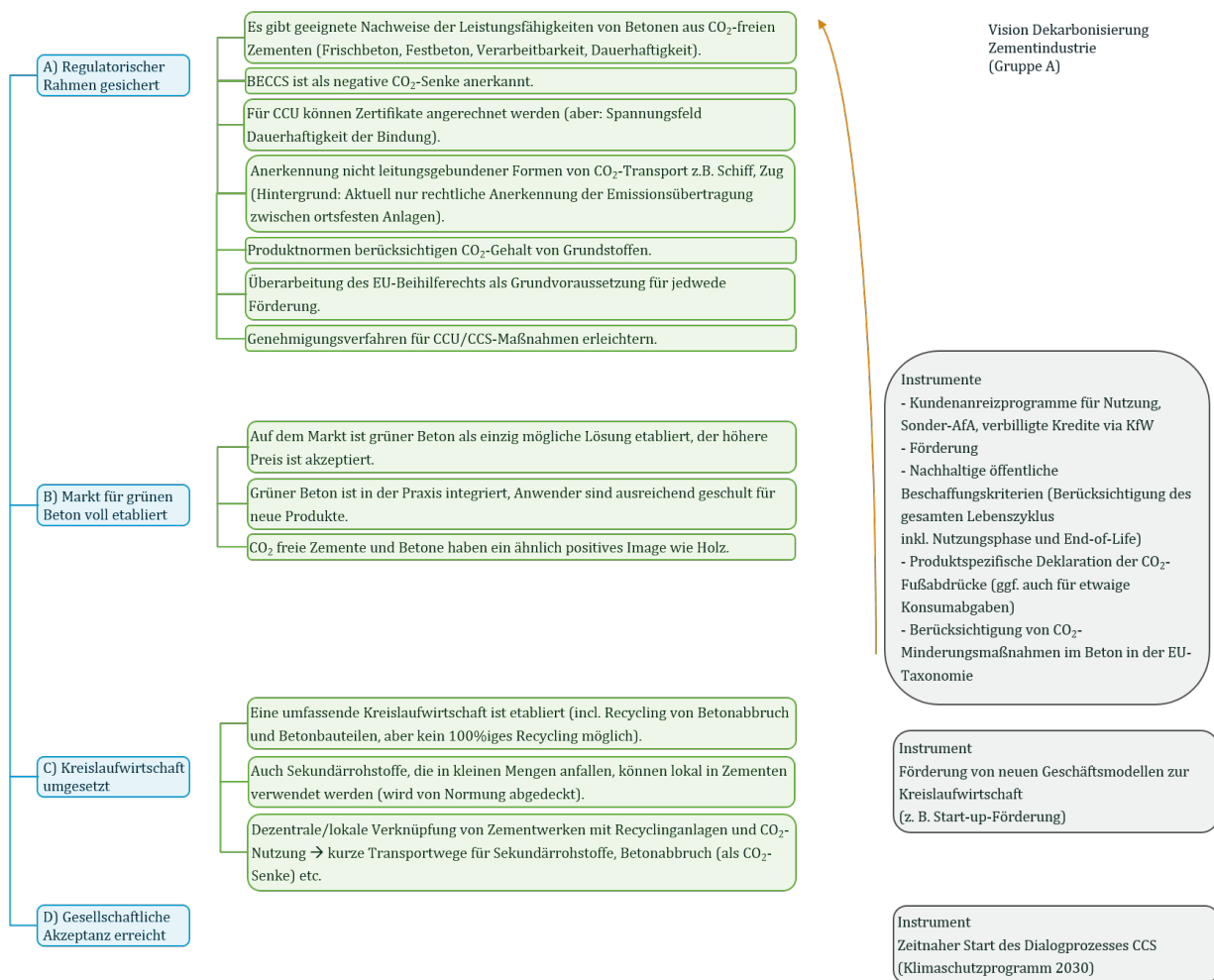
Quelle: eigene Darstellung, Wuppertal Institut

2.3.1 Kerngruppentreffen 1: Visionen und Ziele

Eine Roadmap, die den Weg zu dem Ziel einer vollständigen Dekarbonisierung der Zementindustrie bis zum Jahr 2045 aufzeigt, sollte auf einem gemeinsamen Verständnis aller beteiligter Stakeholder-Gruppen bzgl. des Dekarbonisierungsziels basieren. Im ersten, virtuellen Kerngruppentreffen (KGT 1) im November 2020 wurden daher verschiedene Perspektiven auf die Dekarbonisierung der Zementindustrie gesammelt und diskutiert. Ziel war es, geteilte Vorstellungen über wünschenswerte Aspekte und zentrale Herausforderungen herauszuarbeiten, aber auch strittige Punkte festzuhalten. Dies bildete die Grundlage für die gemeinsame Entwicklung von Eckpunkten für eine Roadmap.

Hierfür wurden Live-Umfragen, Gruppenarbeit und moderierte Diskussionen genutzt. Die positiven Zielvorstellungen wurden zunächst in einem offenen, individuellen Brainstorming und anschließend in zwei Kleingruppen erarbeitet und dann im Plenum konsolidiert. Die im ersten Kerngruppentreffen erarbeiteten Zielvorstellungen aus den Bereichen Technik, Umwelt, Wirtschaft, Politik, Markt, Arbeit, Digitalisierung und Gesellschaft wurden in Mindmaps festgehalten. Sie bilden die Basis für die abgeleiteten Thesen zu *Visionen und Ziele zur Dekarbonisierung der Zementindustrie 2045* (vgl. Kapitel 3.1)

Abbildung 9: Beispielhafter Ausschnitt aus einer Mindmap zu positiven Visionen der Zementindustrie-Dekarbonisierung aus dem KGT1



Quelle: eigene Darstellung, ISI und Wuppertal Institut

2.3.2 Kerngruppentreffen 2: Technologien

Im Juni 2021 fand das 2. Kerngruppentreffen (KGT 2) virtuell zum Thema *Techniken & Maßnahmen zur Dekarbonisierung der Zementindustrie* statt. Ziel war es, die aktuellen Entwicklungen und Einschätzungen der Experten und Expertinnen aus der Kerngruppe zum Thema Technologien für die Dekarbonisierung der Zementindustrie zusammenzutragen. Der Fokus lag dabei insbesondere auf den direkt betroffenen Stakeholdern und Stakeholderinnen, d.h. auf Personen, die die Technologien umsetzen müssen. Dies diente zum einen dazu, den aktuellen Stand in Bezug auf die technologische Transformation darzustellen und zum anderen, die Meinungen der Stakeholder*innen zu bestimmten Technologien zusammenzufassen.

Im Vorfeld des KGT 2 wurden in Abstimmung mit den Kerngruppenteilnehmer*innen und dem Auftraggeber folgende drei **Vertiefungsthemen (VT)** als die relevantesten in Bezug auf die Dekarbonisierung der Zementindustrie identifiziert und im Rahmen des KGT 2 ausführlich diskutiert:

- ▶ **VT 1: Thermische Energie (Klinkerbrennprozess)**
- ▶ **VT 2: Neue Zemente und Betonbautechniken**
- ▶ **VT 3: CO₂-Abscheidung und Nutzung oder Speicherung (CCUS)**

Als Basis für den Workshop diente ein vorab als Draft erstelltes Thesenpapier, welches zentrale Aussagen zu den Technologien kompakt zusammenfasst. In dem Workshop wurden die Vertiefungsthemen anhand folgender **Leitfragen** diskutiert:

- ▶ Auf welche Technologien sollten die Eckpunkte der Roadmap fokussieren?
- ▶ Was sind die wichtigsten Handlungsfelder bei der Umsetzung?
- ▶ Mit Ausblick auf das KGT 3:
Welche Akteure können in welchen Handlungsfeldern aktiv werden?

Um ein Stimmungsbild einzufangen, wurden in einer (nicht repräsentativen) **Umfrage** jeweils quantitativ auf einer Skala von 1 (gering) bis 5 (hoch/groß) die Einschätzungen der Akteur*innen zu der *Wirksamkeit* und den *Herausforderungen* zu den drei Vertiefungstechnologien abgefragt und grafisch ausgewertet:

- a) Unterschiedliche Energieträger im Klinkerbrennprozess,
- b) Neue Zemente und Betonbautechniken,
- c) CCUS.

Aus den sechs Fragen wurde für jedes Vertiefungsthema eine **Ergebnisgrafik** generiert, bei der die quantitativen Antworten auf die Herausforderungen (y-Achse) über die Antworten zur Wirksamkeit (x-Achse) der jeweiligen Maßnahmen aufgetragen wurden. In den Grafiken wird jeweils eine Einstufung in folgende vier Quadranten vorgenommen:

1. **Tiefhängende Früchte:**

In diesem Quadranten befinden sich Maßnahmen mit hoher Wirksamkeit und geringen Herausforderungen. Diese besonders attraktiven Maßnahmen sollten umgehend und bevorzugt umgesetzt werden.

2. **Hochhängende Früchte:**

In diesem Quadranten befinden sich Maßnahmen mit hoher Wirksamkeit, sie sind aber gleichzeitig mit hohen Herausforderungen verbunden. Diese Maßnahmen sollten aufgrund ihrer hohen Wirksamkeit im Sinne einer vollständigen Dekarbonisierung vorrangig entwickelt werden. Dazu bedarf es der Identifikation und Überwindung der (hohen) Herausforderungen z. B. durch weitere Forschung & Entwicklung sowie durch unterstützende politische Maßnahmen (Fordern und Fördern, Kommunikation...).

3. **Saure Früchte:**

In diesem Quadranten befinden sich Maßnahmen mit geringerer Wirksamkeit, die aber nichtsdestotrotz mit hohen Herausforderungen verbunden sind. Sie können ebenfalls zur Dekarbonisierung beitragen, sind aber in ihrer Wirksamkeit z. B. auf bestimmte Nischenanwendungen begrenzt. Auch hier sind Forschung und Entwicklung sowie unterstützende politische Maßnahmen erforderlich, jedoch sollte nicht der Schwerpunkt auf diese Maßnahmen gelegt werden.

4. **Fallobst:**

In diesem Quadranten befinden sich Maßnahmen mit geringerer Wirksamkeit, aber auch geringeren Herausforderungen. Sie sollten - ebenso wie auch die tiefhängenden Früchte - bevorzugt und umgehend entwickelt werden, brauchen aber ggf. eine geringe Unterstützung zur Überwindung von Barrieren bei ihrer Umsetzung.

Abbildung 10: Ergebnisgrafik zur (nicht-repräsentativen) Umfrage im Bereich Klinkerbrennprozess

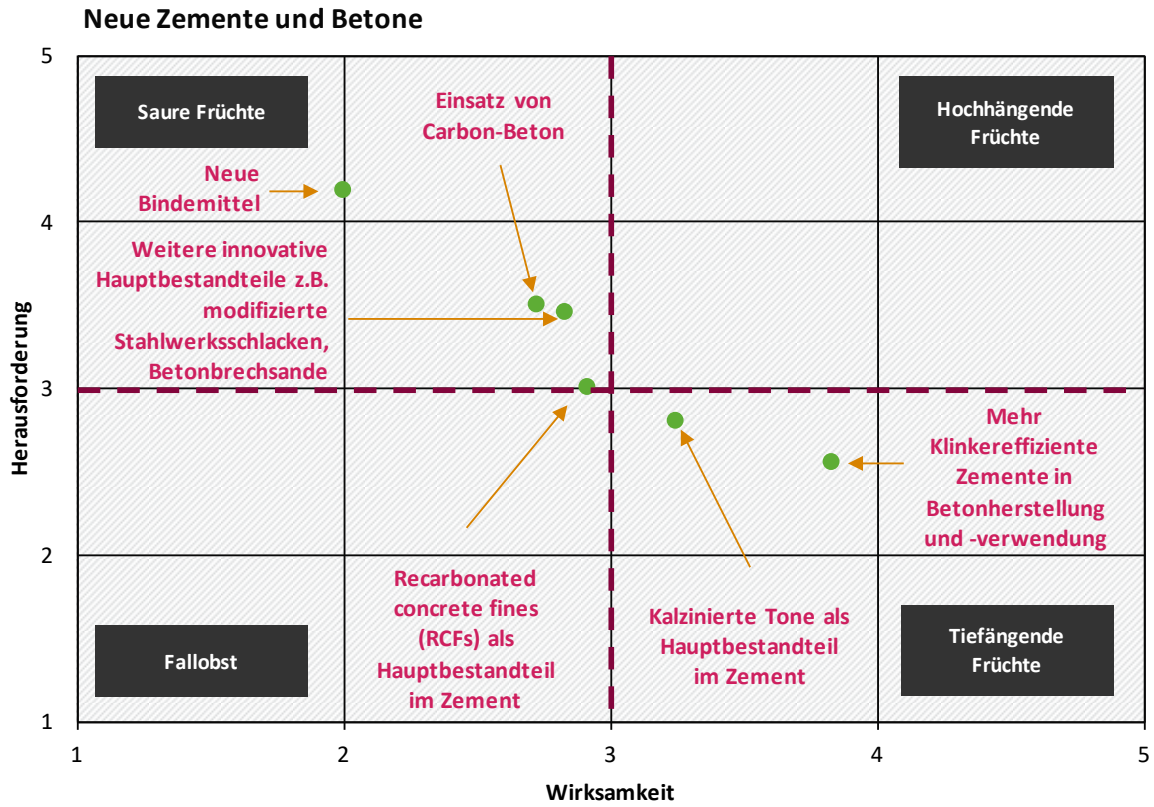


Im ersten Kerngruppentreffen wurden positive Zielvorstellungen aus unterschiedlichen Bereichen erarbeitet und in Mindmaps festgehalten.

Die verschiedenen Perspektiven zur Dekarbonisierung der Zementindustrie umfassten beispielsweise A) die Sicherung des regulatorischen Rahmens, B) die vollständige Etablierung eines Marktes für grünen Beton und C) die Umsetzung der Kreislaufwirtschaft. Zu den Instrumenten, die dabei zum Einsatz kommen könnten, zählten z.B. Kundenanreizprogramme und die Förderung neuer Geschäftsmodelle der Kreislaufwirtschaft.

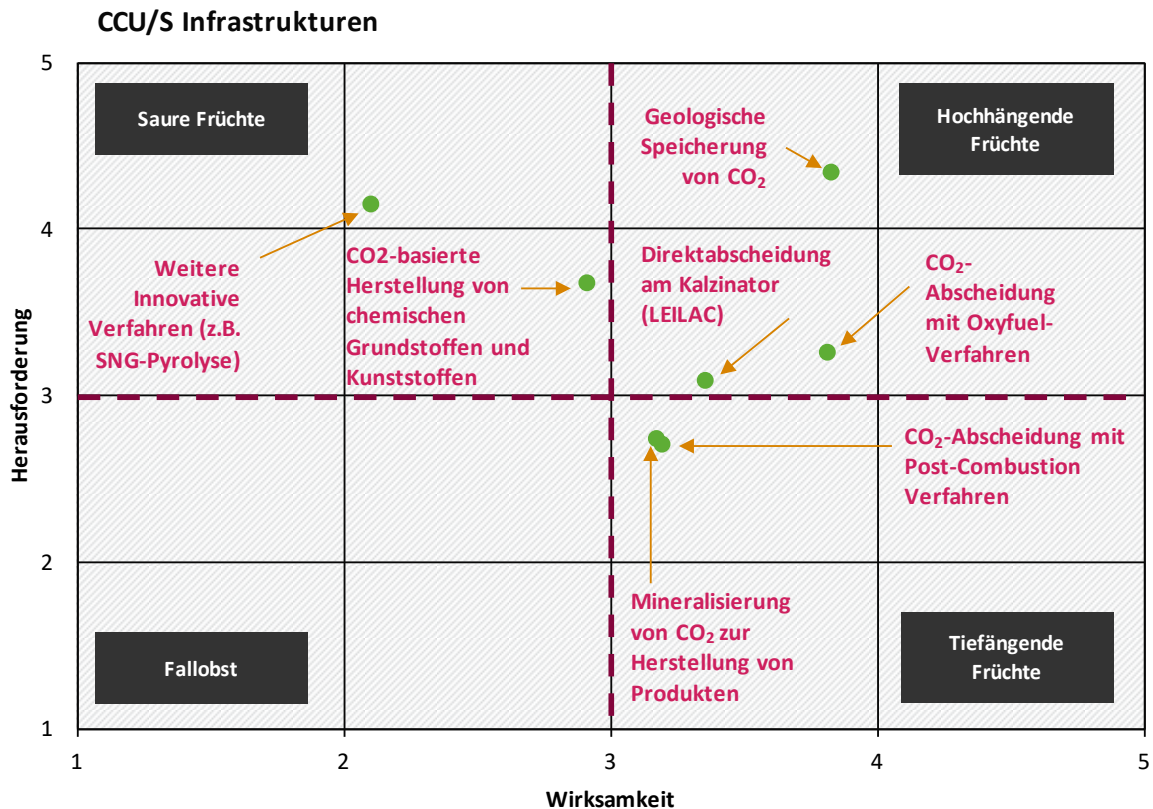
Quelle: eigene Darstellung, Wuppertal Institut

Abbildung 11: Ergebnisgrafik zur (nicht-repräsentativen) Umfrage im Bereich Neue Zemente und Betonbautechniken



Quelle: eigene Darstellung, Wuppertal Institut

Abbildung 12: Ergebnisgrafik zur (nicht-repräsentativen) Umfrage im Bereich CCUS und Infrastrukturen



Quelle: eigene Darstellung, Wuppertal Institut

2.3.3 Kerngruppentreffen 3: Roadmap (Teil 1)

Im November 2021 fand das 3. Kerngruppentreffen (KGT 3) virtuell zum Thema *Eckpunkte einer Roadmap (Teil 1)* statt. Hier wurde mit Hilfe eines Miro-Boards gemeinsam an zuvor vom Projektteam auf Basis der bisherigen Arbeiten im DekarbInd-Projekt erstellten Entwürfen der drei Detail-Roadmaps A) *Thermische Energie*, B) *Neue Zemente & Betonbautechniken* und C) *CCUS* weitergearbeitet. Ziel war es, die durch das Projektteam erstellten Roadmap-Entwürfe vorzustellen und das Feedback der Akteure festzuhalten. Zentrale Aspekte bei der Diskussion der Roadmaps waren die *Layer* (s. Kapitel 2.1)

- ▶ Transformationspfade (Technologien & Markt),
- ▶ Treiber,
- ▶ Hemmnisse,
- ▶ Handlungsfelder/Maßnahmen (für die Umsetzung) sowie

ihre Wechselwirkungen untereinander (vgl. Abbildung 5 in Kapitel 2.1.3).

Es ging also darum, die zentralen Zusammenhänge und Stellschrauben, erste Zeitkorridore für Handlungsfelder sowie Wechselwirkungen mit Treibern, Hemmnissen und Maßnahmen zu identifizieren durch:

- ▶ die Bestimmung von Technologiepfaden durch das Herausarbeiten zentraler Minderungshebel,
- ▶ das Herausarbeiten zentraler Hemmnisse für die Umsetzung der technischen Maßnahmen sowie
- ▶ die Auswahl zentraler Handlungsfelder.

Dabei wurden die Rückmeldungen der Kerngruppenteilnehmer hinsichtlich Konsens, Dissens, Begründungen, Lücken und Erweiterungen festgehalten und bei der Überarbeitung der Roadmaps als Input für das nächste, vierte Kerngruppentreffen berücksichtigt.

2.3.4 Kerngruppentreffen 4: Roadmap (Teil 2)

In dem vierten Kerngruppentreffen (KGT4) im Mai 2022 wurden die überarbeiteten grafischen Roadmap-Drafts den Kerngruppenteilnehmenden vorgestellt. Neben den Anpassungen auf Basis des dritten KGT 3 (s.o.) flossen in die Überarbeitung auch weitere Erkenntnisse aus den Interviews und Workshops zu den Vertiefungsthemen (insbesondere zu den Politikinstrumenten) sowie aus eigenen Recherchen des Projektteams ein. Ziel des KGT4 war daher auch, gemeinsam mit den Akteuren die identifizierten (Politik-)Instrumente in Bezug zu den Roadmaps und deren Handlungsfelder zu setzen.

Die Inhalte wurden wieder entlang der drei Haupt-Dekarbonisierungsfelder

A) *Klinkerbrennprozess*, B) *Neue Zemente und Betonbautechniken* und C) *CCUS* erarbeitet. Der vorausgegangene Politikinstrumente-Workshop vom April 2022 fokussierte allerdings auf die beiden Vertiefungsthemen B) und C). Deren als besonders relevant identifizierten Handlungsfelder wurden im KGT4 vorgestellt und anhand von Leitfragen diskutiert:

B) Zentrale Handlungsfelder für Neue Zemente und Betonbautechniken:

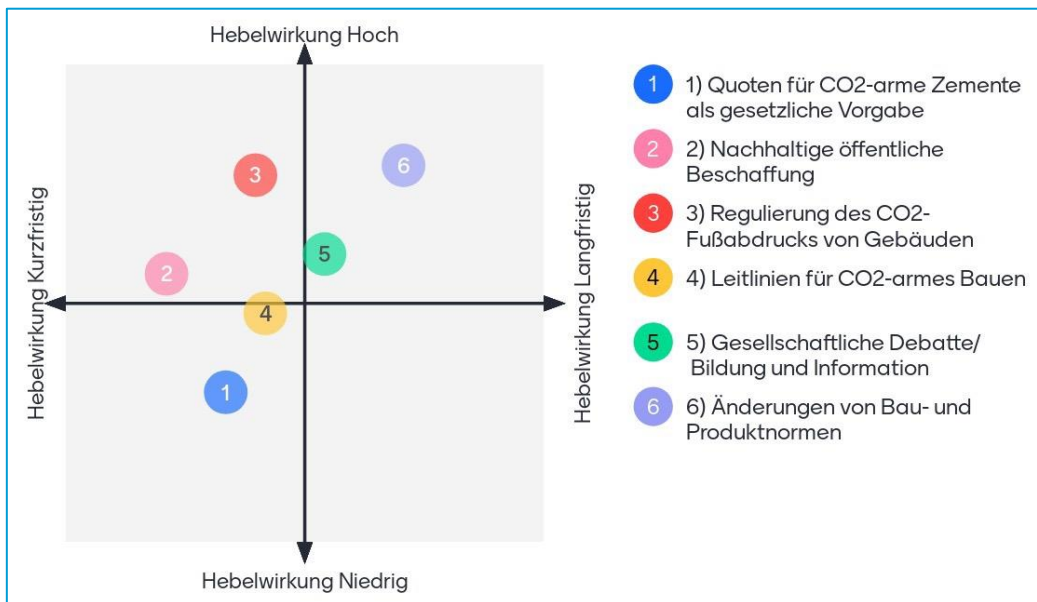
- ▶ Schaffung von Märkten / Fördern von CO₂-effizienten Bauweisen (Quoten für CO₂-arme Zemente, Nachhaltige öffentliche Beschaffung)
- ▶ Integration von neuen Zementen und Bautechniken in die Baupraxis (Änderungen von Bau- und Produktnormen, CO₂-Fußabdruck von Gebäuden, Bildung und Information)

C) Zentrale Handlungsfelder für CO₂-Infrastrukturen

- ▶ Rechtliche Rahmenbedingungen für CO₂-Infrastrukturen
- ▶ Planungs- und Entwicklungsprozess einer CO₂-Infrastruktur
- ▶ Zugangsvoraussetzungen zur Infrastruktur
- ▶ Gesellschaftlicher Diskurs und Beteiligungsprozesse

Für das Themenfeld *Neue Zemente und Betonbautechniken* wurde für ein Stimmungsbild in Form einer (nicht repräsentativen) Umfrage die Einschätzung der Akteure zur Hebelwirkung (niedrig bis hoch) und Geschwindigkeit einer möglichen Umsetzung (kurz- bis langfristig) von sechs als relevant identifizierten Instrumenten abgefragt. Das Ergebnis der Umfrage ist in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** dargestellt. Der Änderung von Bau- und Produktnormen (Nr. 6) sowie der Regulierung des CO₂-Fußabdruckes (Nr. 3) wurde dabei eine besonders hohe Hebelwirkung zugeordnet, wobei aus Sicht der Akteure letztere eher kurz- bis mittelfristig und erstere eher langfristig erfolgversprechend scheint.

Abbildung 13: Ergebnis der (nicht repräsentativen) Umfrage zur Hebelwirkung verschiedener Instrumente zur Einführung neuer Zemente und Betonbautechniken in KGT4



Quelle: eigene Darstellung, Wuppertal Institut

2.4 Interviews und Vertiefungsworkshops

Im Rahmen des Projekts wurden insgesamt zehn Experten-Interviews und vier Vertiefungsworkshops durchgeführt (s. Tabelle 4). Die Interviews wurden in Form von Video-Konferenzen als semi-strukturierte Interviews geführt, wobei als inhaltlicher Input jeweils kurze PowerPoint-Präsentationen mit Leitfragen und Diskussionsgrundlagen erstellt werden. Die Interviewreihen wurden jeweils mit einem Vertiefungsworkshop abgeschlossen, in denen die Ergebnisse aus den persönlichen Interviews auf Basis von Impulsvorträgen in einem größeren Kreis gespiegelt und diskutiert wurden. Zu den Interviews als auch zu den Workshops wurden sowohl Experten und Expertinnen aus der Kerngruppe als auch externe Experten und Expertinnen eingeladen.

Tabelle 4: Liste der Interviews und Vertiefungsworkshops

Vertiefungsthema	Interviewpartner bzw. Workshop	Inhaltliche Schwerpunkte
Klinkerbrennprozess	CEMEX Zement GmbH	Maßnahmen zur Dekarbonisierung (Klinkerbrennprozess & übergreifend)
	ABS-Workshop (März 2021)	Abfallbasierte Brennstoffe: Verfügbarkeit und Einsetzbarkeit (Thesenpapier 3)
CCUS & Infrastrukturen	Universität Kassel Center for Environmental Systems Research (CESR)	CCU in der chemischen Industrie
	HeidelbergCement AG	RCFs, Fortera-Prozess, Aushärtung unter CO ₂ -Atmosphäre, Carbon Capture
	CEMEX Zement GmbH	CCUS
	CCUS-Workshop (Juni 2021)	CCUS & Infrastrukturen (Thesenpapier 4)

Vertiefungsthema	Interviewpartner bzw. Workshop	Inhaltliche Schwerpunkte
Neue Zemente & Betonbautechniken	Bauhaus-Universität Weimar (F. A. Finger-Institut für Baustoffkunde)	Neue Zemente, neue Bindemittel, alternative Rohstoffe
	Bundesverband der Deutschen Transportbetonindustrie e.V. (BTB)	Dekarbonisierungspotenziale im Transportbeton
	Fachvereinigung Deutscher Betonfertigteilebau (FDB) e.V.	Dekarbonisierungspotenziale im Fertigbeton
	NZB-Workshop (Sep. 2021)	Potenziale & Herausforderungen für Neue Zemente & Betonbautechniken (Thesenpapier 5)
(Politik-)Instrumente / Markt / Akzeptanz	Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMKW)	Neue CCUS-Infrastrukturen im Kontext der Zementindustrie
	Der Verein Deutscher Zementwerke e.V. (VDZ)	Märkte für Neue Zemente & Betone sowie CCUS-Infrastrukturen im Kontext der Zementindustrie
	Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb)	Märkte für Neue Zemente & Betone
	Politik-Workshop (April 2022)	(Politik-)Instrumente für Neue Zemente & Betone und für CCUS (Thesenpapier 6)

2.4.1 Workshop Abfallbasierte Brennstoffe (ABS)

Am 10. März 2021 fand der halbtägige (virtuelle) Workshop *Zukünftige Verfügbarkeit und Einsetzbarkeit von alternativen Brennstoffen in der Zementindustrie* statt. Die insgesamt 16 Teilnehmenden kamen aus folgenden Akteursgruppen: Zementhersteller (4), Entsorgungsunternehmen (3), Unternehmensverbände (1), Beratungsunternehmen (1), Wissenschaft (2), Politik & Behörden (1) sowie Projektkonsortium (3 Wuppertal Institut und 1 Fraunhofer ISI).

Ziel des Workshops war es, ein besseres Verständnis der zukünftigen Potenziale (Ausblick auf Zeitraum 2030 bis 2050) zum Einsatz von abfallbasierten Brennstoffen in der Zementindustrie unter Berücksichtigung von Verfügbarkeit, Einsetzbarkeit und Rechtsrahmen zu gewinnen. Als Ausgangspunkt für die Diskussion zur zukünftigen Verfügbarkeit und Einsetzbarkeit einzelner Abfallfraktionen diente eine zu Beginn des Workshops als Stimmungsbild mit den Teilnehmenden durchgeführte Mentimeter-Umfrage sowie je Abfallfraktion ein kurzer Impulsvortrag des Wuppertal Instituts. Aspekte wie Marktverfügbarkeit, Aufbereitungsaufwand, Wechselwirkungen im Verbrennungsprozess, Auswirkungen auf Klinkerchemie sowie technische Hindernisse wurden für einzelne Abfallfraktionen diskutiert.

Von den Organisatoren des Workshops wurde ein Protokoll erstellt, welches zusammen mit den Umfrageergebnissen die Basis für die Ableitung der 3.2.2.1 dargestellten Thesen bildet. Das Thesenpapier *Zukünftigen Verfügbarkeit und Einsetzbarkeit von alternativen Brennstoffen in der Zementindustrie* wurde vor Finalisierung den Teilnehmenden des Workshops zur Kommentierung vorgelegt.

2.4.2 Workshop Neue Zemente & Betonbautechniken (NZB)

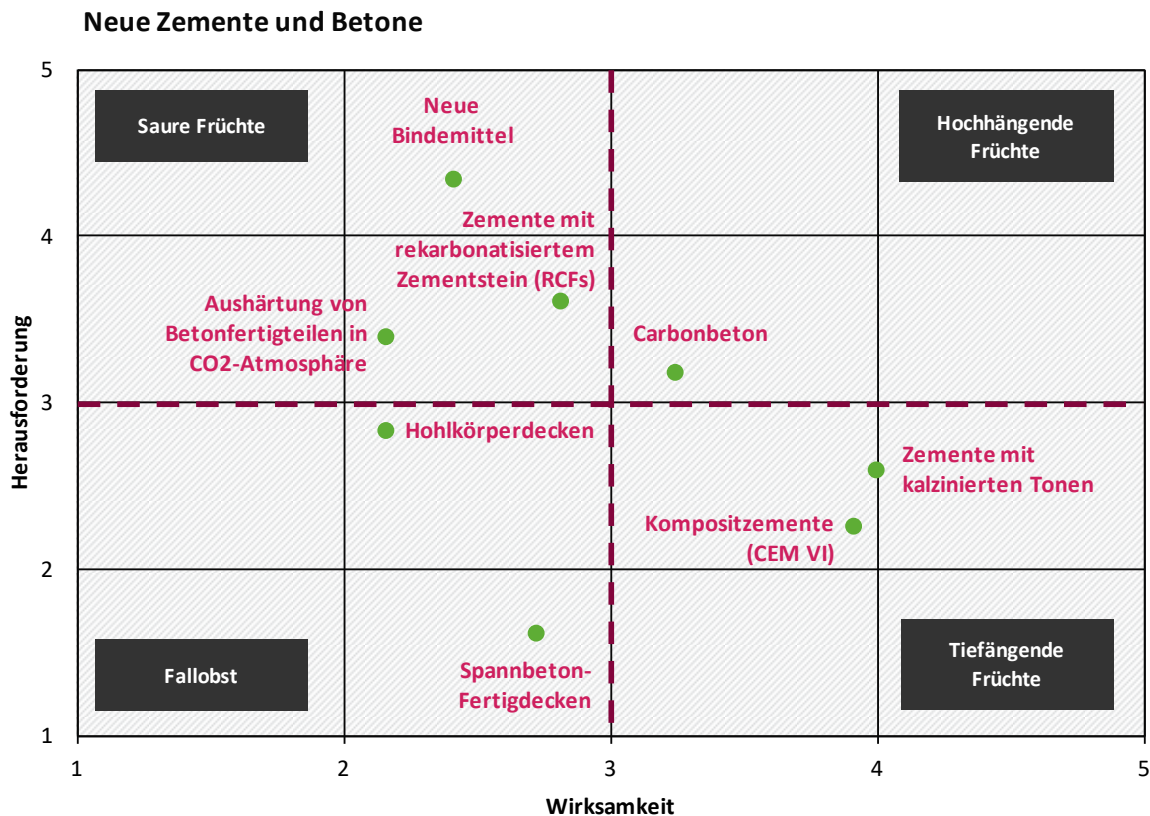
Der virtuelle Workshop zu *Neuen Zementen und Betonbautechniken* fand am 28. September 2021 mit 19 Teilnehmenden aus den Bereichen Zementherstellung (3), Maschinen- und Anlagenbau

(2), Unternehmensverbände (7), Wissenschaft (3) sowie Behörden und Politik (1) und dem Projektteam (3) statt. Ziel war auch hier die Spiegelung der bisherigen Recherchen und Ergebnisse aus den Interviews in einer größeren Runde an Experten und Expertinnen durch Validierung und Aufnehmen weiterer Sichtweisen, Klärung offener Fragen und Diskussion unterschiedlicher Einschätzungen zu bestimmten Minderungsansätzen. Es fand eine vertiefte Reflexion der bautechnischen Anforderungen an Betone und deren Implikationen für die Verwendung neuer Zemente und Betone statt. Zudem wurden erste Einschätzungen zu Politikinstrumenten im Bereich neue Zemente/Betone eingeholt.

In einer Umfrage wurden jeweils quantitativ auf einer Skala von 1 (gering) bis 5 (hoch/groß) die Einschätzungen der Akteur*innen zu der *Wirksamkeit* und den *Herausforderungen* zu den folgenden CO₂-Minderungsansätzen aus dem Bereich neue Zemente/Betone abgefragt und grafisch ausgewertet:

- ▶ Zemente mit kalzinierten Tonen
- ▶ Zemente mit rekarbonatisiertem Zementstein (RCFs)
- ▶ Komposit-Zemente (CEM VI)
- ▶ Neue Bindemittel
- ▶ Aushärtung von Betonfertigteilen in CO₂-Atmosphäre
- ▶ Hohlkörperdecken
- ▶ Carbonbeton
- ▶ Spannbeton-Fertigdecken

Aus den Antworten wurde eine Ergebnisgrafik (Abbildung 14) generiert, bei der die quantitativen Antworten auf die Herausforderungen (y-Achse) über die Antworten zur Wirksamkeit (x-Achse) der jeweiligen Maßnahmen aufgetragen wurden. Die in der Grafik vorgenommene Einteilung in die vier Quadranten „Tiefhängende Früchte“, „Hochhängende Früchte“, „Saure Früchte“ und „Fallobst“ wurde bereits in Kapitel 2.3.2 beschrieben.

Abbildung 14: Ergebnisgrafik zur (nicht repräsentativen) Umfrage im Bereich Neue Zemente und Betonbautechniken

Quelle: eigene Darstellung, Wuppertal Institut

Von den Organisatoren des Workshops wurde ein Protokoll und ein Thesenpapier erstellt, welches zusammen mit den Umfrageergebnissen die Basis für die Ableitung der in Kapitel 3.2.3 dargestellten Thesen bildet. Das Thesenpapier *CO₂-Minderungsoptionen durch neue Zemente, neue Bindemittel und neue Ansätze im Betonbau* wurde vor Finalisierung den Teilnehmenden des Workshops zur Kommentierung vorgelegt.

2.4.3 Workshop CCUS & Infrastrukturen

Am 24. Juni 2021 fand ein halbtägiger virtueller Experten-Workshop statt mit insgesamt 15 Stakeholder*innen aus den Bereichen Zementherstellung (3), chemische Industrie (3), Gas-Infrastruktur (1), Wissenschaft (2) sowie Behörden und Politik (2) und dem Projektteam (4). Im Workshop diskutierten die Teilnehmenden basierend auf Impulsvorträgen des Projektteams sowie entlang von Leitfragen, was mit unvermeidbarem CO₂ aus der Zementindustrie geschehen kann. Hier wurden folgende Ansätze zur Diskussion gestellt:

1. CO₂-Nutzung durch Karbonatisierung (Baustoffe, weitere)
2. Sonstige innovative Ansätze (z. B. Auftrennung von CO₂ in Carbon Black und Sauerstoff)
3. Geologische Speicherung
4. CO₂-Nutzung für die Herstellung von chemischen Grundstoffen und Kraftstoffen

Nach Impulsvorträgen zu CO₂-Transportoptionen und zu modellhaft ausgewählten Quellen-Senken-Beziehungen wurden Transportoptionen, Relationen und Entscheidungsfaktoren sowie logistische Aspekte und die Identifikation zentraler Akteure gemeinsam diskutiert. Ziel war eine

integrierte Betrachtung von Kohlenstoffwirtschaft und Klimaneutralität und die Diskussion modellhafter Ansätze und Zukunftsbilder sowie von Infrastrukturaspekten einer CO₂-Wirtschaft inklusive räumlicher Aspekte.

Auf Basis der durchgeführten Recherchen, Interviews sowie der Diskussionen während des CCUS-Workshops wurde wieder ein Thesenpapier erstellt und den Teilnehmerinnen und Teilnehmern des Workshops sowie den interviewten Expertinnen und Experten zur Kommentierung vorgelegt. Die zentralen Erkenntnisse daraus werden in Kapitel 3.2.4 behandelt.

2.4.4 Workshop (Politik-)Instrumente / Markt / Akzeptanz

Am 7. April 2022 wurde ein halbtägiger, virtueller Workshop zum Vertiefungsthema (Politik-)Instrumente mit insgesamt 21 Expertinnen und Experten (zuzüglich dem Projektteam aus 4 Mitarbeiter*innen des Wuppertal Instituts) aus den Bereichen Zementherstellung und -Verarbeitung (4), chemische Industrie (1), Verbände (7), Nichtregierungsorganisation (NGO) (1), Consulting (2), Wissenschaft (3) sowie Behörden und Politik (3) durchgeführt. Der Workshop fokussierte inhaltlich wieder auf die beiden technischen Handlungsfelder *Märkte für neue Zemente und Betonbautechniken (NZZ)* sowie *CCUS-Infrastrukturen* und war dementsprechend zweigeteilt:

In der ersten Hälfte des Workshops wurden mit insgesamt 13 externen Stakeholder*innen (Politik-)Instrumente³⁴ für neue Zemente und Betone diskutiert. Als zentrale Handlungsfelder wurden folgende identifiziert:

- ▶ die Schaffung von Märkten und Förderung von CO₂-effizienten Bauweisen sowie
- ▶ die Integration von neuen Zementen und Bautechniken in die Baupraxis.

In der zweiten Hälfte nahmen insgesamt 17 Stakeholder*innen an einer Diskussion zu (Politik-)Instrumenten im Bereich CCUS entlang der Themen CO₂-Abscheidung, Verbleib des CO₂ (Nutzung durch Karbonatisierung, durch Herstellung von chemischen Grundstoffen und Kraftstoffen sowie durch Geologische Speicherung) und Infrastrukturerfordernisse. Als zentrale Handlungsfelder wurden hier folgende identifiziert:

- ▶ Rechtliche Rahmenbedingungen für CO₂-Infrastrukturen,
- ▶ Planungs- und Entwicklungsprozess für CO₂-Infrastrukturen sowie
- ▶ Gesellschaftlicher Diskurs und Beteiligungsprozesse.

Ziele in beiden Workshopteilen waren jeweils die Spiegelung der bisherigen Recherche und Ergebnisse aus den Interviews in einer größeren Expertenrunde, die Klärung offener Fragen und die Diskussion unterschiedlicher Einschätzungen zu bestimmten (Politik-)Ansätzen in den beiden genannten Bereichen sowie eine vertiefte Reflexion der Vor- und Nachteile verschiedener (Politik-)Instrumente und Wechselwirkungen zwischen den Instrumenten. Die übergreifende Frage lautete dabei: Welche kurz- und mittelfristigen Instrumente sind nötig, um Dekarbonisierungstechnologien in der (gesamten Wertschöpfungskette der) Zementindustrie umzusetzen? Dabei wurde der Fokus auf Instrumente gelegt, welche die Akteur*innen in Deutschland realisieren können, z. B. durch formale Planung und hoheitliche Regulierung, durch öffentlich-private Aushandlung und Kooperation oder durch zivilgesellschaftliche Beteiligung und Dialog.

³⁴ Unter dem hier verwendeten Begriff *(Politik-)Instrumente* sind jeweils Politikinstrumente und Stakeholderaktivitäten zu verstehen.

Im Nachgang wurde wieder ein Thesenpapier erstellt und zur Kommentierung an die Workshop-Teilnehmenden versandt. Das Thesenpapier *Politikinstrumente und Stakeholderaktivitäten für eine Dekarbonisierung der Zementindustrie (Fokus: Neue Zemente und Betonbautechniken sowie CCUS-Infrastrukturen)* wird in seinen zentralen Ergebnissen in Kapitel 6 vorgestellt.

2.5 Stakeholderdialoge

Etwa zur Mitte und gegen Ende des Projektes DekarbInd wurde jeweils ein sogenannter Stakeholderdialog (SD) durchgeführt, um die Zwischen- bzw. Endergebnisse einem breiteren Kreis von Stakeholdern und Stakeholderinnen vorzustellen und mit ihnen zu diskutieren. Neben dem Ziel der Wissensverbreitung (Dissemination) sollten diese Dialoge explizit auch eine zusätzliche Möglichkeit schaffen zur Vernetzung der Teilnehmenden und zur Erweiterung des Teilnehmerkreises der Kerngruppe auf weitere Akteure aus der Zement- und Betonindustrie, Gaswirtschaft, Chemieindustrie, Verbände & Gewerkschaften, NGOs, Wissenschaft und Behörden. Diese Vernetzung ist aus Sicht der Autoren und auch des UBA unbedingt erforderlich, um die Dekarbonisierung in der Zementindustrie akteursorientiert und entlang der Wertschöpfungskette voranzubringen.

2.5.1 Erster Stakeholderdialog (SD1)

Der erste Stakeholderdialog fand am 02.11.2021 (virtuell) mit 40 Teilnehmenden (zuzüglich dem Projektteam aus drei Mitarbeiter*innen des Wuppertal Instituts und zwei des Fraunhofer ISI) statt, die aus den Bereichen Zementherstellung (10), Maschinen- und Anlagenbau (2), Verbände (6), Gesellschaftliche Interessengruppe (4), Politik und Behörden (12) sowie Wissenschaft (6) zusammenkamen. In Impulsvorträgen wurden die bis dato behandelten CO₂-Minderungsansätze im Bereich *Bereitstellung thermischer Energie bei der Klinkerproduktion, Neue Zemente und Betonbautechniken* und *CCUS & Infrastrukturen* vorgestellt und anschließend entlang von Leitfragen diskutiert.

2.5.2 Zweiter Stakeholderdialog (SD2)

Der zweite Stakeholderdialog Zement fand am 23.06.2022 in Berlin und - aufgrund der Coronapandemie in den Jahren 2020 bis 2022 - als erste und einzige Veranstaltung im Rahmen des DekarbInd-Projektes in Präsenz statt. Hier wurden in einer zweitägigen Veranstaltung am ersten Tag (23. Juni) die finalen Ergebnisse zur Bestimmung von *Eckpunkten einer Roadmap zur Dekarbonisierung der Zementindustrie* (AP3) und am zweiten Tag (24. Juni) zur *Dekarbonisierung der Stahlindustrie* (AP2) vorgestellt. Insgesamt kamen in dem Zement-Stakeholderdialog 18 Akteur*innen (zuzüglich dem Projektteam aus drei Mitarbeiter*innen des Wuppertal Instituts und zwei des Fraunhofer ISI) aus den Bereichen Zementherstellung (4), Maschinen- und Anlagenbau (1), Verbände (4), Gesellschaftliche Interessengruppe (1), Politik und Behörden (6) sowie Wissenschaft (1) und Gasbranche (1) zusammen.

In einem Überblicksvortrag wurden zunächst die Optionen zur CO₂-Minderung bei der Zementklinkerherstellung und entlang der Wertschöpfungskette, die Eckpunkte einer Gesamt-Roadmap und die Einführung in Instrumente & Maßnahmen vorgestellt. In einem Deep Dive wurden dann die Detailergebnisse zu Instrumenten und zu den Teil-Roadmaps *A) Thermische Energie B) Neue Zemente & Betonbautechniken* und *C) CCUS* erläutert und gemeinsam diskutiert.

3 Ergebnisse aus Stakeholderprozessen zu Layern der Roadmap

3.1 Visionen und Ziele

Wie in Kapitel 2.3.1 beschrieben, wurden im ersten Kerngruppentreffen (KGT1) positive Zielvorstellungen einer vollständig dekarbonisierten Zementindustrie im Jahr 2045 erhoben und diskutiert. Die Teilnehmenden erarbeiteten Visionsaussagen zu einer zukünftig klimaneutralen Zementindustrie unter Berücksichtigung der Dimensionen Wirtschaft, Politik, Digitalisierung, Technologie, Forschung & Entwicklung, Globale Entwicklungen (Markt, u.a.), Gesellschaft, soziale Verantwortung & Werte, Arbeitsmarkt & Mitarbeiter sowie Klima & Umwelt. Ziel war es, geteilte Vorstellungen über wünschenswerte Aspekte und zentrale Herausforderungen herauszuarbeiten, aber auch strittige Punkte festzuhalten. Dies bildete die Grundlage für die gemeinsame Entwicklung von Eckpunkten für eine Roadmap (s. Kapitel 4 und 5).

Auf dieser Basis erarbeitete das Autorenteam ein Thesenpapier „*Visionen und Ziele zur Dekarbonisierung der Zementindustrie 2045*“ und verdichtete dessen zentrale Aussagen im weiteren Projektverlauf zu den nachfolgenden Thesen. Die Kerngruppenteilnehmenden hatten die Möglichkeit, den Draft des Thesenpapiers zu kommentieren, jedoch geben nicht notwendigerweise alle der folgenden Thesen die Sichtweise aller Teilnehmenden wieder.

Klimaneutralität der Zement- und Betonherstellung ist möglich

Grundsätzlich halten die Teilnehmenden des KGT1 die langfristige Klimaneutralität der Zement- und Betonherstellung für technisch machbar. In der Zement- und Betonindustrie gibt es jedoch keine „Königstechnologie“, sondern vielmehr einen Strauß an sich ergänzenden Technologieoptionen von erneuerbaren Energien über neue Zemente und Bindemittel, effizienterem Einsatz von Klinker im Zement sowie Zement im Beton und Beton im Bau bis hin zu Betonrecycling und CCS/CCU.

Die Teilnehmenden des KGT1 sehen aber gleichzeitig auf verschiedenen Ebenen große Herausforderungen – dies wurde bereits im Rahmen der Visionsfindung deutlich. Zwar sind heute schon einige der notwendigen Dekarbonisierungsstrategien wie Brennstoffwechsel (Abfälle, Strom, Biomasse, Wasserstoff und Synthesegase) oder Carbon Capture (CCS/CCU) grundsätzlich technisch verfügbar oder in Entwicklung. Für ihre breite Einführung fehlt jedoch ein entsprechender politischer und gesellschaftlicher Rahmen.

Als zentrale Handlungsfelder identifizierten die Teilnehmenden insbesondere die regulatorischen Rahmenbedingungen und die gesellschaftliche Akzeptanz für Infrastrukturen (CO₂, H₂) sowie die Marktakzeptanz für erhöhte Produktpreise für grünen Zement/Beton.

Brennstoffbedingte CO₂-Emissionen können deutlich gemindert werden

Für die Bereitstellung von thermischer Energie für die Klinkerherstellung gibt es verschiedene Optionen, durch die brennstoffbedingte CO₂-Emissionen gegenüber heute deutlich gemindert bzw. vermieden werden können. Welche Rolle diese Optionen zukünftig jeweils genau spielen werden, ist noch genauer zu bestimmen. Als grundsätzlich relevant werden neben den bereits etablierten abfallbasierten Brennstoffen insbesondere Biomasse, Biomethan, regeneratives Methan sowie Wasserstoff und Strom angesehen. Die genannten Energieträger haben jeweils verschiedene Vor- und Nachteile und erfordern in unterschiedlichem Maße eine technische Anpassung, einen Umbau oder eine Neukonstruktion in der Ofentechnik. Neben Emissionsfaktoren sind bei der Auswahl der Energieträger weitere Faktoren wie Verfügbarkeit,

Energieeffizienz, ökologische Nachhaltigkeit und Preise sowie Wechselwirkungen mit dem Gesamtsystem (z. B. bei der Nutzung von Abfallstoffen) zu berücksichtigen.

CO₂-Abscheidung und -Nutzung oder -Speicherung für prozessbedingte CO₂-Mengen

Zementklinker wird aus Kalkstein produziert und es gibt für diesen Rohstoff bislang keine in großem Maßstab und global verfügbare kostengünstige Alternative. Aufgrund dessen wird CCU/CCS als eine wichtige Strategie angesehen, um rohstoffbedingte CO₂-Mengen, die während der Entsäuerung des Kalksteins bei der Klinkerherstellung entstehen, nicht zu emittieren.

Bei CCU muss die Frage nach der Herkunft des CO₂ (rohstoff- oder brennstoffbedingt) sowie der Dauerhaftigkeit der CO₂-Speicherung in Zwischen- oder Endprodukten beantwortet und definiert bzw. kategorisiert werden. So wird beispielsweise das CO₂ bei Verwendung in synthetischen Kraftstoffen bei der anschließenden Verbrennung wieder in die Atmosphäre entlassen. Solange dem Prozess fossiles CO₂ aus dem Rohstoff (Kalkstein) weiterhin neu zugeführt wird, wäre CO₂-Neutralität im Klinkerbrennprozess daher für dieses Anwendungsbeispiel nur für den brennstoffbedingten CO₂-Anteil möglich und auch nur dann, wenn CO₂-neutrale Brennstoffe zum Einsatz kommen.

Bis zum Jahr 2050 wird aus Sicht der Zementindustrie als Vision der Aufbau einer überregionalen CO₂-Transportinfrastruktur gesehen. Für den wirtschaftlichen Aufbau und Betrieb dieser Strukturen werden langfristige, national und international koordinierte Kooperationen und Netzwerke als sinnvoll bzw. notwendig erachtet. An den Standorten, wo naheliegende Quellen-Senken-Beziehungen (Zementwerke und CO₂-Speicherstätten) vorgefunden werden, sollten bevorzugt dezentrale Lösungen zum Einsatz kommen. Grundsätzlich müssen zukünftige Infrastrukturbedarfe frühzeitig bei der Raumplanung mitbedacht werden.

Kreislaufwirtschaft im Betonbau ausweiten

Die Einführung einer umfassenden Kreislaufwirtschaft - inklusive Recycling von Betonabbruch und Betonbauteilen - wird als eine wichtige Säule und gleichzeitig auch als eine große Herausforderung identifiziert. Ein Recycling im Sinne eines geschlossenen Kreislaufs weitet dabei das heute in großem Umfang praktizierte Downcycling (Abbrechen und Mahlen von Altbeton zur Verwendung im Straßen- und Gleisbau) sowie den Einsatz von rezykliertem Beton als Ersatz für Sande und Gesteinskörnung in der Betonherstellung dahingehend aus, dass zukünftig auch die Feinfraktion des Betonabbruchs als Rohstoff genutzt wird.

Aus Klimaschutzsicht ist insbesondere die Rückführung von Bestandteilen des Altbetons in Ausgangsstoffe für Klinker (als Kalksteinersatz) und Zement (als Hauptbestandteil neben Klinker) relevant, da hierdurch prozessbedingte Emissionen bei der Zementherstellung vermieden werden können. Kommerzielle Verfahren dazu müssen noch entwickelt werden. Dabei erscheint aus heutiger Sicht, dass zwar hohe Recyclingquoten angestrebt werden sollten, ein 100%iges Schließen des Stoffkreises aus techno-ökonomischer Sicht jedoch voraussichtlich nicht möglich sein wird.

Die Einbringung von CO₂ in Frischbeton (Rekarbonatisierung) sowie die CO₂-Aufnahme von Fertigbauteilen beim Aushärtungsprozess wird von Teilnehmenden des KGT1 ebenfalls im Sinne einer (CO₂-)Kreislaufwirtschaft verstanden.

Zum effizienten Schließen des Kreislaufs sollten – wo immer möglich – dezentrale Lösungen mit kurzen Transportwegen für Rohstoffe, Sekundärrohstoffe, CO₂ und Abbruchmaterialien bevorzugt werden.

Wirtschaft & Arbeit – Chancen durch grüne Zemente und Betone

Die Dekarbonisierung der Zementindustrie kann als Chance für die deutsche Wirtschaft begriffen werden, führend in der Herstellung grüner Zemente und Betone zu werden. Dies beinhaltet in dem Zusammenhang weitere Potenziale auch für den Anlagenbau sowie den Bereich Kreislaufwirtschaft.

Digitalisierung als Enabler für grüne Zemente und Betone sowie Kreislaufwirtschaft

Die Digitalisierung und Automatisierung (Industrie 4.0, Building Information Modeling BIM, serielle Fertigung etc.) ermöglichen verbesserte Anwendungen neuer Zemente und ein Monitoring der Footprints von Zement/Beton. Digitalisierung kann somit zu einem Enabler werden, um grünen Zement/Beton in den Markt zu bringen.

Auch für den Aufbau einer effizienten Zement-Beton-Kreislaufwirtschaft kann die Digitalisierung wichtige Beiträge leisten.

Der Markt fragt grüne Zemente und Betone nach

Pull-Faktoren aus dem Markt werden von Teilnehmenden des KGT1 als essentiell angesehen, um der Branche den Weg hin zur Dekarbonisierung zu ermöglichen (Markt als Treiber). Um trotz der voraussichtlich höheren Produktpreise für grüne Zemente/Betone eine Marktnachfrage zu schaffen, werden verschiedene Instrumente wie z. B. Kundenanreizprogramme, Sonderabschreibungen im Rahmen der AfA, verbilligte Kredite und direkte Förderung vorgeschlagen.

Neben Fördermaßnahmen könnten veränderte Standards z. B. für die öffentliche Beschaffung (unter Berücksichtigung des gesamten Lebenszyklus von Baustoffen), eine produktspezifische Deklaration der CO₂-Fußabdrücke und die Berücksichtigung von CO₂-Minderungsmaßnahmen im Beton in der EU-Taxonomie den Markt für grünen Zement/Beton beleben.

Neben der Marktakzeptanz von CO₂-freiem Zement/Beton an sich spielt für die Minderungstechnologie CCU indirekt auch die Akzeptanz von Produkten mit wiederverwendetem CO₂ eine Rolle und sollte mit geeigneten Maßnahmen, Instrumenten und Kommunikation gestützt werden.

Zement und Beton sollten dort zum Einsatz kommen, wo sie ihre besonderen Eigenschaften optimal in die Bauwirtschaft einbringen können. In Zukunft wird – im Sinne eines effizienten Einsatzes von Klinker und Zement – eine stärkere Abstufung/Differenzierung von Zementen für das jeweilige Anwendungsfeld notwendig werden.

Damit neue Zemente (mit neuen/veränderten Eigenschaften) in der Praxis sicher angewandt werden können, ist zudem eine ausreichende Schulung der Anwender erforderlich. Das bedeutet, dass innerhalb der Prozesskette die Zusammenarbeit und der Austausch zwischen Zementherstellern, Betonbranche und dem Baugewerbe (inkl. Planern/Planerinnen, Architekten/Architektinnen etc.) noch stärker an Bedeutung zunehmen muss.

Regulatorischer Rahmen – Level Playing Field für grüne Zemente und Betone

Insbesondere für die neuen Zemente und Bindemittel sowie deren effizienteren Einsatz müssen die normativen Grundlagen (Definition und Abgrenzung, Produkt- und Baunormen) zügiger, als es in der Vergangenheit der Fall war, geschaffen werden. Voraussetzung dafür sind geeignete Nachweise für die Leistungsfähigkeiten von Betonen aus (nahezu) CO₂-freien Zementen (Frischbeton, Festbeton, Verarbeitbarkeit, Dauerhaftigkeit etc.). In der Produktnorm sollte insbesondere auch die CO₂-Intensität berücksichtigt werden.

Neben der rechtzeitigen Klärung genehmigungsrechtlicher Fragen wurde im Zusammenhang mit CCU/CCS der Wunsch nach rechtlicher Anerkennung negativer Emissionen geäußert. Ggf. könnte die Erzeugung negativer Emissionen auch als Geschäftsmodell in Kombination mit ohnehin sinnvoll einsetzbaren Energieträgern wie Alternativen Brennstoffe (ABS) oder Biomasse entwickelt werden.

Derzeit wird Zement nicht in großem Umfang importiert. Die Zementhersteller befürchten jedoch, dass sie nicht in der Lage sein werden, gestiegene Produktionskosten für (nahezu) CO₂-freien Zement oder Beton auf dem heimischen Markt weiterzugeben. Zum Schutz vor Wettbewerbsverzerrung und Carbon Leakage wird ein europäisches bzw. idealerweise globales Level-Playing Field gefordert. Es gilt daher zu prüfen, welche Instrumente geeignet sind, um auch bzgl. internationaler Konkurrenz ein solches Level Playing Field zu schaffen und Carbon-Leakage-Effekte bei der Klinkerproduktion zu verhindern. Als zu prüfende Instrumente werden Carbon Contract for Differences (CCfD), Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM) oder auch an den CO₂-Footprint orientierte Konsumabgaben bzw. Produktnormen vorgeschlagen.

Partizipation bereitet den Boden für gesellschaftliche Akzeptanz erforderlicher Maßnahmen

Der Wunsch einiger der Teilnehmenden des KGT1 ist, dass CO₂-freier Zement/Beton eine ähnlich hohe gesellschaftliche Anerkennung erlangt, wie es heute beispielsweise für den Baustoff Holz der Fall ist.

Die gesellschaftliche Akzeptanz zum Aufbau und Betrieb einer CO₂-Infrastruktur für CCS und CCU wird gleichermaßen als Voraussetzung und Herausforderung gesehen, um nicht vermeidbare, prozessbedingte CO₂-Mengen zu kompensieren. Um das Ziel einer umfassenden ökologisch-sozial-ökonomischen Nachhaltigkeit zu erreichen, ist eine vorausschauende Planung und Gestaltung von gewünschten Entwicklungen und Infrastrukturen zum Klimaschutz mit der frühzeitigen Etablierung geeigneter gesellschaftlicher Dialoge ein Schlüssel zum Erfolg.

Synergien mit anderen Sektoren werden genutzt

Die Zementbranche nimmt in Bezug auf ihren hohen Anteil prozessbedingter Emissionen eine Sonderstellung im Vergleich zu anderen energieintensiven Branchen ein. CCS/CCU wird daher als eine wichtige Strategie angesehen, um rohstoffbedingt entstehende CO₂-Mengen aus der Atmosphäre fernzuhalten. Beim Aufbau und der Nutzung von CO₂-Infrastrukturen sollten – soweit möglich – Synergieeffekte mit anderen Branchen genutzt werden, die ebenfalls unvermeidbare prozessbedingten CO₂-Mengen abscheiden müssen (CC) oder die CO₂-Emissionen aus der Zementindustrie aufnehmen können (CCU). Branchenübergreifend wird darüber hinaus auch eine Koordinierung und Förderung von Energiepartnerschaften für den Markthochlauf von Wasserstoff und Power-to-X-Produkten (PtX) als sinnvoll erachtet.

3.2 Technologien

Ziel des Suchprozesses im Themenfeld Technologien war es, die technologischen Möglichkeiten für die Dekarbonisierung der Zementindustrie zusammenzutragen und aufzuarbeiten und mit den Expertinnen und Experten aus der Kerngruppe sowie in Expertenworkshops zu diskutieren. Um dies zu erreichen wurden die notwendigen und geeigneten Technologien zur Dekarbonisierung der Zementindustrie – aufbauend auf und in Ergänzung zu Literaturrecherchen des Projektteams – schwerpunktmäßig im zweiten Kerngruppentreffen (s. Kapitel 2.3.2) sowie in den sieben Experten-Interviews- und drei Experten-Workshops (Kapitel 2.4) zu den Vertiefungsthemen *Abfallbasierte Brennstoffe, Neue Zemente und Betonbautechniken* sowie *CCUS* identifiziert und diskutiert. Dies ermöglichte zum einen, den aktuellen Stand in Bezug auf die Möglichkeiten der technologischen Transformation

darzustellen und zum anderen, die (ggf. verschiedenen) Perspektiven der Stakeholder*innen auf bestimmte Technologien einzuholen.

3.2.1 Ausgangslage und Einführung in die Technologien

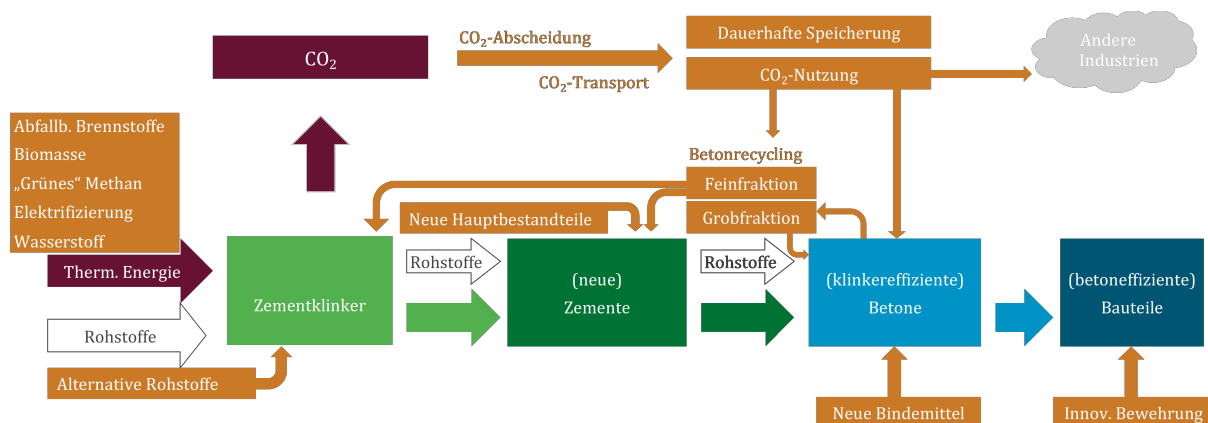
Die Klimaneutralität der Zement- und Betonherstellung ist langfristig (bis 2045 bzw. 2050) technisch machbar, insofern die dafür erforderlichen Rahmenbedingungen geschaffen werden. Für die Dekarbonisierung der Zementindustrie stehen eine große Vielzahl an Techniken und Maßnahmen zur Verfügung, die an unterschiedlichen Stellen der Wertschöpfungskette Betonbau ansetzen und in vielen Fällen komplementär zueinander sind. Die verfügbaren technischen Maßnahmen wurden u.a. von (CSI / ECRA, 2017; Nolting et al., 2018; Ruppert et al., 2020; Schneider, 2019; Scrivener et al., 2018) aufgearbeitet und verschiedentlich in Roadmaps für verschiedene Ebenen (DE, EU, global) zusammengeführt (Cembureau, 2020; Favier et al., 2018; GCCA, 2021; IEA/CSI, 2018; Material Economics, 2019; VDZ, 2020a).

Abbildung 15 gibt einen schematischen Überblick über die im Projekt betrachteten Minderungshebel entlang der Wertschöpfungskette Zementherstellung und Betonbau, die im Folgenden kurz erläutert werden. Die Abbildung setzt auf die Wertschöpfungskette Betonbau auf, in der

- ▶ Zementklinker unter Einsatz von Rohstoffen und thermischer Energie hergestellt wird,
- ▶ Zementklinker mit anderen Hauptbestandteilen und den Nebenbestandteilen zu Zement vermahlen wird,
- ▶ Zement mit Sand, Gesteinskörnung und Wasser zu Beton gemischt wird
- ▶ und aus dem Beton schließlich Bauteile hergestellt werden.

Für eine detaillierte Darstellung der heutigen Zement- und Betonherstellung sei auf (VDZ 2002) verwiesen.

Abbildung 15: Schematische Darstellung technischer CO₂-Minderungshebel (orange) entlang der Wertschöpfungskette Zementherstellung und Betonbau



Quelle: eigene Darstellung, Wuppertal Institut

Die CO₂-Entstehung in der Wertschöpfungskette Betonbau ist nahezu vollständig auf die Herstellung von Zementklinker zurückzuführen. Aus heutiger Sicht bleibt Zementklinker auch langfristig (bis mind. 2050) ein unverzichtbarer Baustoff. Mit Blick auf eine Dekarbonisierung der Zementindustrie stand im Projekt daher die Minderung bzw. Vermeidung der CO₂-Emissionen aus der Klinkerherstellung im Mittelpunkt der Betrachtungen.

CO₂ entsteht bei der Klinkerherstellung zum einen durch die im Klinkerbrennprozess eingesetzten Brennstoffe (ca. 1/3 der CO₂-Mengen) und zum anderen durch die Entsäuerung des als Rohstoff eingesetzten Kalksteins (ca. 2/3 der CO₂-Mengen).

Bei der Klinkerherstellung kann insbesondere der Anteil der brennstoffbedingten CO₂-Entstehung durch eine veränderte Bereitstellung von Prozesswärme vermindert bzw. prinzipiell gänzlich vermieden werden. Hingegen erscheint eine Reduktion der prozessbedingten CO₂-Entstehung pro Tonne Klinker, die durch die Entsäuerung des eingesetzten Kalksteins bedingt ist, aus heutiger Sicht nur sehr geringfügig durch den Einsatz alternativer, bereits entsäuerter Rohmaterialien möglich.

Durch einen effizienten Einsatz von Beton³⁵ und durch einen effizienten Einsatz von Zement und Klinker in Betonen kann der Bedarf an CO₂-intensivem Klinker reduziert, jedoch nicht auf null abgesenkt, werden. Innovative Ansätze im Betonbau und neue Zemente unter Verwendung innovativer Hauptbestandteile sind essentiell für solch einen klinkereffizienten Betonbau. Neue Bindemittel, die ohne konventionellen Klinker auskommen, können in gewissem Umfang ebenfalls eine Rolle spielen – bei ihrer Herstellung fällt jedoch ebenfalls CO₂ an.

Da aus heutiger Sicht Zementklinker auch zukünftig eine wichtige Rolle zukommt und insbesondere die mit seiner Herstellung verbundene prozessbedingte CO₂-Entstehung nicht vermieden werden kann, kommt der CO₂-Abscheidung sowie der möglichst dauerhaften Bindung des abgeschiedenen CO₂ eine wichtige Rolle für die Dekarbonisierung der Zementindustrie zu. Für die Abscheidung sind verschiedene Verfahren bereits recht weitgehend entwickelt, so dass bzgl. der rechtzeitigen technischen Verfügbarkeit geeigneter Abscheideverfahren nach Wahrnehmung der Autoren in Fachkreisen keine grundlegenden Bedenken bestehen. Das abgeschiedene CO₂ kann entweder genutzt oder dauerhaft gespeichert werden. Der Verbleib des abgeschiedenen CO₂ ist Gegenstand vielfältiger Diskussionen und Überlegungen.

Beim Betonrecycling kann die Grobfraktion (Gesteinskörnung) in der Betonherstellung wiederverwendet werden (RC-Beton), und die Feinfraktion (Betonbrechsand bzw. separierter Zementstein) ggf. zukünftig in verschiedenen Teilprozessen der Zementherstellung genutzt werden. Das Betonrecycling bietet durch verschiedene Verfahren zudem Möglichkeiten zur Nutzung und dauerhaften Bindung von CO₂.

Die verschiedenen Techniken und Maßnahmen zur Dekarbonisierung der Zementindustrie stehen in Wechselwirkung miteinander, so dass eine klar abgegrenzte Unterteilung der Techniken und Maßnahmen in Untergruppen schwierig ist. Um dennoch ein gewisses Maß an Übersichtlichkeit zu erzeugen, wurden die Arbeiten im Projekt in folgende Technologiebereiche unterteilt, entlang derer im Folgenden eine etwas detailliertere Diskussion der betrachteten Minderungshebel erfolgt:

- ▶ Bereitstellung thermischer Energie
- ▶ Neue Zemente und Betonbautechniken (inklusive neuer Bindemittel)
- ▶ CO₂-Abscheidung und Nutzung oder Speicherung

³⁵ Im Rahmen des Projekts wurde die Betrachtungsgrenze so gewählt, dass von einer gleichbleibenden Bauleistung des Betonbausektors ausgegangen wird. Ein effizienter Einsatz von Beton bezieht sich demnach hier z.B. auf die pro Betonbauteil benötigte Menge Beton.

3.2.2 Bereitstellung thermischer Energie

Ca. ein Drittel der CO₂-Entstehung bei der Herstellung von Klinker ist heute auf die Verwendung fossiler Brennstoffe³⁶ zurückzuführen. Diese fossilen CO₂-Mengen können prinzipiell vollständig vermieden werden – durch den Einsatz von biogenen Brennstoffen, Wasserstoff, synthetischem Methan und Strom (s.u.). Aus systemischer Sicht sprechen jedoch Gründe dafür, auch zukünftig abfallbasierte Brennstoffe (ABS) einzusetzen, die auf nicht recycelbaren Abfällen basieren.

Die genannten Energieträger haben jeweils verschiedene Vor- und Nachteile und erfordern in unterschiedlichem Maße eine technische Anpassung, einen Umbau oder eine Neukonstruktion in der Ofentechnik. Neben Emissionsfaktoren sind bei der Auswahl der Energieträger weitere Faktoren wie Verfügbarkeit, Energieeffizienz, ökologische Nachhaltigkeit, Preise sowie Wechselwirkungen mit dem Gesamtsystem (z. B. bei der Nutzung von Abfallstoffen) zu berücksichtigen.

3.2.2.1 Abfallbasierte Brennstoffe

Abfallbasierte Brennstoffe (vgl. Infobox) könnten zukünftig prinzipiell zu einem noch größeren Anteil als heute (ca. 70%; VDZ 2022) genutzt werden. Für eine Nutzung abfallbasierter Brennstoffe sprechen aus systemischer Sicht folgende Gründe: i) es werden nur Abfallstoffe verwendet, die sowieso thermisch behandelt werden müssen. Die CO₂-Entstehung würde sich somit bei Nicht-Nutzung in der Zementindustrie nur in den Abfallsektor verlagern; ii) die Verbrennungsrückstände werden im Klinker eingebunden und somit stofflich genutzt, wodurch die prozessbedingten Emissionen der Klinkerherstellung (in geringem Maße) reduziert werden; iii) in der Kombination aus biogenen Anteilen in abfallbasierten Brennstoffen mit CO₂-Abscheidung und einer dauerhaften Bindung des CO₂ könnten negative Emissionen erzielt werden.

Es wird jedoch erwartet, dass sich die Zusammensetzung der für die thermische Nutzung in Zementwerken verfügbaren abfallbasierten Brennstoffe hinsichtlich ihrer Qualität zukünftig im Mittel verschlechtern wird. Um den Anteil an abfallbasierten Brennstoffen im Brennstoffmix dennoch weiter zu steigern, sind eine intensive Zusammenarbeit zwischen Abfallentsorgern, -aufbereitern und Zementindustrie, rechtzeitige Investitionen in Ofenmodernisierung sowie ggf. weitere Anpassungen in den Zementwerken erforderlich.

Infobox: Abfallbasierte Brennstoffe

In Zementwerken werden abfallbasierte Brennstoffe (ABS) verwendet, die nach VDZ (2022) u.a. aus Fraktionen aus Industrie- und Gewerbeabfällen, aufbereitete Fraktionen aus Siedlungsabfällen, Altreifen, Lösungsmittel, Altölen und Klärschlamm hergestellt werden. Die Einsetzbarkeit von Abfällen für die thermische Verwendung in Zementwerken ist abhängig von deren Heizwert, Güte, Größe/Form/Körnung, deren Schadstoffanteilen sowie von der im Zementwerk installierten Anlagentechnik. Je höher der angestrebte ABS-Anteil am Brennstoffmix eines Zementwerks ist, desto anspruchsvoller kann die lokale Bereitstellung und Aufbereitung ausreichender ABS-Mengen in der benötigten Qualität werden.

ABS weisen im heute typischen Mix im Vergleich zu den Regelbrennstoffen Stein- und Braunkohlenstaub knapp um die Hälfte (ca. 51 kg CO₂/GJ) verringerte spezifische fossile CO₂-Emissionen auf (eigene Berechnung basierend auf VDZ (2022) und Lechtenböhmer et al. (2006)). Bei der thermischen Nutzung von Abfällen mit biogenen Anteilen entsteht zudem biogenes CO₂. Die biogenen Kohlenstoffanteile der ABS-Brennstoffe liegen heute im Durchschnitt etwa bei 30% (eigene Berechnung basierend auf VDZ (2022) und Lechtenböhmer et al. (2006)).

³⁶ Inklusive fossiler Anteile abfallbasierter Brennstoffe. Der Anteil abfallbasierter Brennstoffe beträgt in der deutschen Zementindustrie heute insgesamt ca. 70%, bezogen auf die bereitgestellte thermische Energie.

Grundsätzlich wird sich die stoffliche Zusammensetzung bei einigen Stoffen (z. B. Altöle, Lösungsmittel, Altreifen etc.) zukünftig voraussichtlich wenig ändern, bei anderen Abfallfraktionen sind hingegen deutliche Änderungen der Zusammensetzung zu erwarten (z. B. Siedlungsabfälle). In Summe werden sich durch ein verändertes Abfallaufkommen sowie Verbesserungen beim Recycling erwartungsgemäß zukünftig die Qualität (Heizwert, Schadstofffrachten, Brennbarkeit/Korngröße/Stückigkeit) und die Preise von ABS verändern. Insbesondere ist mittel- und langfristige von einem im Mittel abnehmenden Heizwert auszugehen. Bezogen auf den Wärmeeintrag in die Zementöfen spielen kunststoffstämmige Abfälle aus Industrie und Gewerbe heute eine wichtige Rolle. Die in der Zementindustrie als ABS eingesetzten kunststoffstämmigen Abfälle sind Restabfälle, d.h. Sortierreste wie Mischkunststoffe, die mit heutiger Technik nicht stofflich recycelt werden können und daher energetisch verwertet werden. Mittel- bis langfristig könnte durch das chemische Recycling ein neuer Verwertungsweg für diese Abfallfraktionen entstehen, wodurch sich deren Verfügbarkeit für die Zementindustrie verringern könnte.

3.2.2.2 Biogene Brennstoffe

Biogene Brennstoffe (feste Biomasse, Biogas, Biomethan) könnten aus rein technischer Sicht für die gesamte Wärmebereitstellung für den Klinkerbrennprozess genutzt werden. In der Kombination aus biogenen Brennstoffen mit CO₂-Abscheidung und einer dauerhaften Bindung des CO₂ könnten negative Emissionen erzielt werden. Limitierender Faktor für den Einsatz biogener Brennstoffe ist v.a. die Verfügbarkeit von Biomasse bzw. die Konkurrenz um eine begrenzte Menge nachhaltiger Biomasse mit anderen Sektoren und Industriebranchen. Im Zuge der Transformation des gesamten Energiesystems könnten jedoch in anderen Sektoren (Stromerzeugung, Verkehr, Haushalte) Bioenergie-Potenziale freigesetzt werden, die in der (Zement-)Industrie zum Einsatz kommen könnten, ohne dass eine Mehrbelastung für Ökosysteme entsteht (vgl. Prognos et al., 2021).

3.2.2.3 Wasserstoff

Wasserstoff kann aus heutiger Sicht in der Zementklinkerproduktion aus technischen Gründen kohlenstoffhaltige Brennstoffe nur anteilig ersetzen; der maximal mögliche Anteil ist Gegenstand von Forschung.³⁷ Die Verfügbarkeit von Wasserstoff an vielen Standorten der Zementindustrie ist abhängig von der Entwicklung einer zukünftigen H₂-Infrastruktur bis in den ländlichen Raum, bzw. von der Verfügbarkeit ausreichender Mengen (erneuerbaren) Stroms zum Betrieb eines Elektrolyseurs vor Ort.

3.2.2.4 Synthetisches Methan

Synthetisches Methan könnte aus rein technischer Sicht für die gesamte Wärmebereitstellung für den Klinkerbrennprozess genutzt werden. Einem Einsatz steht v.a. der damit verbundene sehr hohe (und ggü. Wasserstoff nochmals deutlich erhöhte) Bedarf an erneuerbarem Strom entgegen.

³⁷ In einer Studie von (Mineral Products Association et al., 2019) wurde z. B. ein Anteil von 50% H₂ (bezogen auf die zugeführte thermische Energie) an der Hauptfeuerung des Ofens eines Zementwerks mit fünfstufigem Zyklonvorwärmer und Calcinator simuliert. Dies entspricht 20% des gesamten Wärmeeintrags.

3.2.2.5 Direkte Elektrifizierung

Strom kann aus heutiger Sicht zukünftig voraussichtlich auf zweierlei Weise direkt für die Wärmebereitstellung genutzt werden³⁸: durch Elektrifizierung der Wärmebereitstellung an einem Calcinator mit CO₂-Direktabscheidung (elektrifiziertes LEILAC-Verfahren; s. Kapitel 3.2.4) sowie durch die Verwendung von Plasmabrennern. Das elektrifizierte LEILAC-Verfahren wird derzeit an einer Pilotanlage erforscht und würde eine Elektrifizierung von ca. 60% der thermischen Energie ermöglichen. Plasmabrenner sind prinzipiell eine etablierte Technologie, die für eine vollständige Elektrifizierung genutzt werden könnte. Ihr Einsatz in der Zementindustrie befindet sich jedoch noch in einer früheren Phase der Erforschung.

Verschiedene Energieträger können Synergien aufweisen – z. B. könnte die anteilige Verwendung von H₂ niedrige Heizwerte abfallbasierter Brennstoffe ausgleichen. Aus wirtschaftlicher Sicht sind die Energieträgerpreise, der CO₂-Preis (bzw. die Kosten für die Vermeidung von CO₂-Emissionen durch CCUS) sowie je nach gewähltem Energieträgermix zu tätige Investitionen aus Sicht der Zementunternehmen ausschlaggebend für die Wahl des Energieträgermixes. Aus heutiger Sicht werden abfallbasierte Brennstoffe und Biomasse voraussichtlich wirtschaftlicher sein als Wasserstoff und die direkte Nutzung von Strom (eigene Berechnung).

3.2.3 Neue Zemente und Betonbautechniken (NZB)

Um die CO₂-Entstehung durch die Herstellung von Klinker möglichst weitgehend zu mindern, ist ein möglichst effizienter Einsatz von Klinker in der Zementherstellung und im Betonbau unter Berücksichtigung der Sicherheit und Dauerhaftigkeit von Bauten anzustreben. Prinzipiell bestehen hierfür Ansätze auf drei Ebenen:

- ▶ Herstellung klinkerarmer Bindemittel, dies umfasst sowohl
 - neue Zemente unter Verwendung von herkömmlichem Portlandzementklinker als auch
 - neue Bindemittel ohne Portlandzementklinker
- ▶ Klinkereffizienter Einsatz von Zement in Beton
- ▶ Betoneffizientes Bauen.

Es bestehen Wechselwirkungen zwischen diesen Ebenen, so dass diese Strategien in der Umsetzung nicht vollständig unabhängig voneinander sind.

3.2.3.1 Neue Zemente

Der Klinkeranteil in Zementen („Klinkerfaktor“) konnte in der Vergangenheit durch den verstärkten Einsatz weiterer Hauptbestandteile neben Klinker auf heute 71% abgesenkt werden (VDZ, 2020a). Den mengenmäßig größten Anteil an diesen weiteren Hauptbestandteilen haben heute Hüttensand und gemahlener (ungebrannter) Kalkstein (VDZ, 2020b). Des Weiteren spielen Flugaschen aus dem Kraftwerkssektor als reaktive Bestandteile in Zementen und v.a. in der Betonherstellung eine wichtige Rolle. Der Anteil von ungebranntem Kalkstein als (inertem) Hauptbestandteil von Zementen wird gemäß Zementnorm in den heute in großen Mengen verwendeten Zementen auf maximal 20%_{Masse}³⁹ an den Zementhauptbestandteilen begrenzt, um

³⁸ Weitere innovative Technologien, die noch in einer frühen Phase der Forschung sind, können möglicherweise langfristig ebenfalls eine Rolle spielen (z. B. elektrische Brennöfen mit Temperaturen bis 1.700°C, siehe unter <https://coolbrook.com>).

³⁹ Gemäß Zementnorm sind auch Kalksteinzemente mit einem Anteil von ungebranntem Kalkstein von 35%_{Masse} an den Hauptbestandteilen möglich (CEM II/B-LL). Diese haben jedoch deutlich eingeschränkte Anwendungsmöglichkeiten.

die aus bautechnischer Sicht gewünschten Bindemittleigenschaften zu gewährleisten. Bzgl. der reaktiven Hauptbestandteile Hüttensand und Flugaschen ist aufgrund der absehbaren Transformation des Stahlsektors⁴⁰ sowie des Ausstiegs aus der Kohleverstromung mittelfristig mit einem verringerten Aufkommen zu rechnen. Es ist daher eine Herausforderung für die Zementhersteller, den Klinkerfaktor bei verminderter Verfügbarkeit von Hüttensand und Flugaschen auf dem heutigen Niveau zu halten und idealerweise noch weiter abzusinken. Neue Zemente unter Verwendung innovativer Hauptbestandteile sind dafür essentiell.

So lange Hüttensand verfügbar ist, kann er gemäß der im Juli 2021 erschienenen Norm DIN EN 197-5 zukünftig in neuen Portlandkompositzementen bzw. Kompositzementen eingesetzt werden. Diese Zemente erlauben drei Hauptbestandteile (z. B. Klinker, Hüttensand und gemahlene Kalkstein) und ermöglichen so einen effizienten Einsatz von Klinker (und Hüttensand).

Innovative reaktive Hauptbestandteile, die zukünftig die Herstellung von Zementen mit einem niedrigen Klinkerfaktor von weniger als 65%⁴¹ und einer breiten Anwendbarkeit ermöglichen, sind aus heutiger Sicht calcinierte Tone und RCFs (recarbonated concrete fines; rekarbonatisierte rezyklierte Feinfraktion von Betonabbruch). Während der Einsatz calcinierter Tone bereits umfangreich erforscht ist besteht bzgl. der Herstellung von RCFs noch Entwicklungsbedarf.

Weitere innovative Hauptbestandteile sind in der Erforschung (z. B. modifizierte Stahlwerksschlacken, Betonbrechsande). Aus heutiger Sicht ermöglichen diese Hauptbestandteile jedoch (nur) Zemente mit einem Klinkerfaktor größer 65% und gehen daher bezüglich einer Reduktion des Klinkerfaktors nicht über Zemente mit einem hohen Anteil an gemahlene Kalkstein (CEM II/B-LL) hinaus. Sie können jedoch möglicherweise im Vergleich in einer größeren Bandbreite von Anwendungen einsetzbar sein. Derzeit sind jedoch noch keine Anwendungsregeln für diese Zemente festgelegt, so dass hierzu aktuell keine Aussage getroffen werden kann.

3.2.3.2 Neue Bindemittel

Neue Bindemittel, die keinen konventionellen Zementklinker enthalten, ermöglichen im Vergleich zu Portlandzement die Absenkung der spezifischen CO₂-Entstehung pro Tonne Bindemittel je nach Bindemittel von ca. 10% gegenüber Portlandzement (Belite-Zemente) bis hin zu (theoretisch) CO₂-negativen Bindemitteln (Magnesium-Silicat basierte Bindemittel). Ihr Einsatz ist jedoch in vielen Fällen durch ihre bautechnische Eignung auf bestimmte Anwendungen (Nischen) beschränkt, bzw. die erforderlichen Rohstoffe (z. B. Bauxit) sind nicht in großem Maßstab verfügbar bzw. deutlich teurer (Scrivener et al., 2018)z. B.. Im Fall Magnesium-Silicat basierter Bindemittel wurde noch kein Herstellungsprozess im industriellen Maßstab entwickelt. Das zukünftige Marktpotenzial neuer Bindemittel wird daher nach Wahrnehmung der Autoren in Fachkreisen mit nur ca. 5% bis 2050 als gering eingeschätzt (Favier et al., 2018; VDZ, 2020a).

3.2.3.3 Klinkereffizienter Einsatz von Bindemitteln in Betonen

Anforderungen an Betone und deren Zusammensetzung ergeben sich aus der benötigten Druckfestigkeit, den Anforderungen an die Dauerhaftigkeit sowie der Gewährleistung der Verarbeitbarkeit. Je nach Anforderungen kann der erforderliche Bindemittelgehalt (deutlich)

⁴⁰ Hüttensand entsteht bei der Eisenherstellung im Hochofen. Die Eisenherstellung im Hochofen wird gemäß heutigen Szenarien für die Transformation des Stahlsektors zunehmend durch das wasserstoff-basierte DRI-Verfahren (Direct Reduced Iron) ersetzt werden.

⁴¹ Also einem niedrigeren Klinkerfaktor als Kalksteinzemente (CEM II/B-LL).

variieren. Entsprechend kann eine auf den Anwendungszweck angepasste Betonzusammensetzung zu einer erhöhten Klinkereffizienz ggü. einem „All-Purpose-Beton“ führen.

In der Betonherstellung und -verwendung bestehen heute noch ungehobene Potenziale für einen verstärkten Einsatz von klinkereffizienten Zementen. Aus bautechnischer Sicht ist dies insbesondere bei Bauteilen mit geringen Ansprüchen an die Dauerhaftigkeit der Betone (z. B. in Innenräumen) problemlos umsetzbar⁴². Die verringerte Frühfestigkeit von Betonen bei einem Einsatz von Zementen mit verringertem Klinkeranteil muss dabei berücksichtigt werden, insbesondere auch in der Planung (Aushärtungsdauer von Betonfertigteilen im Lager, Belastung von Bauteilen auf der Baustelle). Einer verringerten Frühfestigkeit kann (zu einem gewissen Grad) auch durch andere Maßnahmen (feinere Mahlung, Betonzusatzmittel) entgegengewirkt werden.

Ein zu klinkereffizienten Zementen ähnlicher Ansatz ist die Absenkung des Zementanteils in Betonen durch Beimengung erhöhter Anteile von „Fillern“ – z. B. Quarzsand bzw. -mehl oder ungemahlenem Kalkstein – in den Beton. Aktuelle wissenschaftliche Arbeiten zeigen, dass (im Labor) durch eine getrennte Mahlung verschiedener Bestandteile zu genau abgestimmten, verschiedenen Korngrößen in Kombination mit einer Anpassung des Wasser-/Zementverhältnisses in Betonen sowie der Verwendung von Betonzusatzmitteln sehr klinkereffiziente Betone hergestellt werden können. Für eine Markteinführung und Skalierung mindestens erforderlich wären eine deutliche Umstellung bei der Zement-/ Betonherstellung, zusätzliches Fachwissen bei den Betonherstellern, Erfahrungen mit Pilotprojekten in verschiedenen Anwendungsbereichen sowie eine angepasste Normung.

3.2.3.4 Betoneffizientes Bauen

Verschiedene Verfahren im Betonbau bieten Potenziale für einen effizienten Einsatz von Beton in Bauteilen. Hierbei ist auf mögliche Wechselwirkungen mit der Verwendung klinkereffizienter Zemente zu achten, da für einige betoneffiziente Bauweisen – insbesondere für Ultrahochleistungsbetone – klinkerreiche Zemente eingesetzt werden müssen und sich eine Gesamtbilanz einer möglichen Klinkerersparnis erst bei Betrachtung eines konkreten Bauteils erstellen lässt.

Alternative Bewehrungen aus Carbon (Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff CFK), Basalt, Glas, Edelstahl oder beschichtetem Stahl bieten prinzipiell ein sehr großes Potenzial, Beton einzusparen, da bei Einsatz eines nicht-korrosionsanfälligen Materials anstelle des heute üblichen Baustahls die Bauteildicke deutlich reduziert werden kann. Aus bautechnischer Sicht gibt es keine Einschränkungen bzgl. einer weitreichenden Skalierung des Ansatzes. Es stehen dem im Falle von Carbonbeton (CF-Beton) jedoch noch Bedenken hinsichtlich des Gesundheitsschutzes und in anderen Fällen, z. B. beim Einsatz von Glas und Edelstahl, deutlich höhere Kosten entgegen. Hinsichtlich der Recyclingfähigkeit von CF-Betonen gibt es zudem verschiedene, noch nicht gelöste Herausforderungen wie z. B. eine ökonomisch tragfähige Identifizierung der CFK-bewehrten Betone innerhalb großer Mengen an unbewehrten bzw. stahlbewehrten Abbruchmaterialien in Bauschuttrecyclinganlagen. Erste Lösungsansätze dafür werden beispielsweise am IART der Technischen Universität Bergakademie Freiberg erforscht. Ein weiteres Problem stellen Feingüter und Stäube dar, die bei der mechanischen Aufbereitung des Carbonbetons in konventionellen Anlagen üblicherweise in größerem Umfang anfallen. Auch

⁴² Beispielhafte Betrachtung: würde für ein Gebäude mit einem angenommenen Anteil von Innenbauteilen von 50% für diese Innenbauteile Beton mit dem Mindestzementgehalt für Betone der Expositionsklasse XC1 (240 kg/m³) verwendet, anstatt für das gesamte Gebäude für Außenbauteile geeignete Betone (Expositionsklasse XC4 oder XF1; Mindestzementgehalt jeweils 280 kg/m³) einzusetzen, so würde sich der Zementbedarf um ca. 7% verringern (eigene Berechnung).

wenn nach eigenen Angaben im C³-Projekt⁴³ in Untersuchungen des Stoffkreislaufes für das im Carbonbeton verwendete Carbon bisher keine lungengängigen Faserfragmente im Größenbereich der WHO-Definition festgestellt wurden, so betonen andere Forscher, dass in allen Lebensphasen des Carbonbetons nicht vermeidbare CF-Staubemissionen auftreten, die für Mensch und Technik eine relevante Gefährdung darstellen können (Jäckel et al., 2022). Spannbeton ist eine bewährte, betoneffiziente Technologie, für deren Anwendung heute in Deutschland noch unerschlossene Potenziale im Bereich der vorgespannten Fertigteildecken im Geschossbau gesehen werden.

Hohlkörper können in Bauteile (i.d.R. Decken) an den Stellen eingebracht werden, an denen der Beton geringeren Belastungen ausgesetzt wird, wodurch Beton eingespart wird. Einem ähnlichen Prinzip folgt der Ansatz des „Gradientenbetons“, bei dem je nach Belastung in verschiedenen Schichten eines Bauteils verschiedene Betone verwendet werden, bzw. „Füllmaterial“ (z. B. kleine Kunststoff- oder Blähtonkügelchen) eingebracht wird.

Ultrahochleistungsbetone haben einen höheren Bindemittelgehalt als Normalbetone. Sie weisen eine hohe Druckfestigkeit und eine hohe Dauerhaftigkeit auf und ermöglichen schlankere bzw. filigranere Bauteile als konventionelle Betone. Für ihre Herstellung wird i.d.R. Portlandzement verwendet, dennoch könnte aufgrund der ermöglichten Betoneffizienz in Summe Zementklinker eingespart werden.

Daneben existieren weitere Ansätze für betoneffizientes Bauen, die Stand heute als Pilotvorhaben geplant sind bzw. bereits realisiert wurden, im Rahmen des Projekts jedoch nicht vertieft betrachtet werden konnten. Hierzu gehören die Anwendung von Verfahren des 3D-Drucks im Baubereich⁴⁴ und Ansätze für modulares Bauen, d.h. der Wiederverwendung ganzer Bauteile nach dem Ende der Nutzungsphase eines Gebäudes.⁴⁵

3.2.3.5 Differenzierter Einsatz von Bindemitteln und Betonen

Neue, klinkereffiziente Zemente und Bindemittel haben gegenüber heute überwiegend genutzten Zementen ein begrenztes Anwendungsspektrum⁴⁶, so dass ihr Einsatz genau auf den Anwendungszweck abgestimmt werden muss. Des Weiteren kann durch eine gezielt an den Anforderungen des jeweiligen Bauteils ausgerichtete Betonzusammensetzung der Zementgehalt bzw. Klinkergehalt in Betonen auf das Notwendige beschränkt werden. Gleichzeitig sollte die Wechselwirkung mit betoneffizienten Bauweisen, die klinkerreiche Betone erfordern (z. B. Spannbeton, Ultrahochleistungsbeton), in der Planung berücksichtigt werden. Ein nach Anwendungszweck differenzierter Einsatz von Zementen und Betonen ist daher erforderlich, um viele der oben genannte Minderungsansätze aus dem Bereich der „Neue Zemente und Betonbautechniken“ im Markt zu etablieren.

3.2.4 CO₂-Abscheidung und Nutzung oder Speicherung (CCUS)

Da die Entstehung von CO₂ bei der Herstellung von Bindemitteln aus prozesstechnischen Gründen aus heutiger Sicht nicht vollständig vermieden werden kann, ist die CO₂-Abscheidung

⁴³ Das Projekt C³ – Carbon Concrete Composite wurde im Sep. 2022 beendet. Informationen speziell zur Recyclingfähigkeit von Carbonbeton finden sich unter: www.carbon-concrete.org/carbonbeton/recycling

⁴⁴ Siehe z. B. www.housedruck.de

⁴⁵ Siehe z. B. www.zirkulaer.com

⁴⁶ Portlandzement, Portlandhüttenzement, Portlandkalksteinzement mit einem Klinkeranteil von mind. 80% an den Hauptbestandteilen sowie Hochofenzemente mit einem Klinkeranteil von mind. 20% an den Hauptbestandteilen können gemäß der Anwendungsregeln DIN 1045-2 prinzipiell für alle Anwendungsbereiche des Betonbaus eingesetzt werden. Dies gilt nicht in gleichem Maße für Portlandkompositzemente CEM II/C-M, für Kompositzemente sowie für neue Bindemittel ohne Portlandzementklinker.

und die anschließende Nutzung oder Speicherung des CO₂ (CCUS) nach derzeitigem Wissensstand ein zentrales Element zum Erreichen der Klimaneutralität im Zementsektor.

Für die CO₂-Abscheidung sind verschiedene Verfahren in der Entwicklung, die sehr zeitnah (Aminwäsche) bzw. voraussichtlich bis ca. 2030 (Oxyfuel, Direktabscheidung am Calcinator) in industriellem Maßstab eingesetzt werden können. Die Verfahren haben verschiedene Vor- und Nachteile, die je nach Projekt gegeneinander abgewogen werden müssen (vgl. Infobox). Daher ist davon auszugehen, dass auch langfristig unterschiedliche Verfahren Anwendung finden. Aus technischer Sicht stellt die CO₂-Abscheidung keinen Flaschenhals für die Transformation der Zementindustrie dar.

Infobox: Verfahren zur Abscheidung von CO₂

Post-Combustion-Verfahren (Aminwäsche) können im Vergleich der Verfahren am einfachsten an einem bestehenden Werk modular nachgerüstet werden. Zudem kann die Abscheiderate im Zeitverlauf skaliert werden. Post-Combustion-Verfahren eignen sich daher insbesondere für die erste Phase der Transformation, in der eine „CO₂-Wirtschaft“ noch im Entstehen ist. Die maximale Abscheiderate ist > 90% (bezogen auf sämtliches entstehendes CO₂). Die Abscheidung der letzten Prozentpunkte ist jedoch mit höherem Aufwand (und Kosten) verbunden. Die aus Umweltsicht problematischen Amine stellen eine Herausforderung dar, für die ein geeignetes Verwertungskonzept entwickelt werden muss. Zudem ist das Verfahren aufgrund des hohen Wärmebedarfs zur Regenerierung der Amine vergleichsweise energieaufwändig. Zur energieeffizienten Einbindung müssen dafür intelligente Abwärmenutzungskonzepte entwickelt werden.

Das **Oxyfuel**-Verfahren zur CO₂-Abscheidung ist im Vergleich zur Aminwäsche sehr viel energieeffizienter⁴⁷: Da bei diesem Verfahren der Luft-Stickstoff nicht durch den Verbrennungsprozess geschleust wird, kann das CO₂ relativ einfach durch Kondensation aus den Abgasen gewonnen werden. Die maximale Abscheiderate liegt deutlich oberhalb von 90% (bezogen auf sämtliches entstehendes CO₂). Ein Nachteil des Verfahrens ist, dass es an einer Ofenlinie nicht schrittweise skaliert werden kann, da der gesamte Ofen entsprechend designed bzw. umgerüstet werden muss, um die Brenner mit reinem Sauerstoff bzw. einem Sauerstoff/CO₂-Gemisch zu betreiben und das Eindringen von Falschluff möglichst zu minimieren. Aus technischer Sicht ist eine Nachrüstung an einem bestehenden Werk prinzipiell möglich. Dies ist jedoch ein massiver Eingriff, der insbesondere bei neueren Werken oder Ofenlinien nach Aussagen von Akteuren aus der Zementindustrie aus wirtschaftlicher Sicht i.d.R. nicht vorteilhaft erscheint. Oxyfuel ist daher eher bei Ofen-Neubauten die Wahl. Durch die höhere Verbrennungstemperatur bei der Verbrennung in Sauerstoffatmosphäre ergeben sich mögliche Synergien bei einem Einsatz von niederkalorischen abfallbasierten Brennstoffen; dies wird im Detail noch erforscht. Die Bereitstellung des benötigten Sauerstoffs in einer Luftzerlegungs- oder Elektrolyse-Anlage erfordert wiederum einen höheren Einsatz (erneuerbaren) Stroms. Sauerstoff kann jedoch ggf. bei der Produktion grünen Wasserstoffs anfallen und dann synergetisch im Oxyfuelverfahren genutzt werden.

Die **Direktabscheidung am Calcinator (LEILAC⁴⁸-Verfahren)** erfasst (nur) die prozessbedingten Emissionen (ca. 66 %), und davon wiederum den Anteil, der am Calcinator entsteht (ca. 90-95%), in Summe also ca. 60 % der Gesamtemissionen. Da ein (nahezu) reiner CO₂-Strom abgetrennt wird, ist es sehr energieeffizient, und sowohl bei Neubau eines Ofens als auch als Retrofit denkbar. Der Skalierung eines einzelnen indirekt beheizten Calcinator sind hinsichtlich der Wärmeübertragung

⁴⁷ Unter Berücksichtigung der Bereitstellung von Sauerstoff mittels Luftzerlegungsanlage beim Oxyfuel-Verfahren sowie der für die Regenerierung von Aminen benötigten Wärmemengen bei Aminwäsche-Verfahren.

⁴⁸ LEILAC = Low Emissions Intensity Lime and Cement (www.project-leilac.eu/leilac2-project)

technische Grenzen gesetzt.⁴⁹ Eine darüber hinausgehende Skalierung erscheint nach aktuellen Überlegungen jedoch durch ein modulares Vorgehen möglich - bei Bedarf können verschiedene Reaktoren parallel im Werk aufgebaut werden. Das LEILAC-Verfahren bietet Synergien mit einer strombasierten Bereitstellung thermischer Energie, d.h. es ermöglicht prinzipiell gleichzeitig die Reduktion der *brennstoffbedingten* Emissionen durch Elektrifizierung des Calcinators.⁵⁰ Die dadurch für den Calcinator entfallenden Strukturen für die Zuluft-, Brenngas- und Rauchgaskonditionierung reduzieren den apparativen Aufwand, so dass bei den Investitionsausgaben (CAPEX) für den Calcinator nicht notwendigerweise Mehrkosten zu erwarten sind. In der noch laufenden technischen Erprobung muss insbesondere noch im Dauereinsatz die Standfestigkeit der für die indirekte Beheizung genutzten Materialien nachgewiesen werden. Weitere Verfahren, z. B. **Calcium-Looping** sind in der Entwicklung oder Erprobung⁵¹. Im Rahmen des Projektes CLEANKER⁵² ist in Vernasca/Italien eine Pilotanlage (nach eigenen Angaben TRL-7) in Betrieb, um das Calcium-Looping-Konzept zu demonstrieren.

Quellen: Hills et al. (2016), ieaghg (2013), Project LEILAC(2021), Voldsund et al. (2019) sowie Interviews und Workshops im Rahmen des Projekts

Offener und kontroverser wird heute die Frage diskutiert, was mit dem „unvermeidbar“ entstehenden CO₂ der Zementindustrie geschehen soll, um eine Emission in die Atmosphäre zu verhindern. Für den Verbleib des CO₂ bestehen verschiedene Möglichkeiten, die im Folgenden kurz dargestellt werden:

- ▶ CO₂-Nutzung durch Mineralisierung (in Baustoffen und ggf. weiteren Produkten)
- ▶ CO₂-basierte Herstellung von chemischen Grundstoffen und Kraftstoffen
- ▶ Geologische Speicherung von CO₂.

Darüber hinaus ist mindestens ein weiteres Verfahren Gegenstand von Forschungen, in dem CO₂ in Kohlenstoff und Sauerstoff aufgespalten wird (vgl. Infobox). Aufgrund des frühen Forschungsstadiums sowie des sehr hohen Energiebedarfs wurde dieses Verfahren für die weiterführenden Arbeiten im Projekt jedoch nicht berücksichtigt.

Infobox: Aufspaltung von CO₂ in Kohlenstoff und Sauerstoff

Ein innovatives Verfahren, zur dauerhaften Bindung von CO₂ wird im Projekt „NECOC“⁵³ untersucht. Hierbei wird CO₂ zunächst unter Einsatz von H₂ methanisiert, und das Methan in einem weiteren Prozessschritt mittels Methanpyrolyse in reinen, festen Kohlenstoff (Carbon Black) und Wasserstoff zerlegt. Im Gesamtprozess wird also - über den Umweg Methan (CH₄) - CO₂ in Kohlenstoff und Sauerstoff aufgetrennt.⁵⁴ Die Kopplung der Prozessschritte ist in dieser Form bisher weltweit einzigartig, höchst anspruchsvoll und sehr energieaufwändig. Es müssen noch

⁴⁹ Das zu beheizende Volumen steigt mit der dritten Potenz, die als Wärmequelle dienende Ummantelungsfläche wächst jedoch nur quadratisch.

⁵⁰ Eine Elektrifizierung der LEILAC1-Pilotanlage wird derzeit im Rahmen des LEILAC2-Projekts erstmalig durchgeführt (www.project-leilac.eu/leilac2-project).

⁵¹ Die Wissenserhebung und Recherche im Rahmen des Projekts Dekarblind fokussierte jedoch auf die drei zuvor genannten Verfahren.

⁵² CLEANKER = CLEAN clinker production by calcium looping process (www.cleanker.eu)

⁵³ www.tvt.kit.edu/21_3547.php

⁵⁴ Derzeit wird im Projekt aus der Atmosphäre abgeschiedenes CO₂ genutzt. Aus Sicht der Autoren dieses Thesenpapiers erscheint es jedoch prinzipiell (technisch) plausibel, das Verfahren auch für CO₂ aus industriellen Quellen zu nutzen – insofern die Weiterentwicklung und Skalierung gelingt.

grundlegende Fragestellungen zur Systemintegration der Reaktorkomponenten und zur Skalierung gelöst sowie der Nachweis des komplexen Zusammenspiels erbracht werden.

Bei der CO₂-Nutzung oder –Speicherung entsteht in vielen Fällen der Bedarf für einen Transport von CO₂. Die Bereitstellung entsprechender Infrastrukturen ist daher ein Schlüsselement für die Dekarbonisierung der Zementindustrie und wird im Folgenden ebenfalls diskutiert.

3.2.4.1 Mineralisierung von CO₂

Die Mineralisierung von CO₂ in verschiedenen Verfahren zur Herstellung von Produkten u.a. der Baustoffindustrie (vgl. Infobox) stellt eine vielversprechende Option zur Nutzung und gleichzeitig dauerhaften Bindung von CO₂ dar, was diese Verfahren mit Blick auf Klimaneutralität besonders reizvoll macht. Zudem sind diese Verfahren energetisch günstig, da die zugrunde liegenden chemischen Prozesse prinzipiell bei normalen Umgebungsbedingungen von selbst ablaufen. Unklar sind aus heutiger Sicht die absoluten Potenziale zur CO₂-Aufnahme, da einige der Verfahren noch in der Entwicklung sind und zukünftige Marktpotenziale sowie teilweise die Verfügbarkeit geeigneter Ausgangsstoffe nur schwer abgeschätzt werden können. Gemäß den Abschätzungen, die den Autoren bekannt sind, werden Verfahren zur Mineralisierung von CO₂ nur einen (kleinen) Teil der bei der Zementherstellung entstehenden CO₂-Mengen aufnehmen können. Des Weiteren ist zu berücksichtigen, dass eine (Re-)Carbonatisierung der eingesetzten Stoffe ebenfalls auf „natürliche“ Weise von selbst erfolgen würde, und zumindest ein Teil der CO₂-Bindung entsprechend langsamer und zeitversetzt i.d.R. auch ohne Einsatz der CCU-Verfahren erfolgen würde. Den Autoren ist keine Analyse bekannt, die die Zusätzlichkeit der CO₂-Bindung durch diese Verfahren quantifiziert.

Infobox: Ausgewählte Verfahren zur Mineralisierung von CO₂

Bei der Herstellung von „**Recarbonated Concrete Fines**“ (RCFs) wird rezyklierter Zementstein in einer CO₂-Atmosphäre rekarbonatisiert und bindet dabei CO₂. Das entstehende reaktive Material kann prinzipiell als Hauptbestandteil in Zementen eingesetzt werden. Es besteht jedoch noch Entwicklungsbedarf, bevor RCFs in dieser Form eingesetzt werden können. U.a. sind die bautechnischen Eigenschaften weiter zu untersuchen. Herausforderungen bestehen ferner insbesondere noch bei der Entwicklung der Technologien für die Separierung und Aufbereitung des Betonabbruchs. Für einen großskaligen Einsatz stellen sich (zudem) die Herausforderung der Umleitung und Logistik geeigneter Massenströme von Betonabbruch sowie genehmigungsrechtliche Fragen (bzgl. der möglichen Anreicherung von Schwermetallen im Sinne des Kreislaufwirtschaftsgesetzes).

CO₂ kann während der Herstellung von Beton – sowohl Transportbeton als auch bei der Herstellung von Betonfertigbauteilen – in der Größenordnung von 0,15%⁵⁵ der Zementmasse **in den Betonmischer injiziert** werden und wird dabei (zum großen Teil) in den Beton eingebunden. Laut Herstellerangaben kann dadurch zudem (ca. 5%) Zement im Beton eingespart werden. Das Verfahren ist in Deutschland derzeit als Beton-Zusatzmittel für Innenbauteile zugelassen. Bzgl. der Dauerhaftigkeit (Frostfestigkeit etc.) der mittels dieses Verfahrens hergestellten Betone fehlen noch belastbare Ergebnisse.

Die Aushärtung von Betonteilen unter CO₂-Atmosphäre in einer Rekarbonatisierungs-Kammer anstatt an der Luft beschleunigt die natürlicherweise auftretende Carbonatisierung des Betons signifikant.⁵⁶ Einschränkungen bestehen bei der Verwendung korrosionsanfälliger Bewehrungen; z. B. bei Baustahl, wie er heute weit überwiegend in bewehrten Bauteilen genutzt wird.

⁵⁵ Beide Zahlenwerte zu diesem Verfahren entstammen Carbon Cure (2020).

⁵⁶ Z. B. www.solidiatech.com

Die Grobfraktion von rezykliertem Betonabbruch kann mit CO₂ behandelt werden. Dadurch wird CO₂ dauerhaft gebunden und die bautechnische Eignung des rezyklierten Betonabbruchs verbessert. Ersten Erfahrungen nach kann durch den Einsatz solchermaßen behandelter Rezyklate zudem der Zementanteil in Betonrezepturen reduziert werden.⁵⁷

Stahlwerksschlacken, Flugasche und ggf. andere **Industrieabfälle** können durch Karbonatisierung „aktiviert“ und daraus Mauersteine und andere Produkte hergestellt werden.⁵⁸

Im Vergleich zur CO₂-basierten Herstellung von chemischen Grundstoffen und Kraftstoffen sowie zur geologischen Speicherung ist die CO₂-Nutzung durch Mineralisierung auch mit geringerer Reinheit des CO₂ möglich, wodurch der Aufwand für die Aufreinigung des aufgefangenen CO₂-Stroms ggf. geringer gehalten werden kann.⁵⁹ Die Nutzung würde im Vergleich voraussichtlich in stärker dezentralen Strukturen erfolgen, wobei dennoch logistische Herausforderungen zu lösen wären.⁶⁰

3.2.4.2 CO₂-basierte Herstellung von chemischen Grundstoffen und Kraftstoffen

Die chemische Industrie und die Kraftstoffindustrie werden im Zuge einer Defossilisierung neue Kohlenstoffquellen zur Herstellung ihrer Produkte erschließen (müssen). Neben stofflichem (mechanischem und chemischem) Recycling von Kunststoffabfällen sind Biomasse und CO₂ aus Punktquellen oder aus Direct Air Capture mögliche Kohlenstoffquellen. Die CO₂-basierte Herstellung von synthetischen chemischen Grundstoffen und Kraftstoffen bietet daher ggf. zukünftig eine Möglichkeit zur Nutzung von CO₂ aus der Zementindustrie.

Das mengenmäßige Potenzial einer solchen CO₂-Nutzung (in DE) ist abhängig von zukünftigen Entwicklungen in der chemischen Industrie sowie der Raffinerien und aus heutiger Sicht höchst unsicher. Z. B. ist aus heutiger Sicht unklar, ob und in welchem Umfang die Herstellung von synthetischen chemischen Grundstoffen und Kraftstoffen zukünftig in Deutschland oder eher in globalen „Sweet-Spots“ der Erzeugung erneuerbarer Energien erfolgen wird.

Die CO₂-basierte Herstellung von Grundstoffchemikalien und Kraftstoffen mittels heute in industrieller Größenordnung demonstrierter Verfahren erfordert zudem sehr große Mengen an (erneuerbarem) Strom (zur Herstellung von Wasserstoff), der zumindest mittelfristig mit größerer Klimaschutzwirksamkeit eingesetzt werden kann (z. B. E-Mobilität, Wärmepumpen). Aus systemischer Sicht sollte eine CO₂-basierte Herstellung von Grundstoffchemikalien und Kraftstoffen daher idealerweise nur in dem Ausmaß erfolgen, in dem erneuerbarer Strom im „Überschuss“ über die Bedarfe anderer, aus Klimasicht vorteilhafterer Ansätze hinaus vorhanden ist bzw. in dem klimafreundlich produzierter (langfristig: klimaneutraler) Wasserstoff importiert werden kann.

Zudem wird durch die CO₂-basierte Herstellung von chemischen Grundstoffen und Kraftstoffen die Emission von CO₂ nur auf spätere Zeiträume und in andere Bilanzräume verlagert, so dass zumindest langfristig für das Erreichen der Klimaneutralität eine Kompensation durch negative Emissionen an anderer Stelle erforderlich würde.

⁵⁷ Z. B. <https://fastcarb.fr/en/home> sowie www.berlin.de/sen/uvk/umwelt/kreislaufwirtschaft/projekte/rc-beton/transportbeton

⁵⁸ Im konkreten Fall des kommerziell aktiven Unternehmens CarbiCrete (www.carbcrete.com) werden Stahlwerksschlacken verwendet. Dabei bleibt unklar, inwieweit das Verfahren auf Anteile von Hüttensand in der verwendeten Stahlwerksschlacke angewiesen ist. Im Projekt NuKoS (<https://co2-utilization.net/de/projekte/co2-mineralisation/nukos>) wird (im Labormaßstab) die CO₂-Nutzung durch Karbonatisierung verschiedener Stahlwerksschlacken untersucht. Das Unternehmen Carbon Upcycling (<https://carbonupcycling.com>) verwendet als Ausgangsmaterial Flugasche (kommerziell verfügbar) sowie weitere Ausgangsstoffe, um diese zu karbonatisieren und daraus Betonzusatzmittel und andere Produkte herzustellen. Weitere Verfahren sind in Erforschung bzw. stehen am Rande der Markteinführung.

⁵⁹ Zu berücksichtigen sind jedoch auch die für den Transport erforderlichen Reinheitsgrade.

⁶⁰ Z. B. fällt Betonabbruch i.d.R. zu großen Teilen in urbanen Gebieten an, wohingegen die CO₂-Entstehung bei der Klinkerherstellung in den meisten Fällen stärker in ländlichen Gebieten in der Nähe von Kalksteinvorkommen verortet ist.

Die Nutzung von CO₂ aus der Zementindustrie in der chemischen Industrie oder der Kraftstoffindustrie erscheint daher (nur) dort eine sinnvolle Minderungsoption zu sein, wo eine dauerhafte Bindung des CO₂ nicht oder nur für eine Teilmenge des anfallenden CO₂ gewährleistet werden kann, ausreichend grüner Wasserstoff aus „Überschuss-Strom“ oder Importen bereitgestellt werden kann und ein Zugang zu Abnehmern synthetischer Kohlenwasserstoffe oder von Methanol besteht. In solch einem Fall stellt die CO₂-Menge, die andernfalls emittiert werden müsste, eine im Vergleich zur Alternative z. B. Direct Air Capture energetisch günstige Möglichkeit zur Bereitstellung von Kohlenstoff dar. Da das CO₂ in diesem Fall mangels Möglichkeit zur dauerhaften Bindung sowieso emittiert werden müsste ergeben sich auch mit Blick auf die CO₂-Bilanz keine Nachteile aus einer Nutzung.

Ob, wo und in welchem Umfang CCU in der chemischen Industrie und der Kraftstoffindustrie eine geeignete (temporäre) Senke für CO₂ aus der Klinkerherstellung darstellen kann, ist von der räumlichen Beziehung von CO₂-Quellen und -Nutzung, Infrastrukturen (für Ausgangsstoffe und Produkte), Synergieeffekten mit bestehenden Prozessen, Platzbedarfen sowie der Verfügbarkeit erneuerbarer Energien abhängig. Insofern eine Nutzung nicht in direkter Nachbarschaft eines Zementklinkerwerks etabliert wird, wird eine CO₂-Infrastruktur erforderlich.

3.2.4.3 Geologische Speicherung von CO₂

Prinzipiell bestehen in Deutschland aus technischer Sicht Potenziale für eine geologische Onshore-Speicherung von CO₂. Eine genauere Untersuchung und Prüfung möglicher Speicherstätten steht jedoch noch aus. Derzeit und in absehbarer Zukunft würde aus Sicht der politischen Akteure onshore-CCS in Deutschland gesellschaftlich nicht akzeptiert und ist nach aktueller Rechtslage auch nicht möglich.

Die geologische Speicherung von CO₂ in ausgeförderten Erdgas- und Ölfeldern und in salinen Aquiferen im europäischen Ausland steht an der Schwelle zum kommerziellen Betrieb (vgl. Infobox) und könnte auch für die deutsche Zementindustrie mittelfristig eine Option für den Verbleib von abgeschiedenem CO₂ darstellen.

Infobox: Ausgewählte Projekte zur geologischen Speicherung von CO₂ im europäischen Ausland

Das Projekt „Northern Lights“⁶¹ will in der Nordsee westlich von Norwegen ab dem Jahr 2024 1,5 Mt CO₂/Jahr in einen salinen Aquifer einspeichern, wobei eine Erweiterung auf bis zu 5 Mt CO₂/Jahr vorgesehen ist, insofern eine entsprechende Nachfrage entsteht. Das Projekt „Porthos“⁶² will CO₂ aus dem Hafengebiet von Rotterdam in leeren Erdgasfeldern in der Nordsee speichern. Das System soll im Jahr 2024 einsatzbereit sein. Die theoretische Speicherkapazität des zunächst erschlossenen Feldes liegt laut Aussage des Unternehmens bei 37 Mt CO₂ mit einer jährlichen Speichermenge von ungefähr 2,5 Mt CO₂. Die vorhandenen Speicherkapazitäten sind für Unternehmen auf dem Gelände des Port of Rotterdam bereits reserviert. Eine mögliche Ausweitung des Projektes wird geprüft. Weitere Projekte im europäischen Ausland sind in Planung (z. B. in UK⁶³).

Eine weitere Möglichkeit zur geologischen Speicherung von CO₂ besteht durch die Carbonatisierung von geeignetem, reaktivem Untergrundgestein durch Injektion von in Wasser gelöstem CO₂ in den Untergrund. Bei diesem Verfahren wird das CO₂ innerhalb vergleichsweise

⁶¹ www.northernlightsccs.com

⁶² www.porthosco2.nl/en

⁶³ Wobei die europäische Richtlinie zur geologischen Speicherung von Kohlendioxid (Richtlinie 2009/31/EG vom 23.04.2009) die Speicherung von CO₂ auf das Hoheitsgebiet der Mitgliedstaaten, ihren ausschließlichen Wirtschaftszonen und ihren Festlandsockeln begrenzt. Nach dem Brexit zählt UK nicht mehr dazu.
<https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:140:0114:0135:DE:PDF>

kurzer Zeit (ca. 2 Jahre) dauerhaft gebunden. Die Anwendbarkeit des Verfahrens ist jedoch auf (seltene) Standorte mit geeigneten geologischen Bedingungen begrenzt. Das theoretische Potenzial zu solch einer CO₂-Bindung mittels Mineralisierung in reaktiven Gesteinsschichten im Untergrund ist groß und wird in Island auf mindestens 950 Gt CO₂ (Snæbjörnsdóttir et al., 2014) und weltweit auf 100.000 bis 250.000 Gt CO₂ geschätzt (Snæbjörnsdóttir et al., 2020).⁶⁴ Es besteht jedoch noch Forschungsbedarf bezüglich der Anwendung des Verfahrens unter verschiedenen Bedingungen (Snæbjörnsdóttir et al., 2020), so dass Aussagen zum weltweit praktisch und wirtschaftlich zu erschließenden Potenzial derzeit nicht getroffen werden können. Am Geothermie-Standort Hellisheiði in Island wurden durch das Verfahren bereits 70.000 Tonnen CO₂ eingespeichert. Eine Speicherung von CO₂ aus industriellen Quellen an diesem Standort ist Gegenstand aktueller Forschung. Bis zum Jahr 2030 soll in Island eine Infrastruktur für den Transport von 3 Millionen Tonnen CO₂ pro Jahr aus industriellen Quellen in Nordeuropa aufgebaut werden.⁶⁵

Eine zentrale Voraussetzung für die Nutzung dieser Speichermöglichkeiten im (europäischen) Ausland wäre eine überregionale CO₂-Infrastruktur, welche die deutschen Zementwerke mit Seehäfen (Rotterdam, Wilhelmshafen, Hamburg) verbindet.

Bzgl. der dauerhaften Sicherheit (über Zeiträume von mehreren Tausend Jahren) sowie Nachhaltigkeit einer geologischen CO₂-Speicherung gibt es unterschiedliche Einschätzungen, und im Bereich der organisierten Zivilgesellschaft bestehen unterschiedliche Positionen zu CCS – von kritisch bis befürwortend. Beispielsweise setzt sich das UBA kritisch mit möglichen Risiken für Mensch und Umwelt, die sich aus dem Einsatz von CCS ergeben können, auseinander und formuliert in einem Hintergrundpapier Anforderungen an den sicheren und umweltgerechten Einsatz von CO₂-Abscheidung, -Transport und -Deponierung (UBA, 2009)⁶⁶. Während sich einige NGOs (insbesondere in der Vergangenheit) teils sehr deutlich gegen den Einsatz von CCS ausgesprochen haben (z. B. Greenpeace⁶⁷), plädieren andere zumindest im Industriesektor für eine Prüfung des Einsatzes von CCS und CCU als mögliche Klimaschutztechnologie (z. B. Germanwatch⁶⁸). Wiederum andere NGOs sprechen sich klar für den Einsatz von CCS aus, da sie der festen Überzeugung sind, dass der menschengemachte Klimawandel nicht ohne CCS wirkungsvoll eingedämmt werden kann (z. B. Bellona⁶⁹). Die gesellschaftliche Akzeptanz von CCS in Deutschland für als unvermeidbar angesehene industrielle CO₂-Mengen (z. B. aus der Zementindustrie) ist derzeit unklar. Die Akzeptanz für eine Verpressung von CO₂ aus fossilen Stromerzeugungsquellen war in der Vergangenheit sehr gering. Ob und inwiefern sich daraus Rückschlüsse auf die gesellschaftliche Akzeptanz bzgl. industrieller CO₂-Mengen und die heutige Situation mit weiter verschärftem Handlungsdruck bzgl. Klimaschutz ziehen lassen, ist von wissenschaftlicher Seite bisher nicht geklärt.

3.2.4.4 CO₂-Infrastruktur

Für den Abtransport der in einem Zementwerk entstehenden CO₂-Mengen bestehen prinzipiell vier Möglichkeiten: LKW, Zug, (Binnen-)Schiff und Pipeline. Die Möglichkeiten unterscheiden sich hinsichtlich Kosten und weiterer Eigenschaften (Kontinuität des Transports,

⁶⁴ Zum Vergleich: die globalen CO₂-Emissionen aus Energiebereitstellung und industriellen Prozessen betragen im Jahr 2021 36,3 Gt CO₂ (www.iea.org/reports/global-energy-review-co2-emissions-in-2021-2)

⁶⁵www.carbfix.com/codaterminal

⁶⁶ UBA 2021: www.umweltbundesamt.de/themen/wasser/gewaesser/grundwasser/nutzung-belastungen/carbon-capture-storage#grundlegende-informationen

⁶⁷ Greenpeace 2011: www.greenpeace.de/themen/endlager-umwelt/co2-endlagerung/mogelpackung-ccs

⁶⁸ Germanwatch 2017: www.germanwatch.org/de/stichwort/ccs

⁶⁹ Bellona 2021: www.bellona.org/about-ccs/bellona-and-ccs

Erweiterbarkeit der Kapazität, Veränderbarkeit der Transportwege, Betriebsrisiken wie Trockenheit/Hochwasser, erforderlicher Reinheitsgrad des CO₂), wobei die spezifischen Kosten wiederum von verschiedenen Faktoren abhängig sind (u.a. Entfernung, Transportmengen, Terrain).

Tabelle 5 bietet eine Übersicht über die benötigten Transportmittel für den Abtransport des CO₂ von Zementwerken verschiedener Größe unter der Annahme einer Abscheiderate von 90%. Für die CO₂-Mengen, die bei einer großskaligen CO₂-Abscheidung an einem Zementwerk anfallen, wird der Einsatz von LKWs hier aus Kostengründen sowie aufgrund der damit einhergehenden Verkehrs- und sonstigen Umweltbelastungen ausgeschlossen. Für kleine und ggf. mittlere Zementwerke könnten Züge und Binnenschiffe eine gangbare Option für den CO₂-Abtransport darstellen. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass nur wenige Zementwerke in Deutschland einen direkten Zugang zu einem Binnenschiffahrtsweg haben, der von ausreichend großen Schiffen befahren werden darf. Ein Abtransport per Binnenschiff ab Werk ist daher in der Praxis nur in wenigen Fällen eine Option.

Tabelle 5: Benötigte CO₂-Transport-Kapazitäten

	Zu transportierende CO ₂ -Menge	Anzahl benötigter LKW (20 t)	Anzahl benötigter Züge (2 kt)	Anzahl benötigter Binnenschiffe (4 kt)	Innendurchmesser Pipeline
Kleines Zementwerk	120 kt / a	6.000 LKW / a	60 Züge / a	30 Schiffe / a	4 Zoll
Mittleres Zementwerk	500 kt / a	25.000 LKW / a	250 Züge / a	125 Schiffe / a	6 Zoll
Großes Zementwerk	1000 kt / a	50.000 LKW / a	500 Züge / a	250 Schiffe / a	8 Zoll

Quelle: eigene Berechnungen des Wuppertal Instituts

Zudem ist zu berücksichtigen, dass ein multimodaler Transport⁷⁰ i.d.R. beim Wechsel des Transportmittels eine Veränderung an der Beschaffenheit des CO₂ (hinsichtlich Druck und Temperatur, ggf. Reinheit) erfordert. Ggf. werden auch weitere Infrastrukturen wie z. B. Zwischenspeicher erforderlich. All dies ist mit Energieaufwand und Kosten verbunden. Daher wird i.d.R. eine Minimierung der Transportmittelwechsel entlang des Transportwegs angestrebt.

Langfristig ist daher davon auszugehen, dass für einen Transport von CO₂-Mengen aus einer Abscheidung im industriellen Maßstab an den meisten Standorten aus technischer und wirtschaftlicher Sicht eine CO₂-Pipeline die zu bevorzugende Transportmöglichkeit darstellt.

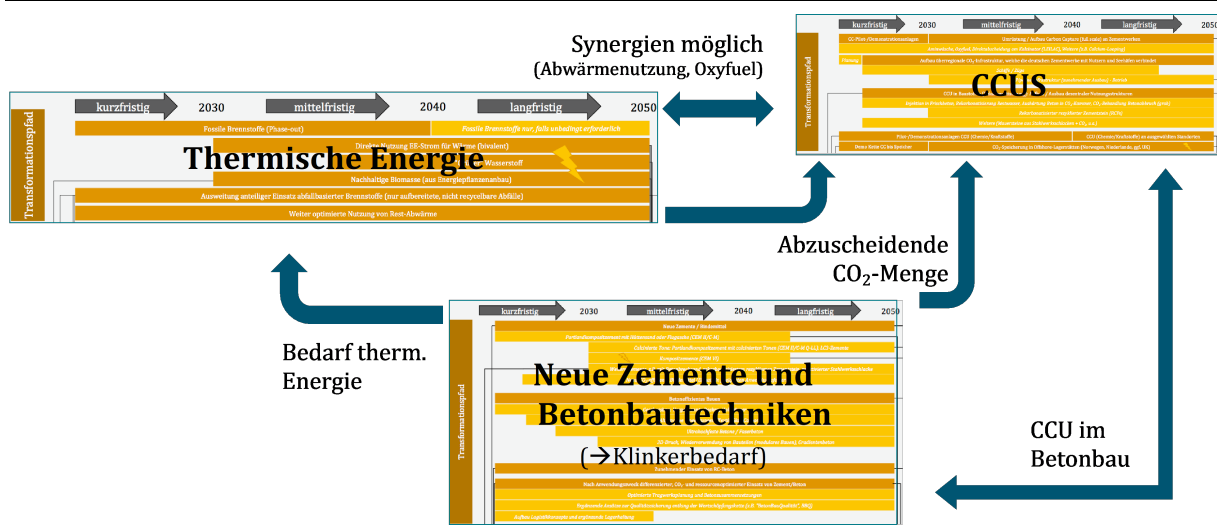
3.2.5 Wechselwirkungen zwischen technologischen Teilbereichen

Zwischen den zuvor dargestellten Technologiebereichen „Bereitstellung thermischer Energie“, „Neue Zemente und Betonbautechniken“ und „CO₂-Abscheidung und Nutzung oder Speicherung“ bestehen Wechselwirkungen, die in Abbildung 16 dargestellt sind: Die Minderung des Klinkerbedarfs durch Ansätze aus dem Bereich „Neue Zemente und Betonbautechniken“ bestimmt zum einen den Bedarf an thermischer Energie und zum anderen die Menge der entstehenden prozessbedingten CO₂-Mengen. Die Wahl der Energieträger für die Bereitstellung der thermischen Energie ist wesentlich für die brennstoffbedingten CO₂-Mengen. Das Zusammenspiel dieser beiden Technologiefelder bestimmt daher die Menge des CO₂, welches

⁷⁰ Multimodal meint unter Verwendung verschiedener Transportmittel, also z. B. zuerst Zug, dann Pipeline, dann Hochseeschiff.

abgeschieden, ggf. transportiert und genutzt oder gespeichert werden muss. Der Grad der Umsetzung verschiedener Minderungshebel aus dem Bereich der neuen Zemente und Betonbautechniken bestimmt das Potenzial für die dauerhafte Bindung von CO₂ durch Mineralisierung im Betonbau („CCU im Betonbau“). Zwischen den Teilbereichen „Bereitstellung thermischer Energie“ und der CO₂-Abscheidung bestehen verschiedene mögliche Synergien. So kann ggf. vorhandene Abwärme aus der Bereitstellung thermischer Energie für eine Aminwäsche genutzt werden bzw. bietet die Sauerstoffatmosphäre des Oxyfuel-Verfahrens aufgrund ihrer höheren Flammentemperaturen möglicherweise Vorteile beim Einsatz von Brennstoffen mit niedrigem Heizwert.

Abbildung 16: Wechselwirkungen zwischen technologischen Teilbereichen



Quelle: eigene Darstellung, Wuppertal Institut

3.3 Treiber und Hemmnisse

Die im folgenden aufgeführten Treiber und Hemmnisse wurden aus den durchgeführten Interviews und Stakeholderworkshops (s. Kapitel 2.3 und 2.4) abgeleitet.

3.3.1 Treiber

3.3.1.1 CO₂-Preis

Der Zementmarkt ist in erster Linie geprägt durch den preislichen Wettbewerb. Spezielle Produkteigenschaften spielen hingegen für die allermeisten Anwendungen eine untergeordnete Rolle. Entsprechend ist die Wirtschaftlichkeit einer CO₂-verminderten oder -neutralen Zementherstellung im Vergleich zur konventionellen Produktion ein zentraler Aspekt für die Skalierbarkeit entsprechender CO₂-Minderungsansätze in einem durch Preiswettbewerb geprägten Industriesektor.

Ein wesentlicher Treiber für die Dekarbonisierung der Zementherstellung ist daher ein (voraussichtlich) weiter steigender CO₂-Preis im Rahmen des EU-Emissionshandels, da er die Wirtschaftlichkeit von Produktionsweisen mit niedrigen CO₂-Emissionen gegenüber einer konventionellen Produktion verbessert. Dieser Treiber für eine fortschreitende Dekarbonisierung der Zementindustrie wirkt dabei übergreifend über alle oben skizzierten Minderungsansätze.

Es ist jedoch zu beachten, dass für viele der skizzierten Minderungsansätze entsprechende anderweitige Voraussetzungen bestehen müssen (z. B. Verfügbarkeit erneuerbarer Energien

oder einer CO₂-Infrastruktur), damit diese umgesetzt werden können und ein steigender CO₂-Preis seine Wirkung entfalten kann. Außerdem müssen mit innovativen Verfahren zur Bereitstellung thermischer Energie sowie mit neuen Zementen, Bindemitteln und Betonbautechniken zunächst Erfahrungswerte gesammelt werden, bevor eine Skalierung in den Massenmarkt erfolgen kann. Und es müssen Erfahrungen entlang der CCUS-Kette gemacht und Regelwerke für CCUS etabliert werden, um einen Hochlauf dieser Verfahren vorzubereiten. Entsprechend erscheinen, in Ergänzung zum CO₂-Preis, nachfrageorientierte Ansätze erforderlich, um einen Markthochlauf vorzubereiten. Zudem muss dem Risiko von Carbon-Leakage durch geeignete Maßnahmen entgegengewirkt werden.

3.3.1.2 Weitere Treiber

Neben diesem generischen Treiber wurden im Rahmen des Projekts verschiedene weitere Treiber herausgearbeitet, die spezifischer auf bestimmte Minderungsoptionen wirken.

Die Digitalisierung unterstützt den effizienten Einsatz von Zementklinker entlang der Wertschöpfungskette Betonbau, z. B. durch den Einsatz von Building Information Modeling (BIM) oder einer verbesserten, durch künstliche Intelligenz unterstützten Kontrolle des Zementherstellungsprozesses.

Ein zunehmendes Bewusstsein für die Relevanz einer Kreislaufwirtschaft auch im Bauwesen unterstützt Ansätze für das Recycling von Betonabbruch und von Betonbauteilen.

Im Bereich CCUS ist der mögliche zukünftige Kohlenstoffbedarf der deutschen Chemie- und Kraftstoffindustrie ein Antrieb für die Entwicklung entsprechender CCU-Verfahren. Die Erschließung von CO₂-Speicherstätten und der Aufbau von CO₂-Transportinfrastrukturen im europäischen Ausland ermöglichen und befördern Überlegungen deutscher Zementwerke hinsichtlich einer Speicherung von CO₂ im europäischen Ausland.

Ein spezifischer Treiber für den Einsatz abfallbasierter Brennstoffe ist eine steigende Verfügbarkeit von Kunststoffabfällen aufgrund in der Vergangenheit gesteigener Kunststoff-Produktionsmengen und der Erwartung, dass die entsprechenden Produkte nach der Nutzungsphase als Abfallstoffe zur Verfügung stehen. Zudem ist aufgrund des Ausstiegs aus der Kohleverstromung mit einem Rückgang des Einsatzes dieser Abfälle in Kohlekraftwerken zu rechnen. Ob bzw. in welchem Umfang diese (zusätzlichen) Kunststoffabfallmengen tatsächlich für einen Einsatz in der Zementindustrie zur Verfügung stehen hängt jedoch auch mit der Entwicklung alternativer Verwertungsverfahren zusammen (s. u.).

3.3.2 Hemmnisse

3.3.2.1 Begrenzte Verfügbarkeit und hohe Kosten von Energieträgern

In Kapitel 3.2.2 wurden die Einsatzmöglichkeiten CO₂-freier bzw. CO₂-armer Energieträger in der Klinkerherstellung skizziert. Bzgl. der technischen Machbarkeit einer Direktelektrifizierung im industriellen Maßstab sowie bzgl. des maximal möglichen Anteils von H₂ an der Energiebereitstellung besteht noch Forschungsbedarf.

Ein wesentliches Hemmnis für eine mittelfristige Nutzung CO₂-freier bzw. CO₂-armer Energieträger stellen aus heutiger Sicht jedoch v.a. auch die (mindestens für eine Übergangszeit) im Vergleich zu fossilen Brennstoffen hohen Preise für (erneuerbaren) Strom und Wasserstoff dar. Diese Preise spiegeln die begrenzte Verfügbarkeit dieser Energieträger und die Konkurrenz mit anderen Sektoren um deren Verwendung wider. Auch die Menge nachhaltiger Biomasse ist begrenzt und voraussichtlich wird auch hier zukünftig (weiterhin) eine Konkurrenzsituation mit anderen potenziellen Nutzern bestehen.

Ein hoher Wasserstoff- bzw. Strombedarf entsteht auch durch eine CO₂-basierte Herstellung von Grundstoffchemikalien und Kraftstoffen. Auch hier stellt sich die Frage, aus welchen Quellen die erforderlichen Energiemengen (kostengünstig) bereitgestellt werden könnten. Eine vollständige inländische Bereitstellung der benötigten Mengen grünen Elektrolysestroms, die für eine CO₂- und H₂-basierte inländische Produktion von chemischen Grundstoffen und Kraftstoffen im großen Maßstab erforderlich wäre, erscheint aus heutiger Sicht nicht möglich. Ein umfangreicher Einsatz von CCU für die Herstellung von chemischen Grundstoffen und Kraftstoffen in Deutschland wäre daher auf Importe erheblicher Mengen grünen Wasserstoffs angewiesen. Wann entsprechende Importstrukturen realisiert werden, ist noch offen.

Ein weiteres Hemmnis für den Einsatz von Strom und Wasserstoff stellen möglicherweise unzureichende Infrastrukturen dar. Eine Direktelektrifizierung eines signifikanten Teils der thermischen Energiebereitstellung oder der Betrieb eines Elektrolyseurs würden den Bezug deutlich größerer Strommengen erfordern, als dies heute für Zementwerke üblich ist. Entsprechend müsste die Strominfrastruktur am Standort ausgebaut werden, und es müsste geprüft werden, ob das vorgelagerte Verteilnetz den Anforderungen gewachsen ist oder ebenfalls angepasst werden müsste. Bzgl. des Bezugs von Wasserstoff an Standorten der Zementindustrie ist aus heutiger Sicht noch offen, ob die räumliche Ausdehnung einer zukünftigen H₂-Infrastruktur Zementwerke abseits industrieller Cluster umfassen wird.

Bzgl. des Einsatzes abfallbasierter Brennstoffe ist langfristig ggf. mit einer sinkenden Menge und einer schlechteren Qualität der für abfallbasierte Brennstoffe verfügbaren Abfälle zu rechnen, da für etliche Abfallfraktionen eine anderweitige Verwertung voraussichtlich möglich wird, eine abnehmende Gesamtmenge zu erwarten ist, oder eine (zunehmende) anderweitige Verwertung angestrebt wird. Zu nennen ist insbesondere eine mögliche zukünftige Verwertung kunststoffstämmiger Abfälle, die mit heutiger Technik nicht rezykliert werden können, durch chemisches Recycling (Pyrolyse, Gasifizierung). Entsprechend würde sich die Menge nicht rezyklisierbarer kunststoffstämmiger Abfälle, die für die Herstellung von abfallbasierten Brennstoffen genutzt werden können, vermindern.⁷¹ Des Weiteren wird eine Verminderung der biogenen Abfallmengen in Siedlungsabfällen durch eine verbesserte getrennte Erfassung von Bioabfällen angestrebt. Bzgl. der verbleibenden Abfallmengen werden auch zukünftig andere Verwerter potenzielle Konkurrenten für deren Nutzung sein – z. B. Müllverbrennungsanlagen (auch im europäischen Ausland) und sich derzeit im Bau befindliche Klärschlamm-Monoverbrennungsanlagen mit Phosphorrückgewinnung.

3.3.2.2 Begrenzte Verfügbarkeit geeigneter Ausgangsstoffe

Die Produktionsmengen heute etablierter klinkereffizienter Zemente – Portlandhüttenzemente, Portlandflugaschezemente und Hochofenzemente – werden mittelfristig aufgrund rückgängiger bzw. gänzlich wegfallender Mengen an Hütten sand und Flugasche zurückgehen. Der Wegfall dieser Klinkerersatzstoffe limitiert ebenso die maximal möglichen Produktionsmengen einiger neuer Zemente: Hütten sand- bzw. flugaschehaltige Portlandkompositzemente sowie Kompositzemente.

Für den Einsatz von Portlandkompositzementen mit calcinierten Tonen stellt neben einem erforderlichen Erfahrungsaufbau in der Anwendung insbesondere die Bereitstellung geeigneter Tone in ausreichend großen Mengen zumindest in der kurzen bis mittleren Frist eine Herausforderung dar. Prinzipiell sind geeignete Tone in Deutschland vorhanden, und es könnten

⁷¹ Es ist denkbar, dass Reststoffe aus dem chemischen Recycling für abfallbasierte Brennstoffe genutzt werden könnten, und hier also ggf. auch Synergien entstehen. Es ist jedoch zu erwarten, dass die für abfallbasierte Brennstoffe verfügbare Energiemenge durch eine großskalige Einführung eines chemischen Recyclings von Kunststoffabfällen in Summe kleiner würde.

entsprechend Tongruben in Deutschland genutzt bzw. erschlossen werden.⁷² Auch ein Import von Tonen ist denkbar.⁷³

Eine begrenzte Verfügbarkeit geeigneter Ausgangsstoffe wurde von einigen Akteuren und Akteurinnen auch als Hemmnis für die Ausweitung des Einsatzes von RC-Beton⁷⁴ genannt. Prinzipiell ist Betonabbruch in großen Mengen vorhanden. Dieser wird jedoch Stand heute primär anderweitig genutzt, v.a. als Downgrade im Straßenbau.

Für die verschiedenen Verfahren zur Mineralisierung von CO₂ werden geeignete Ausgangsstoffe benötigt, die entsprechende Mengen an reaktiven Komponenten (CaO, MgO) enthalten (National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2019). Dies können z. B. Flugaschen oder Hüttsand sein, deren Gesamtmengen jedoch begrenzt und zukünftig abnehmend sind, und die heute schon umfassend in der Zement- und Betonindustrie genutzt werden. Wesentliche (zusätzliche) Quellen größerer Mengen geeigneter Ausgangsstoffe könnten Betonabbruch sowie industrielle Schlacken (z. B. Stahlwerksschlacken) sein. Es ist jedoch noch in Erforschung, welche dieser Stoffe für welche Nutzungen geeignet sind und wie sie hierfür aufbereitet werden müssen. Je geringer die Massenanteile reaktiver Komponenten an den Ausgangsstoffen sind, desto mehr spielen auch Fragen rund um die Transportwürdigkeit der Ausgangsstoffe eine Rolle (z. B. bei rezyklierter Gesteinskörnung aus Betonabbruch).

3.3.2.3 Fehlende Wirtschaftlichkeit

Viele der in Kapitel 3.2 diskutierten CO₂-Minderungsansätze gehen mit erhöhten Produktionskosten einher. Dies betrifft z. B. den Einsatz erneuerbarer anstelle fossiler Energieträger, Kosten für CCUS sowie ggf. einige Ansätze aus dem Bereich der neuen Zemente, Bindemittel und Betonbautechniken. Zudem sind die monetären Anreize für einen Einsatz von CO₂-effizienten Verfahren heute begrenzt. In einem durch preislichen Wettbewerb gekennzeichneten Markt stellt eine fehlende Wirtschaftlichkeit gegenüber einer konventionellen Produktion bzw. Bauweise oder gegenüber Importen aus dem (außereuropäischen) Ausland ein zentrales Hemmnis für die Einführung CO₂-effizienter Bindemittel, Zemente, Betone und Bautechniken dar. Die Wirtschaftlichkeit von CO₂-effizienten Bindemittel, Zementen, Betonen und Betonbautechniken kann und wird sich im Zeitverlauf durch einen steigenden CO₂-Preis, sich ändernde Energieträgerpreise und Lerneffekte verändern.

3.3.2.4 Herausforderungen bei der Integration in die Baupraxis

Für neue Zemente und Bindemittel mit bautechnischen Eigenschaften, die von heute üblichen Zementen abweichen, sowie für klinkereffiziente Betonbautechniken bestehen Hemmnisse für deren Integration in die Baupraxis. CO₂-effizientes Bauen ist nicht Teil der Ausbildung bzw. des Leistungskatalogs⁷⁵ von Tragwerksplanern und Architekten, so dass diesbezüglich von einem Informationsdefizit bei Planern und Planerinnen und Architekten und Architektinnen und i.d.R. von einem geringen Kenntnisstand im Bereich klinkereffizientes Bauen ausgegangen werden muss. Zudem ist heute der CO₂-Fußabdruck eines Bauwerks für die Planer*innen i.d.R. nicht „sichtbar“, da er standardmäßig nicht errechnet und in den Gebäudedaten nicht aufgeführt wird. Er wird entsprechend in der Planung heute i.d.R. nicht berücksichtigt.

Die Verwendung neuer Zemente und Bindemittel erfordert deren nach Anwendungszweck differenzierten Einsatz (s. Kapitel 3.2.3.5) und entsprechend eine Gewährleistung, dass das

⁷² Inwieweit geeignete Tone aus bestehenden Tongruben gefördert werden könnten oder neue Gruben erschlossen werden müssten, ist den Autoren nicht bekannt.

⁷³ Nach (Scrivener et al., 2018) fallen in China und Indien geeignete Tone als Abfallstoffe bei der Gewinnung anderer Stoffe an.

⁷⁴ Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung.

⁷⁵ Vgl. die Honorarordnung für Architekten und Ingenieure – HOAI. www.hoai.de

jeweilige Bindemittel und die daraus hergestellten Betone (nur) für die dafür vorgesehenen Bauteilen verwendet werden. Hierbei werden entlang der Wertschöpfungskette noch organisatorische und logistische Herausforderungen gesehen.

Die Zement- und Betonnormen sind wesentlich für die Standsicherheit und Dauerhaftigkeit von Bauten. Sie werden von den einschlägigen Akteuren im Konsensverfahren erarbeitet und verabschiedet, und die Überarbeitung einer Norm dauert i.d.R. mehrere Jahre. Die Normen folgen heute einem deskriptiven Ansatz, d.h. die Zusammensetzung von Zementen und Betonen (z. B. maximaler Wasserzementwert, Mindestzementgehalt) werden festgelegt und verschiedenen Anwendungsbereichen gegenübergestellt. Dieses deskriptive Vorgehen in Kombination mit den langen Überarbeitungszyklen der Normen führt dazu, dass innovative Bindemittel und Betone, die (noch) nicht von der Norm abgedeckt sind, zunächst nur auf Basis von aufwändigeren Zulassungsverfahren (projektbezogene Zustimmung im Einzelfall, allgemeine bauaufsichtliche Zulassung) für Bauprojekte genutzt werden können, was die Markteinführung hemmt.

Aufgrund der skizzierten Hemmnisse für die Anwendung neuer Zemente und Bindemittel besteht heute ein nur sehr geringes Marktinteresse an Bindemitteln mit vom Standard abweichenden bautechnischen Eigenschaften.

3.3.2.5 Fehlende Möglichkeiten für Abtransport von CO₂

Die Klinkerherstellung ist an Kalksteinvorkommen angesiedelt, und damit in den meisten Fällen in deutlicher Entfernung von industriellen Zentren sowie der deutschen Seehäfen. Infolgedessen würde für eine CO₂-Speicherung im europäischen Ausland sowie für eine CO₂-Nutzung für die Herstellung von chemischen Grundstoffen und Kraftstoffen an bestehenden Standorten der Raffinerien und Grundstoffchemie ein CO₂-Transport erforderlich und es würde eine CO₂-Infrastruktur benötigt (s. Kapitel 3.2.4.4). Ohne eine solche Möglichkeit zum Abtransport des CO₂ ist der Aufbau einer CO₂-Abscheideanlagen im industriellen Maßstab für ein im Wettbewerb stehendes Unternehmen ein (zu) großes wirtschaftliches Risiko und das Gewinnen von Erfahrungswerten entlang der CCUS-Kette (in Deutschland) und die darauf aufbauende Entwicklung von Standards und Regelwerken nicht möglich. Ein sehr zeitnaher Aufbau einer CO₂-Pipeline-Infrastruktur ist im aktuellen rechtlichen und gesellschaftlichen Rahmen allerdings nicht zu erwarten (s.u.), und wird zudem durch eine heute bestehende Unsicherheit über die räumlichen Zusammenhänge zukünftiger CO₂-Punktquellen und -Abnehmer erschwert.⁷⁶ Demnach kommt für eine Hochlaufphase den anderen Transportmitteln – insbesondere Zug und Schiff – eine wesentliche Rolle zu, um Erfahrungswerte zu sammeln.

3.3.2.6 Gesetzliche und gesellschaftliche Rahmenbedingungen

Für die zu tätigen Investitionen – z. B. in eine CO₂-Abscheideanlage oder spezielle Anlagen für den Einsatz bestimmter abfallbasierter Brennstoffe wie Vorbrennkammern und Anlagen zur Vorvergasung (Zeschmar-Lahl et al., 2020) – wären für die Zementindustrie möglichst stabile Rahmenbedingungen und klare Perspektiven wünschenswert, um eine langfristige Planung tätigen zu können und Fehlinvestitionen zu vermeiden. Dies ist gemäß der im Projekt involvierten Akteuren und Akteurinnen aufgrund der unklaren rechtlichen Rahmenbedingungen, einer fehlenden politischen Steuerung und der (vermuteten) fehlenden gesellschaftlichen Akzeptanz für einige Maßnahmen heute nicht der Fall.

⁷⁶ Für den Bau einer Pipeline, deren Trassenverlauf und maximales Transportvolumen nachträglich nicht mehr verändert werden können, ist eine langfristige Perspektive bzgl. der CO₂-Quellen und -Abnehmer erforderlich. Es ist aus heutiger Sicht jedoch insbesondere unklar, ob und falls ja in welchen Mengen die deutsche Chemie- und Kraftstoffindustrie CO₂ aus der Zementindustrie nutzen kann und möchte. Zudem stellt sich die Frage, ob langfristig bei einer angestrebten hohen Klinkereffizienz und einem damit sinkenden Klinkerbedarf noch alle heutigen Klinkerproduktionsstandorte in Betrieb bleiben.

Insbesondere für den Einsatz von CCUS ist der heutige gesetzliche Rahmen unzureichend. Dies wird in Kapitel 6 weiter ausgeführt. Es ist – aus Analogieschlüssen zu anderen Infrastrukturprojekten wie dem Ausbau des Stromübertragungsnetzes – zudem davon auszugehen, dass für den Aufbau von CO₂-Pipeline-Infrastrukturen insbesondere auf der lokalen Ebene bei einigen Akteuren (zunächst) keine Akzeptanz bestehen dürfte. Sofern nicht durch geeignete Maßnahmen eine Akzeptanz entsteht, ist beim Aufbau einer Pipeline-Infrastruktur mit langwierigen (gerichtlichen) Auseinandersetzungen zu rechnen.

Auch bzgl. des Einsatzes von abfallbasierten Brennstoffen wurde im Rahmen des Projekts auf Hemmnisse durch gesetzliche Rahmenbedingungen hingewiesen. So sind die biogenen Anteile abfallbasierter Brennstoffe im Rahmen des EU-Emissionshandels nicht anrechnungsfähig, da der Nachweis der Nachhaltigkeit dieser Biomasse-Brennstoffe gemäß den gültigen Kriterien nicht zu leisten ist. Zudem wurden von einigen Akteuren hohe bürokratische Hürden für den Einsatz (mancher) Abfallstoffe bemängelt.

Bei einer CO₂-effizienten bzw. CO₂-neutralen Bauweise ist mit insgesamt höheren Kosten im Vergleich zur konventionellen Produktion zu rechnen, insbesondere für eine Übergangsphase des Markthochlaufs und des Aufbaus entsprechender Strukturen. Für die Zementindustrie wären klare politische und gesellschaftliche Signale, dass die Bereitschaft besteht, entsprechende Mehrkosten zu tragen, hilfreich, um Investitionsentscheidungen für CO₂-arme Produktionsweisen zu treffen.

3.4 Handlungsfelder

Die Handlungsfelder für eine Dekarbonisierung der Zementindustrie ergeben sich v.a. aus den oben diskutierten Hemmnissen und zielen darauf ab, diese Hemmnisse zu überwinden.

3.4.1 Regulatorische Rahmenbedingungen

Um CCUS-Projekte zu ermöglichen und so den Boden für den Markthochlauf zu bereiten, ist eine Anpassung der rechtlichen Rahmenbedingungen und die Beseitigung rechtlicher Hürden erforderlich (vgl. Kapitel 6).

Zudem sind für eine zukünftig möglichst weitgehende Nutzung nicht rezyklierbarer Abfallmengen in abfallbasierten Brennstoffen bei sich zukünftig ändernden Abfallaufkommen die heute bestehenden gesetzlichen Rahmenbedingungen kontinuierlich weiterzuentwickeln.

3.4.2 Schaffung und Erhalts eines Level-Playing Fields

Aus der heute fehlenden Wirtschaftlichkeit vieler CO₂-effizienter Bindemittel, Zemente, Betone und Betonbautechniken ergibt sich der Bedarf der Schaffung und des Erhalts eines Level-Playing Fields, in welchem diese Ansätze wirtschaftlich sind und sowohl gegenüber der Konkurrenz aus konventioneller Produktion als auch gegenüber Importen aus Nicht-EU Ländern bestehen können. Dies kann zeitweise auch das Abfedern erhöhter CAPEX (Investitionskosten) und OPEX (Betriebskosten) umfassen, solange der wettbewerbliche Rahmen (insbesondere die Höhe des CO₂-Preises) eine solche Wirtschaftlichkeit ohne zusätzliche Maßnahmen noch nicht ermöglicht.

3.4.3 Integrierte, sektorübergreifende Energiestrategie

Um Richtungssicherheit bzgl. der Verfügbarkeit knapper CO₂-neutraler Energieträger für die Zementindustrie zu schaffen, erscheint eine nationale, integrierte Energiestrategie sinnvoll, die einen Orientierungsrahmen für die Allokation knapper erneuerbarer Energiemengen bietet. Diese könnte auf Energiesystemszenarien aufbauen und sollte partizipativ entwickelt und weiterentwickelt werden. Unter anderem sollte Orientierung geschaffen werden für welche Art

von Anwendungen und nach welchen Kriterien zukünftig nachhaltige Biomasse eingesetzt werden soll.

Ein weiteres Handlungsfeld ist die Planung von Strom- und H₂-Infrastrukturen unter Beteiligung der Zementindustrie sowie ggf. anderen Akteuren, die das CO₂ aus der Zementindustrie nutzen würden und für die Nutzung Wasserstoff benötigen.

3.4.4 Fördern von und Schaffen von Märkten für CO₂- und ressourceneffizientes Bauen

Als zentrales Handlungsfeld für einen klinker- und ressourceneffizienten Betonbau wurde im Rahmen des Projekts zum einen das Schaffen von Märkten bzw. das Fördern von CO₂-effizienten Bauweisen identifiziert. Dies kann – im Sinne der Schaffung eines Level-Playing Fields, s.o. – das Abfedern erhöhter Kosten solcher Ansätze umfassen, wo dies ggf. erforderlich ist. Zudem sollten Bauherren für das Thema „graue Emissionen“⁷⁷ sensibilisiert werden, da diese bei den Entscheidungen über Bauentwürfe heute i.d.R. noch nicht betrachtet werden. Eine besondere Rolle kommt der öffentlichen Hand als Bauherrn zu, die eine Vorreiter- und Vorbildrolle einnehmen kann. Eine nachhaltige öffentliche Beschaffung, d.h. die Selbstverpflichtung des Staats und staatseigener Unternehmen bei Bauprojekten, klimafreundliche Materialien zu verwenden, wurde im Projekt als zentraler Ansatzpunkt für die Schaffung einer Nachfrage nach klima- und ressourcenfreundlichen Bindemitteln, Betonen und Bauweisen identifiziert.

3.4.5 Integration von neuen Zementen, Bindemitteln, Betonen und Bautechniken in die Baupraxis

Zum anderen ist die Integration von neuen Zementen, Bindemitteln, Betonen und Bautechniken in die Baupraxis ein zentrales Handlungsfeld. Dies umfasst die kontinuierliche Anpassung von Normen und Standards an ein dynamisches, sich stetig weiterentwickelndes Portfolio von Technologien und Produkten. Um innovative Ansätze, die zum Zeitpunkt der Erstellung eines Regelwerks ggf. noch nicht mitbedacht wurden, zukünftig den Marktzugang auch ohne (langwierige) Überarbeitung der einschlägigen Regelwerke zu ermöglichen bzw. zu erleichtern, könnte in diesen Regelwerken zukünftig verstärkt auf performance-basierte Nachweise anstelle der heute vorherrschenden deskriptiven Vorgaben gesetzt werden.

Als zentrales Instrument für die Bauplanung und für die vergleichende Bewertung der Klimafreundlichkeit verschiedener Bauweisen wurde im Projekt mit breiter Zustimmung der Akteure und Akteurinnen die Berechnung und Ausweisung des CO₂-Fußabdrucks von Gebäuden angesehen (vgl. Kapitel 6).

Um die heute bestehenden Kenntnislücken zu klinker- und ressourceneffizientem Bauen bei Tragwerksplanern und -planerinnen, Architekten und Architektinnen, Bauherren und Bauherrinnen und anderen Akteuren und Akteurinnen aus der Praxis zu verkleinern und um einen dauerhaften Informationsfluss in diesem dynamischen Feld zu gewährleisten, sollten Informations- und Qualifikationsangebote zu diesem Themengebiet ausgeweitet werden.

3.4.6 Kreislaufwirtschaft im Bauwesen

Ein großer Teil des Betonabbruchs wird Stand heute primär (im Sinne eines Downcyclings) in anderen Sektoren, v.a. dem Straßenbau, verwertet. Ein kleinerer Teil wird zur Verfüllung von Abgrabungen und auf Deponien genutzt, und ein noch kleinerer Anteil wird deponiert. Für die Herstellung von RC-Beton sowie für einige Verfahren zur CO₂-Nutzung durch Mineralisierung (z. B. RCFs) können prinzipiell verschiedene Fraktionen von Betonabbruch genutzt werden

⁷⁷ Emissionen aus der Herstellung von Baumaterialien.

(s.o.). Die Entwicklung einer verstärkten Kreislaufwirtschaft im Betonbau bietet demnach die Chance wertvolle Ressourcen zu einem größeren Anteil und höherwertig zu nutzen. Hierbei sind jedoch Wechselwirkungen mit dem Ressourceneinsatz in anderen Sektoren sowie energetische Aufwände und THG-Emissionen – insbesondere der erforderlichen Logistik – zu berücksichtigen.

3.4.7 Planung und der Aufbau einer CO₂-Transportinfrastruktur

Die Planung und der Aufbau einer CO₂-Transportinfrastruktur sind zentral, um den Akteuren der Zementindustrie Planungssicherheit zu geben und Investitionen in CO₂-Abscheideanlagen zu ermöglichen. Hierbei gilt es sowohl technische als auch nicht-technische Zugangsvoraussetzungen festzulegen sowie anzuschließende Standorte, Trassenverläufe und zu transportierende CO₂-Mengen zu planen (vgl. Kapitel 6).

3.4.8 Gesellschaftlicher Dialog zu CO₂-Infrastrukturen

Um für gesellschaftliche Akzeptanz für CCUS und die damit verbundenen CO₂-Infrastrukturen zu werben sind ein gesellschaftlicher Diskurs und Beteiligungsprozesse essentiell. Hierbei sollte eine klare Kommunikation über die Ziele und Entscheidungsbefugnisse der beteiligten Akteure gewährleistet werden (vgl. Kapitel 6).

3.4.9 Forschung und Entwicklung

Ein Handlungsfeld, das von der Industrie selbst adressiert werden kann, ist die (weitere) Forschung und Entwicklung. Dies umfasst die Bereiche Direktelektrifizierung und Wasserstoffeinsatz für die Bereitstellung thermischer Energie. Die Markteinführung und Skalierung von CCUS erfordern zudem weitere Forschung und Entwicklung (F&E), z. B. zur werksinternen energetischen Integration von CO₂-Abscheideanlagen. Auch im Bereich der neuen Bindemittel, Zemente, Betone und Bautechniken sind weitere Forschung und Entwicklung essentiell, um die Klinkereffizienz des Betonbaus weiter zu verbessern.

Forschung und Entwicklung sind auch essentiell, um neuartige Optionen für eine dauerhafte Bindung von CO₂ zu identifizieren und zur Marktreife zu bringen. Hierfür ist (zunächst) primär noch durch die öffentliche Hand geförderte Grundlagenforschung erforderlich.

4 Eckpunkte für eine Roadmap zur Dekarbonisierung der Zementindustrie

Die im Kapitel 3 ausgeführten Visionselemente, Technologien, Treiber, Hemmnisse und Handlungsfelder wurden im Rahmen des Projekts in Roadmaps überführt, um diese in einen zeitlichen Zusammenhang zu stellen. Es wurden zunächst drei „Detail-Roadmaps“ entlang der in Kapitel 3.2 unterschiedenen Technologiebereiche „Bereitstellung thermischer Energie“, „Neue Zemente und Betonbautechniken“ (inklusive neuer Bindemittel) sowie „CO₂-Abscheidung und Nutzung oder Speicherung“ erstellt, und diese anschließend zu einer (vierten) „Gesamt-Roadmap“ verdichtet.

Die vier Roadmaps stellen aus Sicht des Projektteams die Synthese der Ergebnisse der vielfältigen Diskussion mit den Stakeholdern und Stakeholderinnen sowie eigener Analysen des Projektteams dar und wurden (in einer Draft-Version) im Rahmen des zweiten Stakeholderdialogs gegen Ende des Projekts vorgestellt und diskutiert. Dennoch spiegeln die Roadmaps nicht notwendigerweise in jedem Detail die Sichtweise aller Teilnehmerinnen und Teilnehmer der Workshops oder aller interviewten Expertinnen und Experten wider. Aspekte, zu denen in den Workshops abweichende Perspektiven besonders deutlich wurden, sind in den Roadmaps markiert (s. „Blitz“-Symbole) und die unterschiedlichen Perspektiven werden für diese Fälle im Folgenden skizziert.

Die in der Gesamt-Roadmap in Abbildung 17 dargestellten Entwicklungen werden im Folgenden erläutert, die Darstellung der über die Gesamt-Roadmap hinausgehenden, spezifischen Aspekte der Detail-Roadmaps erfolgt im Kapitel 5. Für eine ausführlichere Darstellung einzelner inhaltlicher Aspekte sei auf Kapitel 3 verwiesen.

Bei den Handlungsfeldern sind in der Roadmap den Maßnahmen jeweils bis zu neun verschiedene Akteursgruppen in Form von Icons zugeordnet, die aus Sicht des Projektteams entweder hauptverantwortlich für die Umsetzung der jeweiligen Maßnahme sind (= Hauptakteure) oder die zumindest in den fachlichen und politischen Austausch und in Konsultationsprozesse mit eingebunden werden sollten (= Nebenakteure). Haupt- und Nebenakteure sind durch einen senkrechten Strich „|“ voneinander getrennt. In Tabelle 6 werden die Icons den Akteursgruppen zugeordnet und erläutert. Eine weitere Differenzierung hinsichtlich der Relevanz der Akteure innerhalb der Haupt- bzw. Nebenkategorie erfolgt nicht. Hier wird immer die gleiche Reihenfolge wie in der erläuternden Tabelle beibehalten.

Abbildung 17: Vision und Roadmap zur Dekarbonisierung der Zementindustrie



Quelle: eigene Darstellung, Wuppertal Institut

Erläuterung zum Symbol „*Weitere Akteure*“ in folgenden Handlungsfeldern:

Integrierte, sektorenübergreifende Energiestrategie: andere Industriebranchen (Stahl, Chemie)









Nischen für / Förderung von CO₂-effizienten Bauweisen: Bauherren

Integration neuer Zemente/Bindemittel/Betone/Bautechniken in die Baupraxis: Bauherren, Bauaufsicht

Planung & Aufbau CO₂-Infrastruktur: Gasnetz-Betreiber

Gesellschaftlicher Dialog zu CO₂-Infrastruktur und lokale Beteiligungsprozesse: Gasnetz-Betreiber

Tabelle 6: Legende zu den Stakeholder-Icons in der Roadmap (Hauptakteure | Nebenakteure)

Icon	Akteursgruppe	Erläuterung
	Zement-Produzenten	Unternehmen der Zementindustrie, die sowohl Klinker als auch Zement herstellen
	Betonhersteller	Unternehmen, deren wirtschaftliche Tätigkeit darin besteht, Zement zu verarbeiten, um Beton herzustellen.
	Planer/Architekten	Akteure, die Bauten im Hoch- und Tiefbau inklusive der eingesetzten Materialien entwerfen und planen und den Bauprozess überwachen.
	Maschinen- und Anlagenbau	Unternehmen, deren wirtschaftliche Tätigkeit darin besteht, Maschinen und Anlagen herzustellen
	Verbände/Fachgremien	Zusammenschluss von Unternehmen, um die Zusammenarbeit eines Wirtschaftszweiges (z. B. gem. NACE) nach innen zu fördern und seine fachlichen und wirtschaftspolitischen Ziele geschlossen nach außen zu vertreten
	Organisierte Zivilgesellschaft	Thematischer Zusammenschluss von BürgerInnen in Form von Vereinigungen mit ideellen und gesellschaftspolitischen Zielsetzungen (z. B. Umweltverbände)
	Politik/Behörden	Staatliche (oder staatlich beauftragte) Personen und Institutionen, die auf der Grundlage der ihnen von der Gesellschaft (z. B. von den Wählern) zuerkannten Befugnisse verantwortlich politische Entscheidungen treffen bzw. diese konkretisieren und umsetzen
	Wissenschaft	Unternehmensunabhängige Experten der Zement- und Betonherstellung sowie der nachgelagerten Betonanwendungen, der Dekarbonisierung der Zementproduktion, der Systemanalyse der Zementindustrie als Teil des Energiesystems, der Akzeptanz- und Umweltforschung sowie ggf. weiterer einschlägiger Fachgebiete
	Weitere Akteure	Weitere Akteure z.B. aus Industriebranchen außerhalb der Zement-, Beton- und Baubranche (z. B. Chemie, Stahl), Hersteller/Verarbeiter von Prozessgasen, Bauherren etc.

4.1 Vision

Das zentrale Element der Vision zur Dekarbonisierung der Zementindustrie bis (spätestens) zum Jahr 2050 ist eine ggü. heute deutliche Minderung der CO₂-Entstehung durch die Klinkerproduktion. Dies umfasst einerseits die Minderung (fossiler) CO₂-Mengen aus der Bereitstellung von Prozesswärme durch einen Wechsel der eingesetzten Energieträger. Zum anderen werden in der Vision die prozessbedingten CO₂-Mengen durch einen möglichst effizienten Einsatz von Klinker entlang der gesamten Wertschöpfungskette und einem dadurch bei gleicher Bauleistung verringerten Klinkerbedarf minimiert. Die Emission der verbleibenden,

nicht vermeidbaren CO₂-Mengen in die Atmosphäre wird durch CCUS (weitgehend⁷⁸) unterbunden. Das abgeschiedene CO₂ wird möglichst dauerhaft gebunden bzw. gespeichert, um dem Kohlenstoffkreislauf der Erde keine zusätzlichen fossilen Kohlenstoffmengen zuzuführen. Dennoch kann es in einzelnen Fällen sinnvoll sein, CO₂ aus der Zementindustrie als Kohlenstoffquelle für andere Sektoren nutzbar zu machen, auch wenn dadurch keine dauerhafte Bindung gewährleistet werden kann.⁷⁹ Nicht vermeidbare CO₂-Restemissionen, z. B. durch unvollständige CO₂-Abscheidung, werden durch negative Emissionen aus der Nutzung biogener Brennstoffe (inkl. biogener abfallbasierter Brennstoffe) in Kombination mit CO₂-Abscheidung und einer dauerhaften Bindung bzw. Speicherung des abgeschiedenen CO₂ kompensiert bzw. überkompensiert – ggf. bis hin zu einem insgesamt klimapositiven Beitrag der Zementindustrie. Die Zement- und Betonindustrie leistet in der Vision zudem einen Beitrag zu einer möglichst weitgehenden Kreislaufwirtschaft und damit zur Ressourceneffizienz. Dies beinhaltet die thermische und stoffliche Nutzung von Abfallstoffen im Klinkerbrennprozess als auch eine umfassende Kreislaufwirtschaft im (Beton-)Bau.

4.2 Transformationspfad

4.2.1 Bereitstellung thermischer Energie

Die Bereitstellung thermischer Energie durch fossile Brennstoffe wird in der Roadmap kontinuierlich verringert und mittel- bis langfristig vollständig aufgegeben. Langfristig kommen fossile Brennstoffe nur in dem (aus heutiger Sicht unwahrscheinlichen und unerwünschten) Fall zum Einsatz, das nicht ausreichend alternative Energieträger verfügbar gemacht werden können.

Als Ersatz fossiler Brennstoffe wird zum einen der anteilige Einsatz abfallbasierter Brennstoffe ausgeweitet, wobei hierfür auch zukünftig nur solche Abfallfraktionen zum Einsatz kommen, die nicht recycelt werden können. Da sich die Abfallzusammensetzung zukünftig weiter ändern und – mit Blick auf Heizwert und Schadstoffe – mit einer im Mittel für die Zementindustrie schlechteren Qualität der Abfälle zu rechnen ist, kommt der Abfallaufbereitung zukünftig eine noch größere Rolle zu.

In Ergänzung zu abfallbasierten Brennstoffen werden in der Roadmap zur Bereitstellung von Prozesswärme möglichst erneuerbare Energieträger genutzt. Für eine direkte Nutzung von (erneuerbarem) Strom sind noch technische Weiterentwicklungen erforderlich. Mit dem elektrifizierten LEILAC-Verfahren existiert jedoch ein vielversprechender Kandidat für die Bereitstellung der am Calcinator⁸⁰ benötigten Prozesswärme, so dass eine direkte Nutzung von Strom aus technischer Sicht mittelfristig zumindest anteilig möglich erscheint. In einem bivalenten Betrieb könnte eine direkte Nutzung von erneuerbarem Strom ggf. auch wirtschaftlich bereits mittelfristig möglich sein. Der Einsatz von (grünem) Wasserstoff im Klinkerbrennprozess ist technisch möglich. Aufgrund der ggü. kohlenstoffbasierten Brennstoffen abweichenden Verbrennungseigenschaften von Wasserstoff ist der maximal mögliche Anteil von H₂ an der Wärmebereitstellung aus heutiger Sicht jedoch begrenzt und Gegenstand von Forschung und Entwicklung. Aufgrund der mindestens kurz- und mittelfristig erwarteten Knappheit von Wasserstoff erfolgt sein Einsatz im Klinkerbrennprozess in der Roadmap erst

⁷⁸ Heutige CO₂-Abscheideverfahren erreichen i.d.R. keine 100%ige CO₂-Abscheidung. Die Abscheiderate aus heutiger Sicht vielversprechender Verfahren liegt jedoch bei 90% oder mehr (Voldsund et al., 2019). Eine Ausnahme stellt das LEILAC-Verfahren (Project LEILAC, 2021) dar, das zwar nur die prozessbedingten Emissionen adressiert, bei dem im Calcinierprozess der Reaktor jedoch fast reines CO₂ abscheiden kann.

⁷⁹ Eine Abwägung im Einzelfall ist erforderlich.

⁸⁰ Auf den Prozessschritt der Calcinierung entfällt ca. 60% des Prozesswärmebedarfs (Agora Energiewende, 2019)

langfristig und nur insofern eine Verfügbarkeit am Standort gegeben ist. Letzteres ist abhängig von der räumlichen Ausdehnung eines zukünftigen H₂-Pipelinennetzes bzw. von der Verfügbarkeit ausreichender (erneuerbarer) Strommengen am Standort. Der Einsatz (nachhaltiger) Biomasse aus dem Anbau von Energiepflanzen⁸¹ ist aus technischer Sicht prinzipiell bis zu 100% der Prozesswärmebereitstellung möglich. Zentrales Kriterium für den Einsatz von Biomasse in der Zementindustrie ist in der Roadmap die Gewährleistung der Nachhaltigkeit der Biomasse. Mittelfristig könnten Bioenergiepotenziale für den Einsatz in der (Zement-)Industrie freigesetzt werden, indem der Bioenergieeinsatz in anderen Sektoren des Energiesystems, in denen geeignete Alternativen bestehen (z. B. Stromsystem, Haushalte), vermindert wird.⁸²

Letztlich bleiben voraussichtlich alle erneuerbaren Energieträger auch mittel- und langfristig knappe Güter, um deren Nutzung eine Konkurrenz mit anderen Anwendungen bestehen wird. Wie die verschiedenen erneuerbaren Energieträger im Energiesystem zukünftig allokiert werden, ist aus heutiger Sicht ungewiss. Zu berücksichtigen ist zudem, dass sich die Verfügbarkeit und Kosteneffizienz verschiedener erneuerbarer Energieträger zwischen Standorten der Zementindustrie unterscheiden können. Entsprechend gab es in der Akteursgruppe des Projekts kein einheitliches Bild dazu, welche erneuerbaren Energieträger zukünftig (primär) im Klinkerbrennprozess zum Einsatz kommen können und werden (s. Blitz-Symbol). Um das Visionselement der klimapositiven Beiträge der Zementindustrie zu erreichen, ist jedoch ein hoher Anteil biogener Abfälle in abfallbasierten Brennstoffen bzw. der Einsatz von Biomasse in einem gewissen Umfang erforderlich.

4.2.2 Neue Zemente und Betonbautechniken

Für die Klinkereffizienz durch neue Zemente, Bindemittel und Betonbautechniken spielen Ansätze aus der und ein Zusammenspiel über die gesamte Wertschöpfungskette Betonbau eine Rolle. Neue Zemente und Bindemittel⁸³ sind teilweise bereits heute in Nischen am Markt und ihr Einsatz wird in der Roadmap kurz- bis mittelfristig weiter ausgeweitet. Mittel- bis langfristig ist jedoch der Rückgang und schlussendlich Wegfall von Hüttsand aus der Stahlherstellung sowie von Flugaschen aus der Kohleverstromung zu berücksichtigen, so dass einige neue Zemente, die kurz- und mittelfristig zur Klinkereffizienz beitragen können, langfristig nicht mehr produziert werden können. Daher muss der Einsatz weiterer Ausgangsstoffe – z. B. calcinierte Tone, Betonbrechsande und reaktivierte Stahlwerksschlacken – (weiter) erforscht und diese in ausreichenden Mengen verfügbar gemacht werden, so dass diese mittel- und langfristig als Zementhauptbestandteile verwendet werden und einen substanziellen Beitrag zur Klinkereffizienz leisten können.

Im Bereich der neuen Betone wird in der Roadmap zunächst ein von heute an kontinuierlich steigender Einsatz von Betonen mit rezyklierter Gesteinskörnung (RC-Beton) vorgesehen, wodurch insbesondere ein Beitrag zur Ressourceneffizienz geleistet werden kann.⁸⁴ Mittel- und langfristig sieht die Roadmap zudem das Potenzial, durch die Weiterentwicklung und Markteinführung neuer Betone mit ggü. heutigen Betonen reduziertem Zementgehalt einen Beitrag zur Klinkereffizienz zu leisten. Hierfür ist eine präzise Sortierung und Feinabstimmung

⁸¹ Z. B. Kurzumtriebsplantagen

⁸² Vgl. z. B. (Prognos et al., 2021)

⁸³ Als „neue Zemente“ werden hier Bindemittel bezeichnet, in denen Portlandzementklinker ein Hauptbestandteil neben anderen Hauptbestandteilen ist, die jedoch heute (bzw. vor Erscheinen der DIN EN 197-5) in dieser Form nicht oder nur per Zulassung im Einzelfall oder per allgemeiner bauaufsichtlicher Zulassung am Markt angeboten wurden. Als „neue Bindemittel“ werden hier Bindemittel bezeichnet, die keinen konventionellen Portlandzementklinker enthalten.

⁸⁴ Der Beitrag von RC-Betonen zur CO₂-Effizienz hängt von den Details ab, ist jedoch prinzipiell gering, da sich der Klinkerbedarf durch den Einsatz rezyklierter Gesteinskörnung nicht oder zumindest nicht wesentlich verändert.

der Betonbestandteile erforderlich und für die Markteinführung sind sowohl Anpassungen bei Regelwerken als auch ein umfassender Aufbau von Fachwissen und Praxiserfahrung erforderlich.

Für einen betoneffizienten Betonbau, der zukünftig mindestens genauso leistungsfähig ist wie heute, stehen bereits heute Betonbautechniken zur Verfügung, deren Einsatz in der Roadmap weiter ausgeweitet wird (z. B. Einbringen von Hohlkörpern, vorgespannte Decken). Die Verwendung von alternativen Bewehrungen aus nicht-korrosionsanfälligen Materialien – z. B. Carbon, Basalt – anstelle des heute üblichen Baustahls bietet ein großes Potenzial zur Verringerung der Bauteildicke und somit zur Betoneffizienz.⁸⁵ Aus bautechnischer Sicht gibt es keine Einschränkungen bzgl. einer weitreichenden Skalierung des Ansatzes, es besteht jedoch noch Forschungsbedarf bzw. ein Markthochlauf muss noch erfolgen. In der Roadmap wird davon ausgegangen, dass einige alternative Materialien in geeigneten Marktsegmenten zeitnah skaliert werden können (z. B. Basalt) und andere mittel- bis langfristig eine Rolle spielen (z. B. Carbon). Weitere betoneffiziente Bauweisen wie Gradientenbeton, ultrahochfeste Betone und 3D-Druck-Verfahren werden bereits in Nischen verwendet bzw. wurden in Pilotvorhaben demonstriert. In der Roadmap erfolgt spätestens mittelfristig eine Skalierung dieser Bauweisen zu größeren Marktanteilen.

Die heute in großen Mengen gehandelten Zemente sind prinzipiell für alle Anwendungen im Betonbau geeignet und i.d.R. erfolgt die Wahl eines Zements durch den Betonhersteller primär anhand des Zementpreises. Neue, klinkereffiziente Zemente und Bindemittel sind jedoch i.d.R. nicht mehr gleichermaßen für alle Betonbauanwendungen geeignet. Insbesondere im Bereich der Innenräume und bei einfachen Außenbauteilen ohne erhöhte Anforderungen an die Dauerhaftigkeit der Betone bestehen große Potenziale für den Einsatz klinkereffizienter Zemente. Ihr Markthochlauf erfordert daher einen im Vergleich zu heute stärker nach Anwendungszweck differenzierten Einsatz von Bindemitteln. Im Bereich des Betonbaus ermöglicht die Betonnorm zudem eine Bemessung des Zementgehalts von Betonen entsprechend der Anforderungen an den Beton. Hier bestehen heute in der Praxis noch Potenziale, diese Bemessung mit Blick auf die Klinkereffizienz zu optimieren. Bei den oben skizzierten betoneffizienten Bautechniken bestehen teilweise besondere Anforderungen an die zu verwendenden Bindemittel – so erfordert z. B. die Herstellung von ultrahochfesten Betonen den Einsatz klinkerreicher Zemente. Ein stärker nach Anwendungszweck differenzierter Einsatz von Bindemitteln und Betonen ist daher eine Voraussetzung für die Hebung verschiedener oben aufgeführter Minderungspotenziale und als Querschnittsaufgabe von großer Relevanz.

4.2.3 CCUS

Für die Abscheidung verbleibender, nicht anderweitig systemdienlich vermeidbarer CO₂-Mengen⁸⁶ ist der Aufbau von CO₂-Abscheideanlagen an Klinkeröfen erforderlich. In Deutschland werden gemäß der Roadmap kurzfristig Pilot- und Demonstrationsanlagen errichtet, um die verschiedenen Verfahren zur CO₂-Abscheidung zu testen und weiterzuentwickeln.⁸⁷ Mittel und langfristig (spätestens ab ca. 2030) erfolgt sukzessive der Aufbau von CO₂-Abscheideanlagen im industriellen Maßstab und die ggf. erforderliche Umrüstung bzw. ein Neubau der Öfen.

⁸⁵ Die Bemessung der Bauteildicke muss bei Einsatz von Baustahl den Korrosionsschutz berücksichtigen, so dass Bauteile häufig dicker geplant werden, als dies aus statischen Gründen erforderlich wäre.

⁸⁶ Mit einbezogen sind hier auch fossile CO₂-Mengen aus der thermischen Nutzung von nicht anderweitig recycelbaren Abfällen. Diese CO₂-Mengen ließen sich zwar prinzipiell in der Zementindustrie durch Nutzung CO₂-neutraler Energieträger vermeiden, würden dann jedoch an anderer Stelle (Abfallsektor) entstehen.

⁸⁷ Eine Priorisierung bestimmter CO₂-Abscheideverfahren erfolgt in der Roadmap nicht.

Ein Teil des abgeschiedenen CO₂ wird gemäß der Roadmap für Verfahren genutzt, bei denen es durch Mineralisierung dauerhaft gebunden wird. Viele dieser Verfahren setzen an verschiedenen Arbeitsschritten des Betonbaus (z. B. Injektion von CO₂ in Frischbeton, Aushärtung von Betonfertigbauteilen in CO₂-Atmosphäre) bzw. des Betonrecyclings (Rekarbonatisierung von Betonabbruch) an. Betonherstellung und -recycling erfolgen in hohem Maße dezentral, so dass eine im Vergleich zur CO₂-Nutzung für chemische Grundstoffe und Kraftstoffe bzw. zur CO₂-Speicherung stärker dezentrale Infrastruktur aufgebaut werden muss, mittels derer CO₂ und Beton bzw. Betonabbruch an geeigneten Orten zusammengeführt werden.

Ein mengenmäßig größeres Potenzial für eine CO₂-Nutzung als für die Mineralisierungsverfahren besteht aus heutiger Sicht für die CO₂-basierte Herstellung von chemischen Grundstoffen und Kraftstoffen. Zu berücksichtigen ist jedoch, dass das CO₂ hierdurch nur für die Lebensdauer der hergestellten Produkte gebunden wird und für die Verfahren große Mengen von Wasserstoff benötigt werden. Ein Teil des abgeschiedenen CO₂ wird gemäß der Roadmap ggf. für die Herstellung von chemischen Grundstoffen und Kraftstoffen dort genutzt, wo eine dauerhafte Bindung des CO₂ nicht gewährleistet werden kann, ausreichend grüner Wasserstoff auf systemdienliche⁸⁸ Weise bereitgestellt werden kann und sich bzgl. der Bereitstellung von Kohlenstoff Vorteile ggü. Alternativen (z. B. Direct Air Capture) ergeben. Aufgrund der (angenommenen) kurz- und mittelfristigen Knappheit von erneuerbarem Strom und grünem Wasserstoff erfolgt eine CO₂-Nutzung für die Herstellung von chemischen Grundstoffen und Kraftstoffen in der Roadmap erst langfristig. Pilot- und Demonstrationsanlagen zur Weiterentwicklung der CCU-Verfahren werden jedoch bereits kurz- und mittelfristig errichtet und betrieben.

Abgeschiedenes CO₂, das keiner Nutzung zugeführt wird, wird in der Roadmap geologisch gespeichert. Eine geologische Speicherung ist derzeit und absehbar in Deutschland rechtlich nicht möglich und gesellschaftlich bzw. politisch nicht erwünscht. Als Speicherstätten kommen daher aus heutiger Sicht v.a. ausgeförderte Erdgas- und Ölfelder sowie saline Aquifere unter der Nordsee im europäischen Ausland (Norwegen, Niederlande, UK, Dänemark, ggf. Island) in Betracht, die derzeit für den Zweck einer geologischen CO₂-Speicherung erschlossen werden. Die Demonstration der gesamten CCS-Kette vom Zementwerk bis zur Speicherung wird in Norwegen bis 2024 angestrebt und erfolgt in der Roadmap für deutsche Zementwerke und CO₂-Infrastrukturen noch bevor CO₂-Abscheideanlagen im industriellen Maßstab errichtet werden. Es gab zwischen den im Projekt aktiven Akteuren und Akteurinnen unterschiedliche Auffassungen darüber, ob die geologische Speicherung von CO₂ eine langfristig tragfähige Lösung darstellt oder ob diese nur vorübergehend und möglichst kurzzeitig eine Rolle spielen sollte, bis andere Verfahren zur dauerhaften Bindung von CO₂ gefunden und zur Marktreife entwickelt wurden.

In der Roadmap wird davon ausgegangen, dass in den allermeisten Fällen eine Nutzung (bzw. Speicherung) des CO₂ nicht direkt am Zementwerk erfolgt. Daher ist der frühzeitige Aufbau einer CO₂-Infrastruktur, die Zementwerke mit CO₂-Nutzern und Seehäfen verbindet, eine Voraussetzung für den Hochlauf der CO₂-Abscheidung im industriellen Maßstab. Aufgrund der zu transportierenden CO₂-Mengen und der geographischen Lage der Zementwerke, von denen nur wenige über einen Zugang zu ausreichend großen Schifffahrtsstraßen verfügen, können Züge und Schiffe zwar eine gewisse Rolle in dieser CO₂-Infrastruktur spielen – insbesondere in einer Hochlaufphase, in der die CO₂-Quellen/Abnehmer-Beziehungen noch unsicher sind. Mittel- und langfristig erfolgt der Transport des CO₂ gemäß der Roadmap jedoch zu großen Teilen

⁸⁸ D.h. dass der Wasserstoff bzw. der Strom, der für seine Herstellung benötigt wird, nicht an anderer Stelle mit größerer Klimaschutzwirksamkeit (z. B. Wärmepumpen, E-Kfz) eingesetzt werden könnte.

mittels eines CO₂-Pipelinennetzwerks. Um ein solches Netzwerk mittelfristig realisieren zu können, sind sehr zeitnah erste Schritte erforderlich (s.u.).

4.3 Treiber

Ein zentraler Treiber der Dekarbonisierung der Zementindustrie ist ein zukünftig weiter steigender CO₂-Preis. Die verschiedenen, im Transformationspfad skizzierten, CO₂-Minderungsansätze haben unterschiedlich hohe CO₂-Vermeidungskosten⁸⁹. Bereits heute unterstützt der CO₂-Preis Bemühungen zur CO₂-Minderung der Zementindustrie (z. B. verstärkter Einsatz abfallbasierter Brennstoffe) und durch einen zukünftig weiter steigenden CO₂-Preis gelangen immer weitere CO₂-Minderungsansätze in den Bereich der wirtschaftlichen Konkurrenzfähigkeit zu konventionellen Verfahren. Ein CO₂-Preis alleine ist jedoch kein Garant für das Gelingen der Transformation der Zementindustrie (s. Kapitel 3.3.1 zu Treibern und 3.3.2 zu Hemmnissen).

Verschiedene weitere Treiber unterstützen einzelne CO₂-Minderungsansätze. Die Digitalisierung unterstützt den effizienten Einsatz von Zementklinker entlang der Wertschöpfungskette Betonbau, indem Informationsmanagement und Qualitätskontrolle verbessert und z. B. durch den Einsatz von künstlicher Intelligenz Herstellungsprozesse weiter optimiert werden können. Ein zunehmendes Bewusstsein für die Beschränktheit von Ressourcen und die damit einhergehenden Bestrebungen und Entwicklungen hin zu einer möglichst umfassenden Kreislaufwirtschaft unterstützen die Entwicklung von Recyclingverfahren im Betonbau, welche wiederum Ansatzpunkte für eine CO₂-Nutzung durch Mineralisierung bieten.

Die Erschließung von CO₂-Speicherstätten und der Aufbau zugehöriger CO₂-Transportinfrastrukturen im europäischen Ausland bieten eine Perspektive für den Verbleib des CO₂ aus deutschen Zementwerken und befördern entsprechend Überlegungen und Planungen zum Aufbau von Abscheidanlagen durch Zementhersteller. Zudem bieten sie insofern eine Grundlage für Infrastrukturplanungen, als dass mögliche Zielhäfen einer inländischen CO₂-Infrastruktur identifiziert werden können. Der zukünftige Kohlenstoffbedarf der Chemie- und Kraftstoffindustrie sowie die Perspektive einer möglichen (anteiligen) Bereitstellung dieses Kohlenstoffs aus inländischem CO₂ schaffen einen Anreiz für die Weiterentwicklung und Erprobung entsprechender CCU-Verfahren.

4.4 Hemmnisse

Im Rahmen des Roadmappings erfolgte bzgl. der zeitlichen Perspektive der Hemmnisse keine vertiefte Diskussion unter den im Projekt beteiligten Akteuren und Akteurinnen. Der in Abbildung 17 dargestellte Zeitverlauf der Hemmnisse stellt daher aus Sicht der Autoren eine grobe Annäherung daran dar, innerhalb welchen Zeithorizonts (kurzfristig, mittelfristig, langfristig) Hemmnisse überwunden werden können bzw. überwunden werden müssen, um den oben skizzierten Transformationspfad realisieren zu können.

Ein zentrales Hemmnis für die Skalierung CO₂-effizienter Bindemittel, Betone und Bautechniken ist deren heute in vielen Fällen fehlende Wirtschaftlichkeit gegenüber konventionellen Produkten und Verfahren bzw. ggü. Importen von Zementen. So sind CO₂-neutrale⁹⁰ Energieträger – Strom, Wasserstoff und Biomasse – heute knapp und entsprechend in der Zementindustrie (noch) nicht wirtschaftlich einsetzbar. Es ist davon auszugehen, dass die Verfügbarkeit von erneuerbarem Strom und grünem Wasserstoff zukünftig zunimmt, und

⁸⁹ Eine Analyse der CO₂-Vermeidungskosten verschiedener Minderungsansätze erfolgte im Rahmen des Projekts nicht, so dass eine „Merit Order“ der Minderungsansätze nicht erstellt werden kann.

⁹⁰ Bezogen auf die direkten Emissionen.

einigen Energiesystemszenarien zufolge könnte der Einsatz nachhaltiger Biomasse zukünftig verstärkt im Industriesektor erfolgen. Dennoch wird erwartet, dass diese CO₂-neutralen Energieträger auch zukünftig (mindestens mittelfristig, ggf. auch langfristig) knappe Güter mit entsprechend hohen Kosten bleiben werden. Entsprechend hemmt diese Knappheit die Nutzung erneuerbarer Energieträger für die Bereitstellung thermischer Energie als auch den Einsatz von grünem Wasserstoff bzw. von Strom aus erneuerbaren Quellen für die CO₂-basierte Herstellung von chemischen Grundstoffen und Kraftstoffen. Der Nutzung von neuen Zementen, Bindemitteln, Betonen und Bautechniken stehen in einigen Fällen ggf. auch im Vergleich zur konventionellen Bauweise höhere Kosten entgegen. In anderen Fällen werben Anbieter jedoch sogar mit Kostenvorteilen ggü. einer konventionellen Bauweise. Eine ökonomische Analyse verschiedener Ansätze wurde im Rahmen des Projekts nicht durchgeführt, so dass zur Wettbewerbsfähigkeit im Zeitverlauf hier keine Aussage getroffen werden kann. CCUS-Verfahren sind mindestens kurz- und mittelfristig im Vergleich zu einer konventionellen Produktion mit deutlich erhöhten Kapital- und Betriebskosten verbunden.

Durch einen steigenden CO₂-Preis wird die Wirtschaftlichkeit CO₂-effizienter Produkte und Verfahren gegenüber konventionellen Alternativen im Einzugsbereich des EU-ETS zwar sukzessive verbessert (s.o.), so dass mittel- bis langfristig für die meisten Verfahren eine Wirtschaftlichkeit gegeben sein dürfte. Für die Markteinführung und für die spätere Skalierung ist jedoch möglichst frühzeitig ein Erfahrungsaufbau erforderlich, wofür rein marktliche Anreize erwartungsgemäß nicht ausreichend sind. Zudem stehen neben einer fehlenden Wirtschaftlichkeit und fehlender Praxiserfahrung der Skalierung vieler Minderungsansätze noch weitere Hemmnisse entgegen.

Eine begrenzte Verfügbarkeit geeigneter Ausgangsstoffe hemmt einen klinker- und ressourceneffizienten Betonbau auf verschiedene Weise: eine kurz- und mittelfristig verringerte Verfügbarkeit von Hüttensand und Flugaschen reduziert die Möglichkeiten des Einsatzes von heute etablierten klinkereffizienten Zementen sowie von Portlandkompositzementen und Kompositzementen. Eine – Stand heute – begrenzte Verfügbarkeit von calcinierten Tonen in Deutschland hemmt kurzfristig den Markthochlauf von Portlandkompositzementen unter Verwendung dieser Tone. Ein verstärkter Einsatz von RC-Beton wird fallweise durch einen Mangel an geeigneter rezyklierter Gesteinskörnung gehemmt.

Die Integration neuer Zemente, Bindemittel, Betone und Bautechniken in die Baupraxis stellt heute oftmals noch eine Herausforderung dar (vgl. Kapitel 3.3.2.4). Regulatorische und organisatorische Hemmnisse – wie z. B. starre technische Normen, Nicht-Berücksichtigung von CO₂-Effizienz in der Planung sowie ein Mehraufwand für den differenzierten Einsatz von Zementen und Betonen, der heute nicht standardmäßig entsprechend vergütet wird – stehen (heute) einem schnellen Markthochlauf klinkereffizienter Ansätze entgegen. Prinzipiell stellt die Integration auch zukünftig immer neu- bzw. weiterentwickelter Produkte und Bautechniken eine dauerhafte Herausforderung dar. Zentrale Hemmnisse, die heute bestehen – wie z. B. die Nicht-Berücksichtigung von CO₂-Effizienz in der Planung – werden gemäß der Roadmap jedoch kurzfristig überwunden.

Der heutige Rechtsrahmen für CCUS wurde im Projekt als zentrales Hemmnis für die Entwicklung von CCUS-Projekten identifiziert. Neben der fehlenden Anrechenbarkeit für CCU im EU ETS⁹¹ sowie der rechtlichen Unzulässigkeit von CCS bestehen weitere rechtliche Hemmnisse für das Errichten von Anlagen für CCU sowie für den CO₂-Transport (vgl. Kapitel 6). Diese

⁹¹ Eine Ausnahme besteht nach einem Urteil des Europäischen Gerichtshofs („Schaefer Kalk Urteil“) für den Fall, dass CO₂ zur Herstellung von gefällttem Kalziumkarbonat genutzt wird.

rechtlichen Hemmnisse werden in der Roadmap kurzfristig überwunden, um den Hochlauf von CCUS-Verfahren zu ermöglichen.

Die fehlende Möglichkeit für den Abtransport von CO₂ von den Standorten der Klinkerherstellung ist heute ein zentrales Hemmnis für CCUS. Für die Planung und den Aufbau einer CO₂-Infrastruktur besteht neben rechtlichen Fragen (s.o.) ein Hemmnis darin, dass noch Unklarheit darüber herrscht, zwischen welchen Orten zukünftig CO₂ in welchen jeweiligen Mengen transportiert werden soll. Dies erschwert insbesondere die Planung von Pipelines, die von vornherein auf bestimmte CO₂-Mengen ausgelegt werden müssen, und die nach Errichtung auch räumlich nicht mehr verändert werden können. Gemäß der Roadmap werden zentrale offene Fragen bzgl. einer CO₂-Infrastruktur kurzfristig geklärt und es findet zeitnah eine Infrastrukturplanung statt, so dass ein Aufbau einer CO₂-Infrastruktur in dem im Transformationspfad skizzierten Zeitrahmen gelingt.

Ein sehr wesentliches Hemmnis für den Aufbau einer CO₂-Pipeline-Infrastruktur besteht auch in der (vermuteten) geringen gesellschaftlichen Akzeptanz dafür. Insbesondere auf der lokalen Ebene ist – basierend auf Erfahrungen aus anderen Infrastrukturprojekten – mit Widerstand und langwierigen gerichtlichen Auseinandersetzungen zu rechnen. Es ist davon auszugehen, dass lokale Widerstände jeweils dort auftreten, wo eine CO₂-Infrastruktur errichtet wird, so dass dieses Hemmnis zeitlich und räumlich verteilt über den gesamten Zeitraum des Aufbaus einer CO₂-Infrastruktur zu adressieren ist.

4.5 Handlungsfelder

Das Schaffen zielführender gesetzlicher Rahmenbedingungen wird gemäß der Roadmap zeitnah angegangen, um insbesondere für den Einsatz von CCUS heute bestehende regulatorische Hemmnisse kurzfristig zu beseitigen – z. B. durch eine Änderung des KSpG sowie eine Ratifizierung des Zusatzes zu §6 im London Protokoll⁹². Mittel- und langfristig ist eine kontinuierliche Weiterentwicklung von gesetzlichen Regelwerken und Rahmenbedingungen erforderlich, um die (erwartete) dynamische Entwicklung zu begleiten und zu unterstützen.

Die Wirtschaftlichkeit CO₂-effizienter Bindemittel, Zemente, Betone und Betonbautechniken wird in der Roadmap kurzfristig sichergestellt und ein Level Playing Field geschaffen. Der Europäische Emissionshandel sowie das derzeit auf europäischer Ebene verhandelte CO₂-Grenzausgleichssystem (Carbon Border Adjustment Mechanism – CBAM) sind hierfür zentrale Instrumente. Kurz- und ggf. mittelfristig – solange der wettbewerbliche Rahmen eine Wirtschaftlichkeit ohne zusätzliche Maßnahmen noch nicht ermöglicht – werden erhöhte CAPEX und OPEX auf geeignete Weise abgedeckt, z. B. durch Klimaschutzverträge.

Eine integrierte, sektorübergreifende Energiestrategie wird gemäß Roadmap kurz- bis mittelfristig partizipativ entwickelt und bietet spätestens mittelfristig, wenn der Hochlauf des Einsatzes erneuerbarer Energieträger für den Klinkerbrennprozess erfolgt, Richtungssicherheit für die dafür erforderlichen Investitionen. Mittel- bis ggf. auch langfristig erfolgt die Begleitung des Ausbaus von Energieinfrastrukturen.

Um den Markthochlauf CO₂- und ressourceneffizienter Bauweisen auch im Hinblick auf das Wissen und die Praxiserfahrung von Marktakteuren vorzubereiten, werden gemäß der Roadmap bereits kurzfristig Marktnischen geschaffen und diese im Zeitverlauf skaliert, in denen eine Nachfrage nach den entsprechenden Produkten bzw. Bauweisen besteht. Dies ist insbesondere für neue Bindemittel, Betone und für solche Bautechniken relevant, die signifikant veränderte Arbeitsschritte ggü. dem heute üblichen Vorgehen erfordern. Die öffentliche Hand spielt durch

⁹² Eine ausführlichere Darstellung der Handlungsbedarfe erfolgt in Kapitel 6.

eine nachhaltige Beschaffung eine Schlüsselrolle für die Schaffung entsprechender Marktsegmente.

Die Integration von neuen Zementen, Bindemitteln, Betonen und Bautechniken in die Baupraxis ist gemäß der Roadmap eine dauerhafte Aufgabe, da immer wieder neue Entwicklungen in den einschlägigen Regelwerken berücksichtigt sowie die Kenntnisse von Akteurinnen und Akteuren aus der Praxis entsprechend weiterentwickelt werden müssen. Die Einführung eines CO₂-Fußabdrucks für Bauwerke ist eine zentrale Maßnahme, die gemäß der Roadmap kurzfristig umgesetzt wird.

Die Entwicklung einer umfassenden Kreislaufwirtschaft im Bauwesen ist eine mittel- bis langfristige Herausforderung, da hierfür zunächst noch technologische Weiterentwicklungen im Bereich der Separierung verschiedener Fraktionen von Betonabbruch erforderlich sind. Erste Schritte wie eine verstärkte Nutzung von recycelter Gesteinskörnung in RC-Beton werden jedoch zeitnah angegangen.

Die Klärung offener Fragen bzgl. einer zukünftigen CO₂-Infrastruktur – z. B. technische und nicht-technische Zugangsvoraussetzungen – erfolgt in der Roadmap ebenso zeitnah wie eine (erste) Planung von Trassenverläufen und Transportvolumina. Hierdurch kann kurz- bis mittelfristig mit dem Aufbau einer solchen Infrastruktur begonnen werden, so dass der CO₂-Abtransport von ersten Standorten bis spätestens 2030 gewährleistet ist und der Hochlauf der CO₂-Abscheidung gemäß des Transformationspfads ab diesem Zeitpunkt erfolgen kann. Die CO₂-Infrastruktur wird im Zeitverlauf weiter ausgebaut und erschließt weitere Standorte der Zementindustrie, wobei die Planung kontinuierlich an die Entwicklung angepasst wird. Bzgl. des Anschlusses von Standorten gab es im Projekt abweichende Stimmen dazu, ob ein „diskriminierungsfreier“ Zugang aller Standorte gewährleistet sollte oder unter Berücksichtigung von zu überbrückenden Entfernungen und geographischen Gegebenheiten eher eine Auswahl von Standorten nach dem Kriterium der Effizienz⁹³ erfolgen sollte.

Ein gesellschaftlicher Dialog zu Notwendigkeit, Umfang und Ausgestaltung einer CO₂-Infrastruktur wird zeitnah angestoßen, um eine Grundlage für den Infrastruktur-Planungsprozess sowie den Aufbau der CO₂-Infrastruktur zu schaffen. Aufgrund des nur noch kurzen Zeitfensters, innerhalb dessen die CO₂-Emissionen (aus der Zementindustrie) signifikant gesenkt werden müssen, wird ein idealtypischer Ablauf – zunächst gesellschaftlicher Dialog, dann Planung, dann Aufbau der Infrastruktur – nicht gewährleistet werden können. Vielmehr werden Dialog, Planung und ggf. Aufbau erster CO₂-Transportmöglichkeiten teilweise parallel verlaufen (müssen). Dies erfordert besonders große Sensibilität bei der Durchführung der Dialogformate sowie eine klare Kommunikation über die Ziele und Entscheidungsbefugnisse der beteiligten Akteure und Akteurinnen.

Forschung und Entwicklung sind über den gesamten Zeitraum der Roadmap erforderlich, um bestehende Ansätze weiter zu verbessern sowie ggf. innovative Lösungen zu finden und zu entwickeln.

Tabelle 7 gibt einen Überblick über zentrale Maßnahmen innerhalb dieser Handlungsfelder (vgl. auch Kapitel 6) sowie über die Hauptakteure für die Umsetzung dieser Maßnahmen. Weitere Akteure sollten in beratender und unterstützender Funktion einbezogen werden (s. die Icons in Abbildung 17 und Erläuterungen zu den Akteursgruppen in Tabelle 6 am Anfang von Kapitel 4).

⁹³ Welcher Aufwand (z. B. Länge einer Pipeline) darf / soll betrieben werden, um welche Menge CO₂ abtransportieren zu können.

Tabelle 7: Hauptakteure zur Umsetzung von zentralen Maßnahmen in den Handlungsfeldern der Roadmap

Handlungsfeld	Maßnahmen	Akteure
Gesetzliche Rahmenbedingungen	Änderung des Kohlendioxidspeichergesetzes (KSpG) (Erweiterung auf CO ₂ -Nutzung, bisher auf Speicherung begrenzt)	Bundesregierung bzw. BMWK
	Erweiterung Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) auf CO ₂ -Abscheidungsanlagen für CCU (bislang nur CCS)	Bundesregierung
	Ratifizierung des Zusatzes zu §6 im London Protokoll (für grenzüberschreitenden CO ₂ -Transport zwecks Speicherung)	Ratifizierung durch Bundesregierung Bilaterale Abkommen mit Staaten, in denen CO ₂ gespeichert werden soll (alternativ supranationale Regelung auf EU-Ebene) sowie Verhandlungen mit Unternehmen als CO ₂ -Anbieter
Schaffung Level-Playing Field	Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM)	EU-Kommission, Rat und Parlament
	Carbon Contracts for Difference (CCfD)	Verträge zwischen Unternehmen und dem Bund zur Abfederung von Mehrkosten einer klimafreundlichen Produktionsweise (Entwicklung eines nationalen CCfD-Pilotprogramms im BMWK)
Integrierte, sektorenübergreifende Energiestrategie	Systementwicklungsstrategie ⁹⁴	BMWK unter Mitwirkung der Wissenschaft
Nischen für bzw. Förderung von CO₂-effizienten Bauweisen	Nachhaltige öffentliche Beschaffung	Öffentliche Hand als Bauträger (Bund, Länder, Kommunen, öffentliche Unternehmen)
	Kampagnen und Informationsangebote (insb. für Planer und Bauherren)	Betonhersteller, Planer, Bauherren und Verbände
Integration von neuen Zementen / Bindemitteln / Betonen / Bautechniken in die Baupraxis	Änderung von Bau- und Produktnormen	Bauherren, Bauaufsicht, Baustoffindustrie, Bauwirtschaft sowie Wissenschaft und beratende Ingenieure/Prüfingenieure im Rahmen des Deutschen Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb)

⁹⁴ www.bmwk.de/Redaktion/DE/Dossier/ses.html

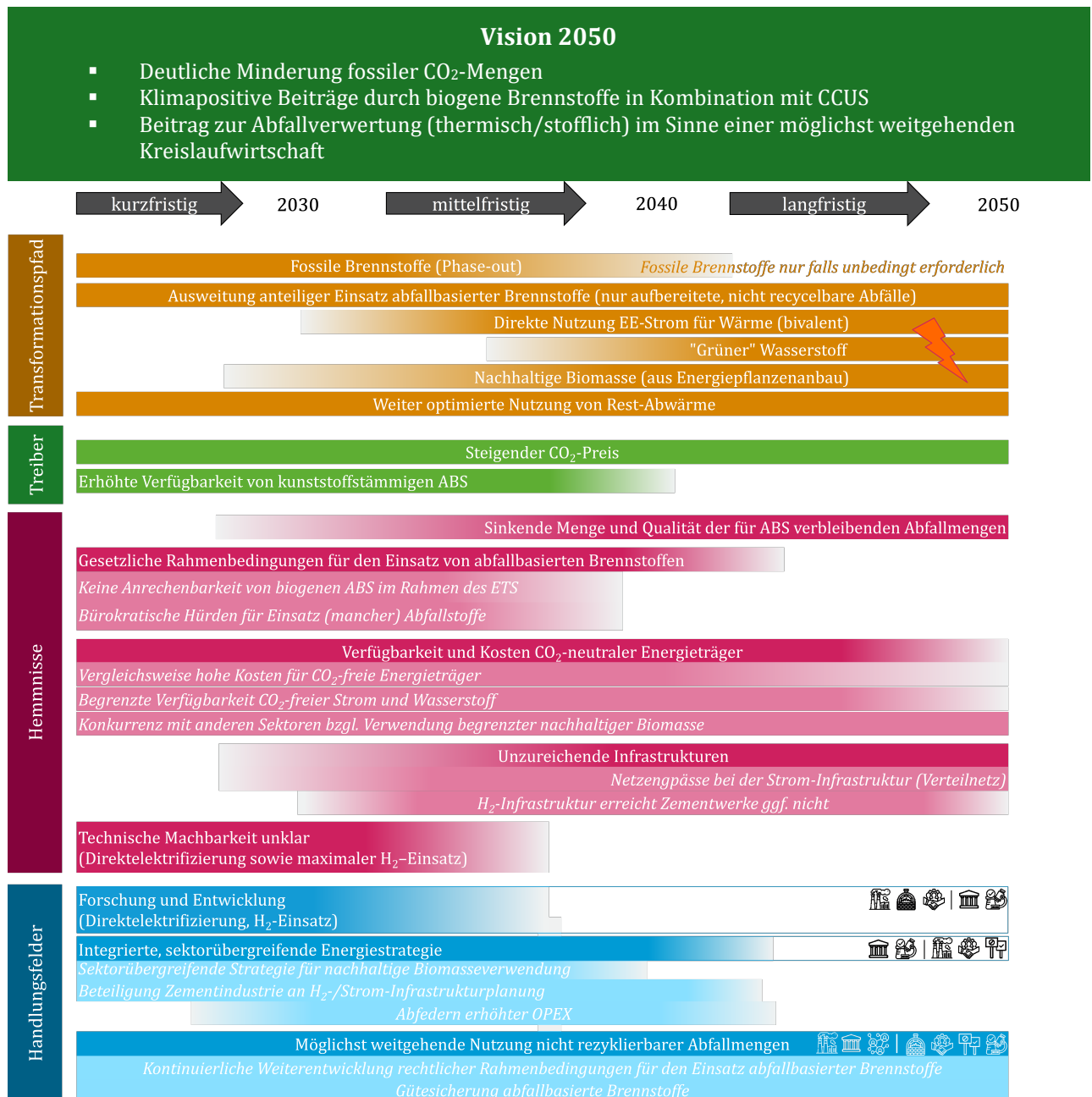
Handlungsfeld	Maßnahmen	Akteure
	Informations-, Aus- und Weiterbildungsangebote (insb. für Architekt*innen und Planer*innen), um Einführung von NZB in der Baupraxis zu unterstützen	Bauaufsicht, Branchenverbände, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb) Hochschulen und Forschungseinrichtungen (bspw. für Integration in Lehre), Branchenverbände und Einrichtungen wie „InformationsZentrum Beton“ (Angebot von Informationen und Schulungen) und Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb) (Erstellung von Planungshilfen)
	Einführung eines CO ₂ -Fußabdrucks für Bauwerke (verpflichtende Ausweisung, ggf. Klassifizierung, ggf. Begrenzung)	Bundesregierung und Fachministerien (BMWK bzw. BMWSB) als Akteure für eine verpflichtende Einführung eines CO ₂ -Fußabdrucks Schaffung einer fundierter Datenbasis zu den Gebäudeemissionen unter Berücksichtigung ihrer jeweiligen Baustoffe bspw. durch die Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (DGNB eV).
Entwicklung einer umfassenden Kreislaufwirtschaft im Bauwesen	Forschung, Pilotprojekte und Demonstrationsprojekte zu RC-Beton, Separierung von Betonabbruch, modulares Bauen	Wissenschaft, Betonhersteller, integrierte Zement-/Betonunternehmen, Anlagenbauer, Planer/Architekten
Planung und Aufbau CO₂-Infrastruktur	Klärung offener Fragen wie z. B. technische und nicht-technische Zugangsvoraussetzungen, (erste) Planung von Trassenverläufen und Transportvolumina	Gasnetzbetreiber, Länder (Ausführung/Genehmigung), Bund/Regulierungsbehörden (Regulatorik und Carbon Management Strategie), Unternehmen als Eigentümer der Punktquellen
Gesellschaftlicher Dialog zu CO₂-Infrastruktur und lokale Beteiligungsprozesse	Initiierung, Organisation und Durchführung von Beteiligungs- und Dialogformaten	Bund/Länder, zivilgesellschaftliche Organisationen unter Einbindung von wissenschaftlichen Expert*innen und Unternehmen, Gasnetzbetreiber, professionelles Dialog-/Kommunikationsmanagement
F&E	Forschung zu Direktelektrifizierung, H ₂ -Einsatz, neue Zemente und Betone, innovative Verfahren für dauerhafte CO ₂ -Bindung	Unternehmen, Hochschulen und Forschungseinrichtungen (u.a. der Verbände), ggf. auch öffentliche Fördermittelgeber

5 Vertiefung ausgewählter Aspekte in Detail-Roadmaps

Die im Folgenden dargestellten Detail-Roadmaps zu den Technologiebereichen „Bereitstellung thermischer Energie“, „Neue Zemente und Betonbautechniken“ (inklusive neuer Bindemittel) sowie „CO₂-Abscheidung und Nutzung oder Speicherung“ vertiefen die in der Gesamt-Roadmap (vgl. Kapitel 4) dargestellten Entwicklungen an ausgewählten Stellen, um für diese Technologiebereiche relevante Aspekte auf einer differenzierteren Ebene abzubilden. Für eine ausführlichere Darstellung einzelner Aspekte sei auf Kapitel 3 verwiesen.

5.1 Detail-Roadmap Thermische Energie

Abbildung 18: Vision und Detail-Roadmap Thermische Energie



Quelle: eigene Darstellung, Wuppertal Institut

Hinweis: Zur Definition der für die Umsetzung der Maßnahmen relevanten Akteursgruppen (= Icons am rechten Rand der Handlungsfelder in der Roadmap) siehe die Erläuterungen und die Tabelle 6 am Anfang von Kapitel 4.

Als „weitere Akteure“ sind im Handlungsfeld „Möglichst weitgehende Nutzung nicht rezyklierbarer Abfallmengen“ insbesondere Akteure aus der Abfallwirtschaft zu verstehen.

5.1.1 Vision

Abbildung 18 zeigt die Detail-Roadmap Thermische Energie im Überblick. Das zentrale Visionselement ist eine deutliche Minderung der fossilen CO₂-Mengen durch eine veränderte Bereitstellung thermischer Energie für den Klinkerherstellungsprozess. Durch den Einsatz biogener Brennstoffe bzw. durch biogene Brennstoffanteile abfallbasierter Brennstoffe können (in Kombination mit CCUS)⁹⁵ sogar klimapositive Beiträge geschaffen werden, die verbleibende, insbesondere prozessbedingte CO₂-Restemissionen aus der Zementindustrie (mindestens anteilig) kompensieren können. Durch die Verwendung abfallbasierter Brennstoffe kann und soll zudem ein Beitrag zur thermischen und stofflichen Abfallverwertung im Sinne einer möglichst weitgehenden Kreislaufwirtschaft geleistet werden.

5.1.2 Transformationspfad

Auf der Ebene des technologischen Transformationspfads soll der Einsatz fossiler Brennstoffe vermindert und mittel- bis langfristig möglichst vollständig beendet und durch einen steigenden Anteil abfallbasierter Brennstoffe sowie erneuerbarer Energieträger ersetzt werden. Ein steigender Anteil abfallbasierter Brennstoffe wird als sinnvoll erachtet, insofern im Sinne der Abfallhierarchie nach §6 des Kreislaufwirtschaftsgesetzes (weiterhin) nur nicht anderweitig rezyklierbare Abfälle, die auf geeignete Weise aufbereitet wurden, eingesetzt werden.⁹⁶

Hinsichtlich der Frage, welche erneuerbaren Energieträger eine wesentliche Rolle spielen können und sollen, gab es unter den Akteuren und Akteurinnen der Kerngruppe kein einheitliches Bild (s. „Blitz“-Symbol). Hier gab es unterschiedliche Einschätzungen in Bezug auf den technologischen Einsatz (z. B. H₂- oder Plasmabrenner im Drehrohrofen, Stromdirektheizung im Calcinator) sowie der zu erwartenden Verfügbarkeit und Wirtschaftlichkeit der verschiedenen Energieträger. Einzelne Akteure und Akteurinnen schlossen auch den langfristigen Einsatz fossiler Brennstoffe nicht gänzlich aus, insofern erneuerbare Energieträger nicht in ausreichender Menge verfügbar gemacht werden können. Eine weiter optimierte interne (z. B. auch perspektivisch für eine CO₂-Abscheidung) oder externe (Einspeisung in Wärmenetze) Nutzung von Restabwärme ist anzustreben.⁹⁷

5.1.3 Treiber

Als zentraler Treiber für eine verbesserte Wirtschaftlichkeit von abfallbasierten Brennstoffen und erneuerbaren Energieträgern gegenüber fossilen Brennstoffen wirkt ein (steigender) CO₂-Preis. Abfallbasierte Brennstoffe sind vielfach bereits heute wirtschaftlich einsetzbar, was deren heutige umfangreiche Nutzung (mit) erklärt. Durch einen steigenden CO₂-Preis dürften weitere Abfallfraktionen in den Bereich der Wirtschaftlichkeit gelangen. Ob und ggf. wann die verschiedenen erneuerbaren Energieträger kostengünstiger als fossile Brennstoffe sein werden, hängt neben dem CO₂-Preis von der Entwicklung der jeweiligen Energieträgerpreise ab.

Im Bereich der abfallbasierten Brennstoffe ist – aufgrund bereits in Verkehr gebrachter Kunststoffmengen - kurz- und mittelfristig mit einem erhöhten Aufkommen von Kunststoffabfällen zu rechnen. Da dem mechanischen Recycling von Kunststoffen Grenzen gesetzt sind⁹⁸ und ein chemisches Recycling voraussichtlich erst mittel- bis langfristig eine

⁹⁵ Für klimapositive Beiträge ist eine dauerhafte Bindung des CO₂ erforderlich, s. Detail-Roadmap CCUS in Kapitel 5.3.

⁹⁶ Mit Unsicherheiten behaftet bleibt die Frage, ob zukünftig eine ausreichende Menge geeigneter Abfallstoffe zur Verfügung stehen wird (s. Kapitel 3.3 zu Hemmnissen und die Infobox zu abfallbasierten Brennstoffen in Kapitel 3.2.1).

⁹⁷ Das Thema Abwärmenutzung und deren Potenziale wurde im Projekt jedoch nicht vertieft behandelt.

⁹⁸ Grenzen bestehen aus technischer Sicht bei gemischten Kunststoffabfällen sowie aus marktlicher Sicht bzgl. der Nachfrage nach Vorprodukten aus rezyklierten Kunststoffen.

wesentliche Rolle spielen kann, gehen die Autoren von einer vorübergehend steigenden Verfügbarkeit von kunststoffstämmigen abfallbasierten Brennstoffen aus.

5.1.4 Hemmnisse

Gleichzeitig bestehen bei einige Abfallfraktionen sowie im gesamten Abfallsystem Trends, aufgrund derer spätestens mittel- bis langfristig in Summe mit einer sinkenden (absoluten) Menge und schlechteren Qualität der für abfallbasierte Brennstoffe verbleibenden Abfallstoffe zu rechnen ist. Da jedoch gleichzeitig durch eine erhöhte Klinkereffizienz⁹⁹ der Bedarf an thermischer Energie reduziert werden kann, bedeutet dies nicht, dass der *Anteil* der abfallbasierten Brennstoffe am Energieträgermix nicht dennoch weiter erhöht werden kann. Als Hemmnis für eine Erhöhung des Anteils abfallbasierter Brennstoffe wirken gemäß der Aussage von Akteuren und Akteurinnen auch die heutigen gesetzlichen Rahmenbedingungen für deren Einsatz.

CO₂-neutrale¹⁰⁰ Energieträger – Strom, Wasserstoff und Biomasse – sind heute knapp und entsprechend in der Zementindustrie (noch) nicht wirtschaftlich einsetzbar. Es ist davon auszugehen, dass die Verfügbarkeit von erneuerbarem Strom und grünem Wasserstoff zukünftig zunimmt, und einigen Energiesystemszenarien zufolge könnte der Einsatz nachhaltiger Biomasse zukünftig verstärkt im Industriesektor erfolgen. Dennoch wird erwartet, dass diese CO₂-neutralen Energieträger auch zukünftig (mindestens mittelfristig, ggf. auch langfristig) knappe Güter mit entsprechend hohen Kosten bleiben werden. Ein Energieträgerwechsel bei der Klinkerherstellung ist daher nicht zwangsläufig ein Selbstläufer. Ein mögliches Hemmnis bzgl. des Einsatzes von Strom und Wasserstoff sind unzureichende Infrastrukturen, welche dann mittel- bis langfristig hemmend wirkend könnten, sobald Strom und Wasserstoff ggf. in größeren Mengen eingesetzt werden sollen. Kurzfristig ist über das Maß von Pilot- und Demonstrationsvorhaben hinaus nicht mit einem Einsatz von direktelektrischen Verfahren und Wasserstoff zu rechnen, da die technische Machbarkeit weiter geklärt werden muss.

5.1.5 Handlungsfelder

Als Handlungsfeld, das von der Industrie selbst adressiert werden kann, ergibt sich daraus die (weitere) Forschung und Entwicklung in den Bereichen Direktelektrifizierung und Wasserstoffeinsatz in der kurzen und ggf. mittleren Frist.

Eine integrierte, sektorübergreifende Energiestrategie bietet in der mittleren Frist – beim Hochlauf erneuerbarer Energieträger – Richtungssicherheit und trägt dazu bei, dass in der Zementindustrie eingesetzte Biomasse nachhaltig bereitgestellt werden kann. Durch Instrumente, durch die zeitweise erhöhte OPEX abgefedert werden können, wird der Hochlauf des Einsatzes erneuerbarer Energieträger in der Zementindustrie in dem Maße angereizt und beschleunigt, wie es aus einer sektorübergreifenden Perspektive heraus zielführend für das Erreichen der Klimaziele erscheint. Um infrastrukturelle Engpässe beim Hochlauf des Einsatzes von Strom und Wasserstoff möglichst zu vermeiden, wird die Zementindustrie auf geeignete Weise in der Infrastrukturplanung für Wasserstoff und Strom eingebunden.

Eine zukünftig möglichst weitgehende Nutzung nicht rezyklierbarer Abfallmengen in abfallbasierten Brennstoffen wird erreicht, indem die heute bestehenden Schwachstellen in den gesetzlichen Rahmenbedingungen kurzfristig adressiert werden. Die Ausweitung auf weitere Abfallfraktionen wird durch eine kontinuierliche Weiterentwicklung dieser Rahmenbedingungen ermöglicht. Einen wesentlichen Beitrag zur Erhöhung der Anteile

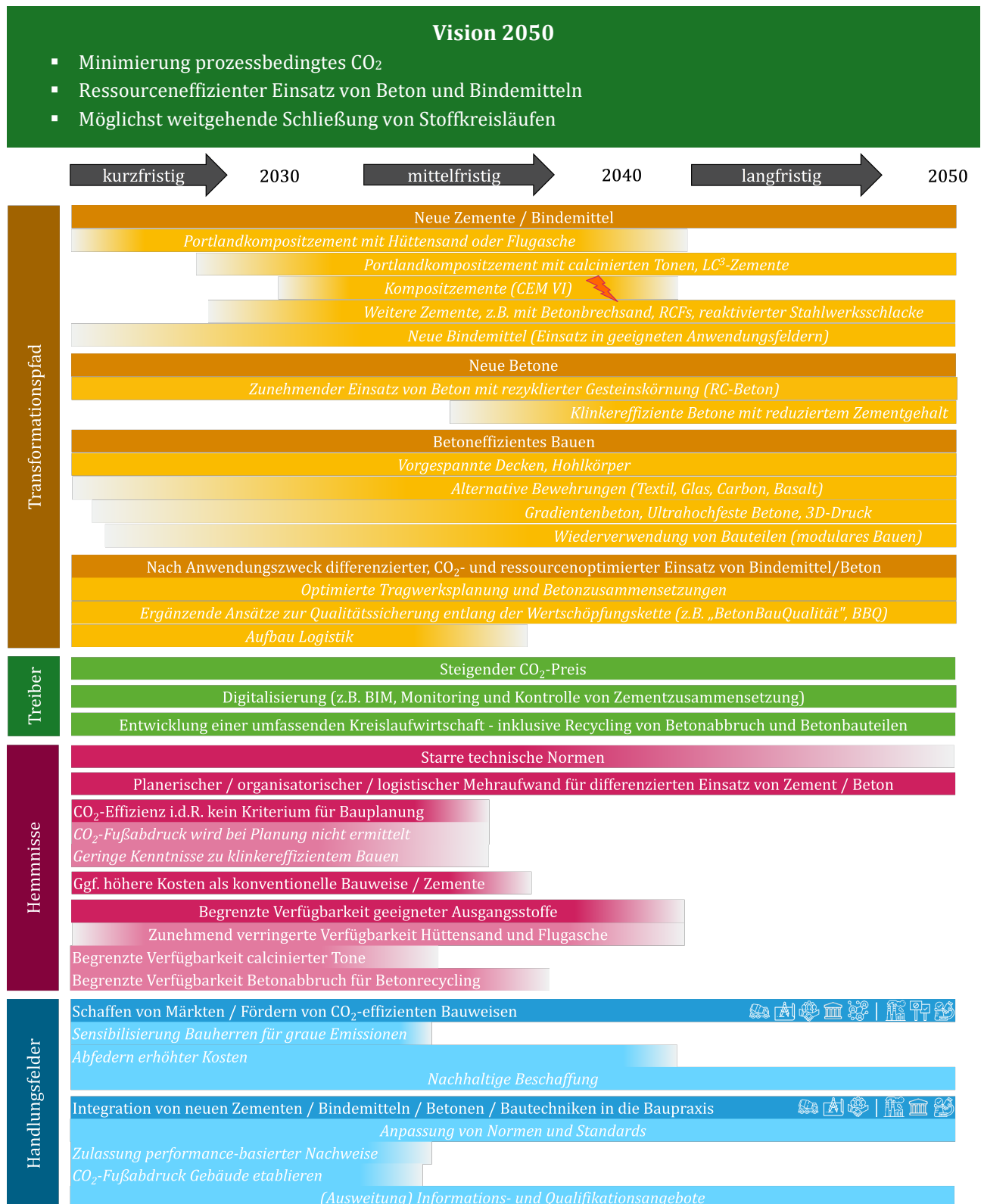
⁹⁹ S. Detail-Roadmap *Neue Zemente und Betonbautechniken* in Kapitel 5.2.

¹⁰⁰ Bezogen auf die direkten Emissionen.

abfallbasierter Brennstoffe trotz im Mittel schlechter werdender Qualität der verfügbaren Abfälle (niedrigerer Brennwert, höhere Schadstofffrachten) leistet zudem die Gütesicherung der abfallbasierten Brennstoffe.

5.2 Detail-Roadmap Neue Zemente und Betonbautechniken (NZB)

Abbildung 19: Vision und Detail-Roadmap Neue Zemente und Betonbautechniken



Quelle: eigene Darstellung, Wuppertal Institut

Hinweis: Zur Definition der für die Umsetzung der Maßnahmen relevanten Akteursgruppen (= Icons am rechten Rand der Handlungsfelder in der Roadmap) siehe die Erläuterungen und die Tabelle 6 am Anfang von Kapitel 4.

Als „weitere Akteure“ sind im Handlungsfeld „Schaffen von Märkten / Fördern von CO₂-effizienten Bauweisen“ insbesondere Bauherren sowie Akteure aus der öffentlichen und privaten Immobilienwirtschaft zu verstehen.

5.2.1 Vision

Quelle: eigene Darstellung, Wuppertal Institut zeigt die Detail-Roadmap „Neue Zemente und Betonbautechniken“ im Überblick. Das zentrale Visionselement ist die Minimierung der prozessbedingten Entstehung von CO₂ durch eine Minderung des Klinkerbedarfs. Darüber hinaus sollen Betone und Bindemittel möglichst ressourceneffizient eingesetzt werden, was durch Materialeffizienz sowie durch einen verstärkten Einsatz von Sekundärrohstoffen erreicht werden kann. Für einen zukünftigen Betonbau, der diese Ziele verfolgt, erscheint eine möglichst weitgehende Schließung von Stoffkreisläufen erstrebenswert.

5.2.2 Transformationspfad

Der Transformationspfad spiegelt die in Kapitel 3.2.3 dargelegten Minderungshebel wider: den Einsatz von klinkerarmen Zementen und Bindemitteln, den Einsatz neuer Betone, betoneffizientes Bauen und – als Querschnittsthema – den nach Anwendungszweck differenzierten Einsatz von Bindemitteln und Betonen.

Portlandkompositzemente mit Hüttensand oder Flugasche können prinzipiell kurzfristig einen CO₂-Minderungsbeitrag leisten. Die Herausforderung besteht hier in einer zügigen Skalierung der Marktanteile. Mittel- bis langfristig sind die für diese Zemente benötigten Ausgangsstoffe jedoch voraussichtlich nicht mehr verfügbar. Als neue Ausgangsstoffe können calcinierte Tone spätestens mittelfristig eine wichtige Rolle spielen. Diese können in Portlandkompositzementen bzw. in LC³-Zementen¹⁰¹ eingesetzt werden. Die Herausforderung besteht im Aufbau von Strukturen für die Bereitstellung der (calcinierten) Tone sowie im weiteren Erfahrungsaufbau beim Einsatz dieser Zemente im Betonbau. Kompositzemente unter Verwendung von Hüttensand könnten prinzipiell mittelfristig einen signifikanten Minderungsbeitrag leisten. Jedoch entfällt einerseits langfristig der für ihre Herstellung erforderliche Hüttensand und bereits mittelfristig ist mit einer erhöhten Konkurrenz um die im Zuge der Transformation des Stahlsektors stetig absinkenden Hüttensandmengen zu rechnen. Andererseits sind diese Zemente bisher nicht Bestandteil der Zementnorm und es bestehen noch keine Erfahrungen mit ihrer Anwendung im Betonbau. Daher ist das Zeitfenster für ihren möglichen Einsatz vergleichsweise kurz und es ist aus Sicht der Autoren fraglich, ob eine Markteinführung unter diesen Umständen erfolgreich gelingen kann. Diesbezüglich bestehen jedoch unterschiedliche Einschätzungen (s. Blitz-Symbol). Weitere Zemente mit neuartigen Hauptbestandteilen (z. B. Betonbrechsande; rekarbonatisierter, rezyklierter Zementstein; reaktivierte Stahlwerksschlacke) werden erforscht und entwickelt. Im Erfolgsfall können diese mittel- und langfristig einen Minderungsbeitrag leisten. Hierfür ist ein Einbezug in die Regelwerke und ein Erfahrungsaufbau im Betonbau erforderlich. Neue Bindemittel werden bereits heute in Nischen eingesetzt.¹⁰² Eine Skalierung in geeigneten Anwendungsfeldern erscheint (in geringem Umfang) möglich und mit Blick auf eine angestrebte CO₂-Minderung vorteilhaft.

Bei der Betonherstellung kann prinzipiell bereits kurzfristig der Einsatz von rezykliertem Gesteinskörnung ausgeweitet werden. Der Ansatz kann insbesondere mit Blick auf die Ressourceneffizienz des Betonbaus eine Relevanz entfalten insofern dadurch eine Deponierung

¹⁰¹ LC³ steht für Limestone Calcined Clay Cement. Vgl. www.lc3.ch

¹⁰² z. B. Solidia®: www.solidiatech.com

von Bauabfällen vermieden und der Bezug von Primärmaterialien reduziert werden kann. Die unmittelbaren Auswirkungen auf die CO₂-Bilanz sind abhängig von den spezifischen Umständen¹⁰³, prinzipiell jedoch eher geringfügig, da sich die benötigte Klinkermenge durch den Einsatz rezyklierter Gesteinskörnung nicht oder zumindest nicht wesentlich verändert. Durch eine Rekarbonatisierung der rezyklierten Gesteinskörnung ergäben sich jedoch Potenziale für CCU (s. Kapitel 5.3). Mittel- bis langfristig besteht ein Potenzial, den Zementanteil in Betonen durch einen erhöhten Anteil von fein gemahlenden, nicht reaktiven Bestandteilen (z. B. Quarzsand, ungebrannter Kalkstein) und eine sehr präzise Abstimmung der Betonbestandteile aufeinander zu senken. Die Ansätze hierzu befinden sich derzeit noch im Laborstadium und würden Anpassungen entlang der Wertschöpfungskette, einen Erfahrungsaufbau sowie eine Anpassung von Regelwerken (z. B. Betonnorm) erfordern.

Für ein betoneffizientes Bauen, d.h. für die Reduktion der benötigten Betonmenge bei gleichbleibendem Nutzen der Betonbauteile, sind mit vorgespannten Decken und dem Einsatz von Hohlkörpern heute bereits Ansätze am Markt, für deren Einsatz in Deutschland noch ungehobene Potenziale bestehen und die entsprechend weiter skaliert werden könnten. Der Einsatz korrosionsfreier Bewehrungen anstelle des konventionellen Baustahls könnte spätestens mittelfristig einen signifikanten Beitrag zur Betoneffizienz leisten, insofern die bestehenden Bedenken bzgl. des Einsatzes der alternativen Bewehrungen erfolgreich ausgeräumt werden können (Carbon), der Markthochlauf gelingt (Basalt¹⁰⁴) bzw. trotz im Vergleich zu Baustahl höherer Kosten eine entsprechende Nachfrage entsteht (Glas, Edelstahl). Gradientenbeton, 3D-Druck und (ultra-)hochfeste Betone wurden bereits in Pilotvorhaben demonstriert bzw. werden in vereinzelt Projekten eingesetzt. Insofern ein Markthochlauf erfolgreich ist können diese Ansätze mittelfristig einen relevanten Beitrag zur Betoneffizienz leisten. Prinzipiell könnte auch die Wiederverwendung von ganzen Bauteilen einen Beitrag zur Betoneffizienz leisten. Dies wurde im Projekt jedoch nicht vertieft diskutiert.

Da viele der zuvor genannten Minderungsansätze nur bei bestimmten Bauaufgaben angewendet werden können, ist ein nach Anwendungszweck differenzierter Einsatz von Zementen und Betonen sowie eine weiter verbesserte Qualitätssicherung erforderlich, um diese Minderungsansätze am Markt zu etablieren. Stellenweise muss für eine stärker diversifizierte Wertschöpfungskette auch eine zusätzliche Logistik aufgebaut werden – z. B. für das Betonrecycling und für calcinierte Tone. Durch eine weiter verbesserte Tragwerksplanung und eine nach Anwendung differenzierte Betonzusammensetzung lassen sich zudem auch unter der Verwendung heute etablierter Zemente und Betonbautechniken bereits signifikante Minderungen beim Klinkerbedarf erzielen. Hier gilt es v.a. die bestehenden und zukünftigen Möglichkeiten in der Praxis zu etablieren.

5.2.3 Treiber

Ein zukünftig weiter steigender CO₂-Preis, der den Preis von Zementklinker im Vergleich zu anderen Zement- und Betonbestandteilen erhöht, wirkt als Treiber in Richtung Klinkereffizienz, indem er die Wettbewerbsfähigkeit von klinkerarmen Bindemitteln und Betonen ggü. konventionellen Zementen und Betonen verbessert. Prinzipiell werden die Mehrkosten des Zementklinkers entlang der Wertschöpfungskette bis zum Bauherrn weitergereicht, interagieren im Bausektor jedoch mit vielfältigen weiteren Preissignalen und Einflüssen, so dass

¹⁰³ z. B. Transportdistanzen und veränderter Zementbedarf der Betone.

¹⁰⁴ Beispiel für aus Basalt hergestellte Betonbewehrungen:
www.baustoffwissen.de/baustoffe/baustoffknowhow/forschung_technik_trends/betonbewehrung-aus-basalt-deutsche-basalt-faser-gmbh-fasalt

der Effekt eines steigenden CO₂-Preises auf die Planung und die gewählte Bautechnik nicht ohne Weiteres klar abzuschätzen ist.¹⁰⁵

Die Digitalisierung sowie ein zunehmendes Bewusstsein für die Relevanz einer Kreislaufwirtschaft im Bauwesen sind Treiber, die bereits heute ihre Wirkung entfalten und dies voraussichtlich auch mittel- und langfristig noch tun werden.

5.2.4 Hemmnisse

Die in Kapitel 3.3.2 dargelegten und in der Detail-Roadmap in Quelle: eigene Darstellung, Wuppertal Institut aufgeführten Hemmnisse für einen klinkereffizienten Betonbau sind zu großen Teilen regulatorischer und organisatorischer Natur: starre technische Normen, Nicht-Berücksichtigung von CO₂-Effizienz in der Planung sowie ein Mehraufwand für den differenzierten Einsatz von Zementen und Betonen, der heute standardmäßig nicht entsprechend vergütet wird.

In einigen Fällen stehen dem Einsatz von CO₂-Minderungsmaßnahmen ggf. auch im Vergleich zur konventionellen Bauweise höhere Kosten entgegen; in anderen Fällen werben Anbieter sogar mit Kostenvorteilen ggü. einer konventionellen Bauweise. Eine ökonomische Analyse verschiedener Ansätze wurde im Rahmen des Projekts nicht durchgeführt, so dass zur Wettbewerbsfähigkeit der verschiedenen Ansätze hier keine Aussage getroffen werden kann.

Eine begrenzte Verfügbarkeit geeigneter Ausgangsstoffe hemmt einen klinker- und ressourceneffizienten Betonbau auf verschiedene Weise: eine kurz- und mittelfristig verringerte Verfügbarkeit von Hüttensand und Flugaschen reduziert die Möglichkeiten des Einsatzes von heute etablierten klinkereffizienten Zementen sowie von Portlandkompositzementen und Kompositzementen. Da Hüttensand und Flugasche jedoch in CO₂-intensiven Prozessen entstehen, die im Zuge der Transformation der Energiewirtschaft und der Stahlindustrie zur Klimaneutralität entfallen, kann bzw. sollte dieses „Hemmnis“ des wegfallenden Hüttensands und der entfallenden Flugaschen nicht aufgelöst werden. Stattdessen müssen andere Strategien zur Klinkereffizienz verstärkt vorangetrieben werden. Eine Stand heute begrenzte Verfügbarkeit von calcinierten Tonen in Deutschland hemmt kurzfristig den Markthochlauf von Portlandkompositzementen unter Verwendung dieser Tone. Ein verstärkter Einsatz von RC-Beton wird fallweise durch einen Mangel an geeigneter rezyklierter Gesteinskörnung gehemmt.

5.2.5 Handlungsfelder

Die zentralen Handlungsfelder im Technologiebereich „Neue Zemente und Betonbautechniken“ sind das Schaffen von Märkten und Fördern von CO₂-effizienten Bauweisen sowie die Integration von neuen Bindemitteln, Zementen, Betonen und Bautechniken in die Baupraxis (vgl. Kapitel 6). Für das Schaffen von Märkten und Fördern von CO₂-effizienten Bauweisen wird gemäß der Roadmap eine Sensibilisierung von Bauherren und Bauherrinnen sowie Tragwerksplanern und -planerinnen für graue Emissionen kurzfristig angegangen, um Marktnischen zu schaffen bzw. zu vergrößern. Ein Abfedern erhöhter Kosten CO₂-effizienter Bindemittel, Zemente, Betone und erfolgt kurzfristig und – falls erforderlich – auch mittelfristig. Mittel- bis langfristig unterstellt die Roadmap, dass durch Weiterentwicklung CO₂-effizienter Verfahren und durch einen steigenden CO₂-Preis die Wirtschaftlichkeit CO₂-effizienten Bauens auch ohne gesonderte Förderung erreicht werden kann. Eine nachhaltige Beschaffung durch die öffentliche Hand ist kurzfristig ein wichtiger Hebel, um Marktnischen zu schaffen und bietet

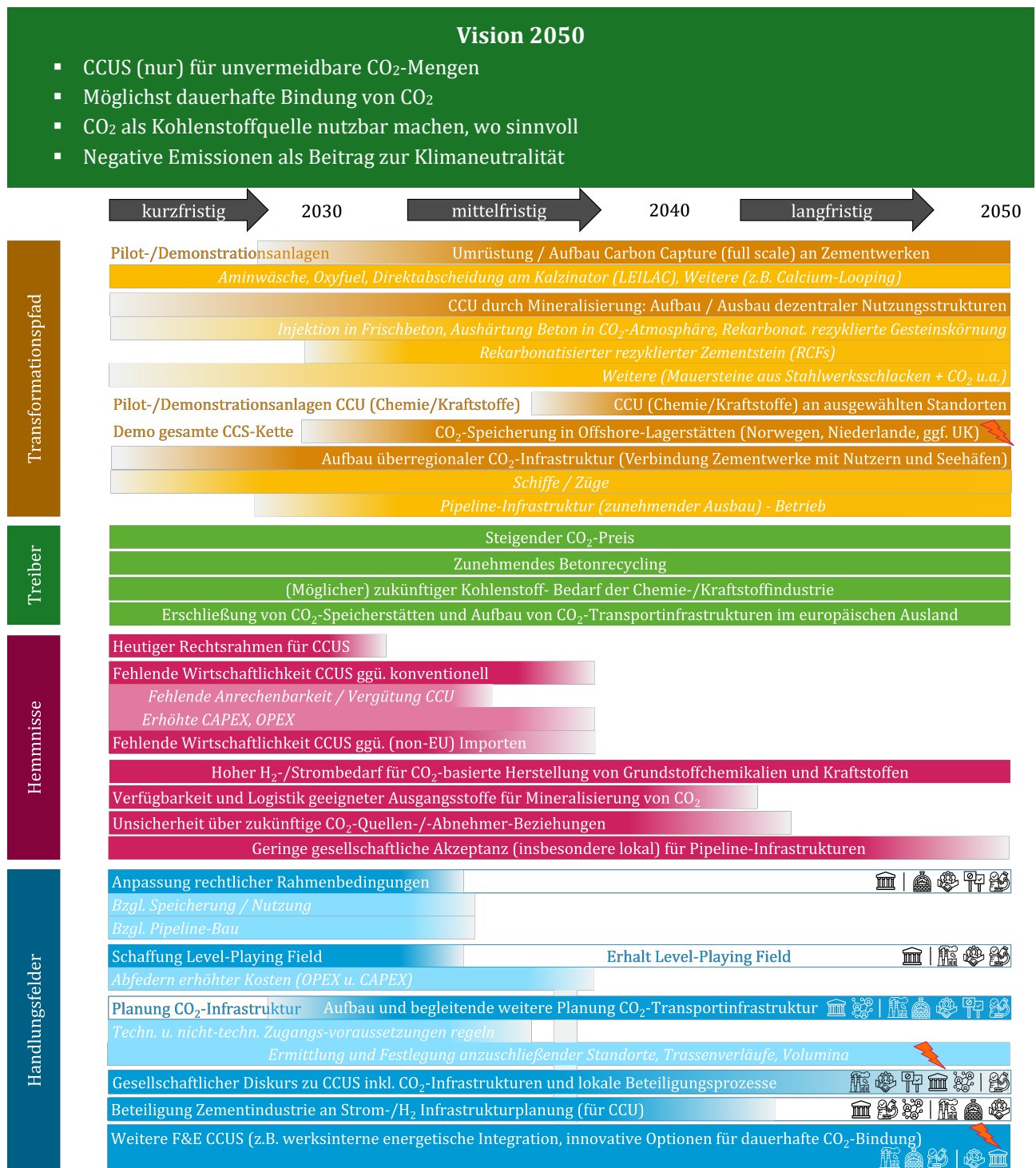
¹⁰⁵ Die Effekte steigender Klinkerkosten wurden im Rahmen des Projekts nicht vertieft analysiert.

auch mittel- und langfristig die Möglichkeit, Standards zu setzen und das Ambitionsniveau kontinuierlich anzuheben.

Für die Integration von neuen Zementen, Bindemitteln, Betonen und Bautechniken in die Baupraxis ist die Anpassung von Normen und Standards an ein sich kontinuierlich veränderndes Portfolio von Produkten und Bautechniken eine Daueraufgabe. Die kurzfristige Zulassung performance-basierter Nachweise für die Darlegung der normgerechten bautechnischen Eigenschaften neuer Produkte ermöglicht in der Roadmap mittel- und langfristig, den Marktzugang für neue Produkte und Bautechniken zu erleichtern. Ein zentrales Instrument für die Abwägung zwischen verschiedenen Bauweisen ist gemäß der Roadmap zukünftig der CO₂-Fußabdruck von Gebäuden. Entsprechende Schritte zur Etablierung dieses Instruments werden zeitnah unternommen. Durch eine Ausweitung des Informations- und Qualifikationsangebots werden die heute bei Tragwerksplanern und -planerinnen, Architekten und Architektinnen und Bauherren und Bauherrinnen bestehenden Kenntnislücken zu klinker- und ressourceneffizientem Bauen kurz- bis mittelfristig verkleinert und es wird auch langfristig ein dauerhafter Informationsfluss in diesem dynamischen Feld gewährleistet.

5.3 Detail-Roadmap Carbon Capture/Utilization and Storage (CCUS)

Abbildung 20: Vision und Detail-Roadmap CCUS



Quelle: eigene Darstellung, Wuppertal Institut

Hinweis: Zur Definition der für die Umsetzung der Maßnahmen relevanten Akteursgruppen (= Icons am rechten Rand der Handlungsfelder in der Roadmap) siehe die Erläuterungen und die Tabelle 6 am Anfang von Kapitel 4.

Als „weitere Akteure“ sind in den Handlungsfeldern „Planung & Aufbau CO₂-Infrastruktur“ sowie „Gesellschaftlicher Diskurs zu CCUS inkl. CO₂-Infrastrukturen und lokale Beteiligungsprozesse“ insbesondere Gasnetzbetreiber zu verstehen. In dem Handlungsfeld „Beteiligung Zementindustrie an Strom-/H₂-Infrastrukturplanung (für CCU)“ wird zusätzlich zu den Gasnetzbetreibern der Kreis „weiterer Akteure“ noch auf andere Industriebranchen (Stahl, Chemie), Stromnetz-Betreiber und die BNetzA erweitert.

5.3.1 Vision

Abbildung 20 zeigt die Detail-Roadmap CCUS im Überblick. In der im Projekt entwickelten Vision einer klimaneutralen Zementindustrie wird CCUS (nur) für „unvermeidbare“ CO₂-Mengen eingesetzt – d.h. für die CO₂-Mengen, die nach erfolgreicher Umsetzung der in den Detail-Roadmaps „Thermische Energie“ (Abbildung 18) sowie „Neue Zemente und Betonbautechniken“ (Quelle: eigene Darstellung, Wuppertal Institut) dargestellten Minderungshebel verbleiben. Das abgeschiedene „unvermeidbare“ CO₂, das überwiegend aus der Entsäuerung von Kalkstein entstammt, soll möglichst dauerhaft gebunden werden, um eine Emission in die Atmosphäre auch mittel- und langfristig zu vermeiden. In Einzelfällen kann es jedoch im Rahmen einer Gesamtsystembetrachtung trotzdem sinnvoll sein, CO₂ aus der Zementklinkerherstellung als Kohlenstoffquelle zu nutzen, auch wenn hierbei nur eine temporäre Bindung des CO₂ erfolgt. Daher wird diese Möglichkeit in der Vision ebenfalls berücksichtigt. CCUS, das zu einer dauerhaften CO₂-Bindung führt, ermöglicht es schlussendlich in Kombination mit biogenen Brennstoffen negative Emissionen zu erzielen. Negative Emissionen ermöglichen die Kompensation von Restemissionen (z. B. aus unvollständiger CO₂-Abscheidung) und haben daher eine wichtige Rolle für das Erreichen der Klimaneutralität.

5.3.2 Transformationspfad

Der Transformationspfad umfasst die Teilbereiche CO₂-Abscheidung, CO₂-Transport und Verbleib des CO₂. Für die CO₂-Abscheidung gibt es verschiedene Verfahren, die heute an Pilot- bzw. Demonstrationsanlagen getestet und weiterentwickelt werden. Verschiedene Verfahren haben unterschiedliche Vor- und Nachteile, die je nach Projekt gegeneinander abgewogen werden müssen. Eine Fokussierung auf bestimmte CO₂-Abscheidungsverfahren erfolgte daher in der Roadmap nicht. In der Roadmap erfolgt ab ca. 2030 ein Aufbau von CO₂-Abscheideanlagen im industriellen Maßstab an Zementwerken in Deutschland.¹⁰⁶

Ein Teil des abgeschiedenen CO₂ wird in der Roadmap mittels Mineralisierung genutzt. Hierfür sind verschiedene Ansätze in der Entwicklung bzw. frühen Phase der Markteinführung (s. Infobox in Kapitel 3.2.4.1). Eine Skalierung erscheint je nach Ansatz kurz- bis mittelfristig möglich. Die absoluten (langfristigen) Potenziale für eine CO₂-Bindung sind Stand heute unklar. Der Aufbau von dezentralen Nutzungs- und Logistikstrukturen für den Transport von CO₂ oder anderen Ausgangsstoffen der Verfahren (z. B. Betonabbruch) ist erforderlich.

CO₂-Nutzung in der chemischen Industrie bzw. der Kraftstoffindustrie erfolgt im industriellen Maßstab in der Roadmap aufgrund der damit verbundenen Energiebedarfe und der nur temporären Bindung des CO₂ – falls überhaupt – erst mittel- bis langfristig und nur an ausgewählten Standorten¹⁰⁷ (vgl. Kapitel 3.2.4.2) Pilot- und Demonstrationsanlagen für CCU in der Chemie- bzw. Kraftstoffindustrie sind bereits heute in der Planung, so dass für die Weiterentwicklung der Verfahren und Technologien und für die Demonstration der gesamten

¹⁰⁶ Im europäischen Ausland ist dies bereits früher der Fall. Z. B. plant HeidelbergCement am Zementwerk Brevik (NO) eine Abscheidung im industriellen Maßstab ab 2024.
www.heidelbergcement.com/de/pi-15-12-2020

¹⁰⁷ Eine Festlegung auf bestimmte Standorte erfolgte im Projekt nicht.

Kette von der Abscheidung bis zur Nutzung in der Roadmap ein vergleichsweise langer Zeitraum verbleibt.

Die geologische Speicherung von CO₂ steht im europäischen Ausland an der Schwelle zum kommerziellen Betrieb und stellt mittel- und langfristig auch eine Möglichkeit für den Verbleib von CO₂ aus deutschen Zementwerken dar. Da die verschiedenen Verfahren zur Mineralisierung von CO₂ aus heutiger Sicht voraussichtlich nur einen Teil der bei der Zementherstellung entstehenden CO₂-Mengen binden können und CCU für chemische Grundstoffe und Kraftstoffe in der Roadmap ebenfalls nur eine überschaubare Rolle einnehmen soll, erfolgt in der Roadmap eine geologische Speicherung von CO₂ in dem Umfang, in dem kein anderweitiger Verbleib des CO₂ vorgesehen ist. Zwischen den Akteuren und Akteurinnen gab es unterschiedliche Perspektiven darauf, ob eine geologische Speicherung von CO₂ eine langfristig tragfähige Lösung darstellt, oder nur eine vorübergehende „Notlösung“ ist, bis bessere Verfahren zur CO₂-Bindung entwickelt wurden.

Um Zementwerke mit Seehäfen (CO₂-Transport zur geologischen Speicherstätte) bzw. Raffinerien oder Chemiewerken (CCU) zu verbinden ist eine überregionale CO₂-Infrastruktur erforderlich. In einer ersten Phase bis ca. zum Jahr 2030, in der vergleichsweise kleine CO₂-Mengen aus Pilot- und Demonstrationsanlagen transportiert werden müssen und in der sich eine räumliche Struktur von langfristig verbleibenden CO₂-Quellen und -Abnehmern herauskristallisiert, spielen in der Roadmap Schiffe und Züge die zentrale Rolle. Ab ca. 2030 ist der Betrieb erster CO₂-Pipelines sowie ein kontinuierlicher Ausbau des Pipeline-Netzwerks vorgesehen. An vielen – insbesondere größeren – Standorten der Zementindustrie, an denen ein Abtransport des abgeschiedenen CO₂ per Schiff nicht möglich ist, dürfte bei einer Abscheidung im industriellen Maßstab eine CO₂-Pipeline die mit Abstand wirtschaftlichste und logistisch praktikabelste Lösung für den Abtransport von CO₂ darstellen. Daher müssen die Skalierung der Abscheidung und der Aufbau einer CO₂-Infrastruktur gemeinsam gedacht werden und in enger zeitlicher Abstimmung erfolgen.

5.3.3 Treiber

Ein steigender bzw. ausreichend hoher CO₂-Preis ist ein wesentlicher Treiber für CCUS, da für CO₂-Abscheidung, Transport und ggf. Speicherung im Vergleich zur konventionellen Zementklinkerherstellung zusätzliche Kosten entstehen. Ein (ausreichend hoher) CO₂-Preis ermöglicht demnach einen wirtschaftlichen Betrieb von CCUS, falls die vermiedenen Kosten für den Erwerb von Emissionszertifikaten höher sind als die Mehrkosten durch CCUS und ein ausreichender Schutz gegenüber Carbon Leakage besteht.

Die Erschließung von CO₂-Speicherstätten und der Aufbau zugehöriger CO₂-Transportinfrastrukturen im europäischen Ausland bieten eine Perspektive für den Verbleib des CO₂ aus deutschen Zementwerken und befördern entsprechend Überlegungen und Planungen zum Aufbau von Abscheideanlagen durch Zementhersteller. Zudem bieten sie insofern eine Grundlage für Infrastrukturplanungen, als dass mögliche Zielhäfen einer inländischen CO₂-Infrastruktur identifiziert werden können.

Der zukünftige Kohlenstoffbedarf der Chemie- und Kraftstoffindustrie sowie die Perspektive einer möglichen (anteiligen) Bereitstellung dieses Kohlenstoffs aus inländischem CO₂ schaffen einen Anreiz für die Weiterentwicklung und Erprobung entsprechender CCU-Verfahren.

Ein zunehmendes Betonrecycling – welches zunächst aus Gründen der Ressourceneffizienz verfolgt wird – und die Weiterentwicklung von Verfahren zur Separierung verschiedener Fraktionen von Betonabbruch bieten Ansatzpunkte für die Erprobung und Skalierung von

Verfahren zur Mineralisierung von CO₂ durch eine Rekarbonatisierung von rezykliertes Gesteinskörnung bzw. von rezykliertem Zementstein.

5.3.4 Hemmnisse

Als zentrales Hemmnis für die Entwicklung von CCUS-Projekten wurde im Projekt der heutige Rechtsrahmen für CCUS identifiziert. Neben offenen Vergütungsfragen für CCU (s.u.) sowie der rechtlichen Unzulässigkeit von CCS bestehen weitere rechtliche Hemmnisse für das Errichten von Anlagen für CCU sowie für den CO₂-Transport (vgl. Kapitel 6).

Ein wesentliches Hemmnis für CCUS ist die (heute noch) fehlende Wirtschaftlichkeit gegenüber einer konventionellen Produktion. Gründe dafür sind einerseits die mit CCUS verbundenen erhöhten Kapitalkosten (CAPEX) und Betriebskosten (OPEX). Auf der anderen Seite sieht der regulatorische Rahmen des EU ETS (zum Zeitpunkt der Berichtserstellung) CO₂, das in eine Nutzung überführt wird, nicht als abzugsfähig an – d.h. die Kosten für den Erwerb von CO₂-Zertifikaten werden derzeit durch CCU nicht gesenkt.¹⁰⁸ Eine geologische Speicherung würde die gemäß EU ETS anzurechnenden Emissionen zwar senken, ist aber derzeit rechtlich weder im Inland noch im Ausland möglich. Die Wirtschaftlichkeit von CCUS ist auch mit Blick auf den Wettbewerb mit dem außereuropäischen Ausland von Relevanz, da ohne entsprechende Schutzmaßnahmen (z. B. Grenzkostenausgleich) die Gefahr erhöhter Importe aus non-EU Ländern und damit von Carbon Leakage besteht.

Ein spezifischeres Hemmnis für die CO₂-basierte Herstellung von chemischen Grundstoffen und Kraftstoffen stellt der damit einhergehende hohe Wasserstoff- bzw. Strombedarf dar. Das Hemmnis umfasst sowohl die prinzipielle Verfügbarkeit entsprechender erneuerbarer Energieträger in Deutschland, ggf. die Bereitstellung am Standort, als auch die Kosten (OPEX, s.o.). Die Roadmap geht davon aus, dass erneuerbarer Strom und grüner Wasserstoff (in Deutschland) auch langfristig knappe und damit wertvolle Güter bleiben werden, so dass der hohe Bedarf daran auch langfristig als (potenzielles) Hemmnis bestehen bleibt.

Bzgl. CCU durch Mineralisierung sind zunächst noch Forschung und Entwicklung erforderlich, um Verfahren zu etablieren, die 1) breit verfügbare Ausgangsstoffe nutzen, 2) deren Potenzial für eine CO₂-Aufnahme ausreichend groß ist, um den Transport der Ausgangsmaterialien bzw. des CO₂s wirtschaftlich und aus Sicht der CO₂-Bilanz anzureizen, und die 3) marktgängige Produkte hervorbringen. Zudem ist eine entsprechende Logistik für diese Ausgangsstoffe bzw. für das zu nutzende CO₂ aufzubauen.

Die fehlende Möglichkeit für den Abtransport von CO₂ von den Standorten der Klinkerherstellung ist heute ein zentrales Hemmnis für CCUS. Für die Planung und den Aufbau einer CO₂-Infrastruktur besteht neben rechtlichen Fragen (s.o.) ein Hemmnis darin, dass noch Unklarheit darüber herrscht, zwischen welchen Orten zukünftig CO₂ in jeweils welchen Mengen transportiert werden soll. Dies erschwert insbesondere die Planung von Pipelines, die von vornherein auf bestimmte CO₂-Mengen ausgelegt werden müssen, und die nach Errichtung auch räumlich nicht mehr verändert werden können.

Ein sehr wesentliches Hemmnis für den Aufbau einer CO₂-Pipeline-Infrastruktur besteht auch in der (vermuteten) geringen gesellschaftlichen Akzeptanz dafür. Insbesondere auf der lokalen Ebene ist – basierend auf Erfahrungen aus anderen Infrastrukturprojekten – mit Widerstand und langwierigen gerichtlichen Auseinandersetzungen zu rechnen.

¹⁰⁸ Eine Ausnahme besteht nach einem Urteil des Europäischen Gerichtshofs („Schaefer Kalk Urteil“) für den Fall, dass CO₂ zur Herstellung von gefällttem Kalziumkarbonat genutzt wird.

5.3.5 Handlungsfelder

Um CCUS-Projekte zu ermöglichen und so den Boden für den Markthochlauf zu bereiten ist eine Anpassung der rechtlichen Rahmenbedingungen und die Beseitigung rechtlicher Hürden erforderlich. Dies umfasst sowohl rechtliche Aspekte zur Speicherung bzw. Nutzung als auch bzgl. des Baus von CO₂-Pipelines (vgl. Kapitel 6).

Aus der heute fehlenden Wirtschaftlichkeit von CCUS ergibt sich der Bedarf der Schaffung und des Erhalts eines Level-Playing Fields, in dem eine Zementklinkerproduktion mit CCUS wirtschaftlich betrieben und sowohl gegenüber der Konkurrenz aus konventioneller Produktion als auch gegenüber Importen aus non-EU Ländern bestehen kann. Dies kann zeitweise auch das Abfedern erhöhter CAPEX und OPEX umfassen, solange der wettbewerbliche Rahmen (insbesondere die Höhe des CO₂-Preises) eine solche Wirtschaftlichkeit ohne zusätzliche Maßnahmen noch nicht ermöglicht.

Der Aufbau einer CO₂-Transportinfrastruktur erfolgt gemäß der Roadmap in Abstimmung mit dem Hochlauf der CO₂-Abscheidung im industriellen Maßstab und so frühzeitig, dass ein CO₂-Abtransport von ersten Standorten ab spätestens 2030 möglich ist. Um dies zu erreichen, erfolgt bereits sehr kurzfristig eine entsprechende (erste) Planung, die im Verlauf des Infrastrukturausbaus ggf. angepasst wird und es werden kurzfristig technische und nicht-technische Zugangsvoraussetzungen zur CO₂-Infrastruktur diskutiert und geregelt. Bzgl. des Anschlusses von Standorten gab es im Projekt abweichende Stimmen dazu, ob ein „diskriminierungsfreier“ Zugang aller Standorte gewährleistet sollte oder unter Berücksichtigung von zu überbrückenden Entfernungen und geographischen Gegebenheiten eher eine Auswahl von Standorten nach dem Kriterium der Effizienz¹⁰⁹ erfolgen sollte.

Um für gesellschaftliche Akzeptanz für CCUS und die damit verbundenen CO₂-Infrastrukturen zu werben wird zeitnah ein gesellschaftlicher Prozess angestoßen. In den durch eine CO₂-Infrastruktur direkt betroffenen Gebieten werden frühzeitig Beteiligungsprozesse durchgeführt. Hierbei wird eine klare Kommunikation über die Ziele und Entscheidungsbefugnisse der beteiligten Akteure und Akteurinnen gewährleistet.

Um eine (systemdienliche) Verfügbarkeit von Strom und Wasserstoff für CCU an den Standorten der Zementindustrie bzw. der CO₂-Nutzer zu gewährleisten, werden die Zementindustrie sowie etwaige andere CO₂-Nutzer an den einschlägigen Infrastrukturplanungen auf geeignete Weise beteiligt.

Im Zuge der Markteinführung und Skalierung von CCUS wird weitere Forschung und Entwicklung (F&E) durchgeführt, z. B. zur werksinternen energetischen Integration von CO₂-Abscheidungsanlagen. Zudem werden alternative Optionen für eine dauerhafte Bindung von CO₂ erforscht und falls möglich zur Marktreife gebracht. Es bestanden in der Kerngruppe unterschiedliche Einschätzungen dazu, welche Rolle solche alternativen Optionen für eine dauerhafte CO₂-Bindung im Zeitraum bis 2050 spielen können.

¹⁰⁹ Effizienz im Sinne der Fragestellung, welcher Aufwand (z. B. Länge einer Pipeline) darf/soll betrieben werden, um welche Menge CO₂ abtransportieren zu können.

6 Ausgewählte Politikinstrumente und Maßnahmen in den Bereichen NZB und CCUS

Die Dekarbonisierung der Zementindustrie findet in einem Mehrebenen-Governance-System statt, mit Akteuren, Akteurinnen und Institutionen auf der lokalen/regionalen, nationalen, europäischen und stellenweise auch globalen Ebene. Dies umfasst sowohl öffentliche Akteure wie Ministerien und Regulierungsbehörden, als auch private Akteursgruppen (Zementhersteller und -Verarbeiter, Umweltverbände, Zivilgesellschaft). Für die Umsetzung von Dekarbonisierungsmaßnahmen in der Zementindustrie spielen neben regulativen Vorgaben durch staatliche Akteure auch finanzielle und informative Maßnahmen sowie Aushandlungsprozesse zwischen Unternehmen, Politik und Gesellschaft eine Rolle.

Wichtige Beschlüsse finden auf der EU-Ebene im Rahmen der derzeit laufenden Verhandlungen zum Fit-for-55-Paket zur Umsetzung des European Green Deals statt. Von besonderer Bedeutung für Grundstoffindustrien wie Zement sind die (Weiter-)Entwicklungen des EU-Emissionshandelssystems (EU-ETS) und eines CO₂-Grenzausgleichssystems (Carbon Border Adjustment Mechanism – CBAM). Eine offene Frage im EU-ETS ist beispielsweise die Anrechenbarkeit von abgedecktem CO₂, das einer Nutzung zugeführt wird.

Ein wichtiges Instrument auf der nationalen Ebene sind sogenannte Klimaschutzverträge (CCfD – Carbon Contracts for Difference) zwischen Unternehmen und dem Bund zur Abfederung von Mehrkosten einer klimafreundlichen Produktionsweise. Hierzu finden bereits diverse Projekte und politische Aktivitäten statt. Im Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) wird derzeit ein nationales CCfD-Pilotprogramm entwickelt.

Diese Instrumente auf der EU- und Bundesebene sind ein wichtiger Teil des politisch-institutionellen Rahmens für die Dekarbonisierung der Zementindustrie und anderer Grundstoffindustrien. Angesichts der Komplexität des Mehrebenen-Governance-Systems der Zementindustrie und dem Projektfokus auf der nationalen Ebene wurde der Schwerpunkt innerhalb des DekarbInd-Projekts aber auf kurz- und mittelfristige Instrumente gelegt, die öffentliche und private Akteure in Deutschland realisieren können. Dabei geht es sowohl um eine hoheitliche Regulierung (als Politikinstrument im engeren Sinne) als auch explizit um weitere Stakeholderaktivitäten wie öffentlich-private Kooperationen und zivilgesellschaftliche Beteiligung. Mit dieser Schwerpunktsetzung sollen auch bislang weniger intensiv diskutierte Aspekte in den Blick genommen und damit ein komplementärer Fokus zu bereits laufenden Diskussionen zu Instrumenten etwa im Rahmen des Fit-for-55-Pakets der EU und den bereits fortgeschrittenen Prozessen bei der Entwicklung von Klimaschutzverträgen eingenommen werden.

Die im Folgenden dargestellten Politikinstrumente für eine Dekarbonisierung der Zementindustrie, die kurz- und mittelfristig von Akteuren in Deutschland durchgeführt werden können, sind das inhaltliche Ergebnis verschiedener Aktivitäten und stakeholderorientierten Erhebungen im Rahmen des Projekts DekarbInd. Dies beinhaltet sowohl Literaturrecherchen, Vorüberlegungen und Analysen des Projektteams als auch drei jeweils rund 90-minütige semi-strukturierte Experten-Interviews (s. Kapitel 2.4) sowie einen halbtägigen virtuellen Workshop am 7. April 2022 mit Experten und Expertinnen aus den Bereichen Zementherstellung und -Verarbeitung, chemische Industrie, Verbände, NGO, Consulting, Wissenschaft sowie Behörden und Politik (s. Kapitel 2.4.4). Als Synthese der durchgeführten Recherchen, Interviews und Diskussionen wurde ein Thesenpapier erstellt, dessen zentrale Ergebnisse im Folgenden zusammengefasst sind. Damit soll in kompakter Form eine Übersicht über zentrale

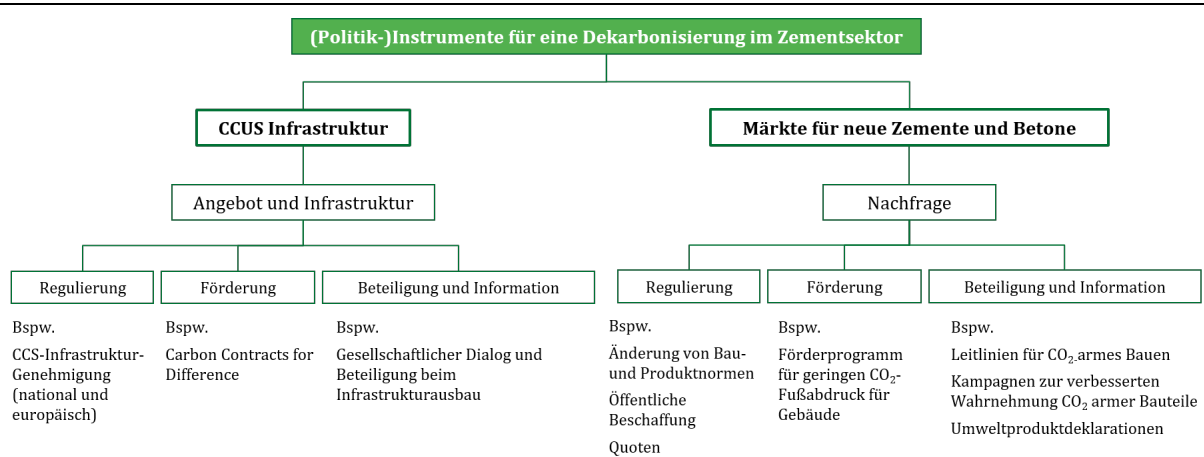
Politikinstrumente und Stakeholderaktivitäten für die Dekarbonisierung der Zement- und Betonindustrie in den hier fokussierten Bereichen

1. Neue Zemente und Betonbautechniken (NZB) sowie
2. Infrastrukturen für CO₂-Nutzung und -Speicherung (CCUS)

gegeben werden. Nicht alle Thesen geben dabei notwendigerweise die Sichtweise aller Teilnehmerinnen und Teilnehmer des Workshops oder aller interviewten Expertinnen und Experten wieder.

Abbildung 21 zeigt eine Klassifizierung der im Projekt beispielhaft behandelten (Politik-) Instrumente, gegliedert nach den Bereichen Regulierung, Förderung sowie Beteiligung und Information.

Abbildung 21: Grundsätzliche Klassifizierung der im Fokus des Projektes stehenden Politikinstrumente



Quelle: eigene Darstellung, Wuppertal Institut

6.1 Instrumente für neue Zemente und Betonbautechniken (NZB)

Zentrale Handlungsfelder für eine Erhöhung der Nachfrage nach NZB sind einerseits die Integration von neuen Zementen und Bautechniken in die Baupraxis sowie andererseits die Schaffung von Märkten bzw. Förderung von CO₂-effizienten Bauweisen (vgl. Kapitel 3.4).

Ein mögliches regulatives Instrument dafür sind Quoten für eine verpflichtende Mindestmenge von CO₂-armen Zementen in Bauvorhaben (als bundesgesetzliche Vorgabe). Eine Problematik bei der Einführung dieses Instruments ist allerdings, dass die regionale Verfügbarkeit von CO₂-armen Zementen sehr unterschiedlich ist bzw. sein kann. Nicht alle Produkte bzw. Ausgangsstoffe (wie beispielsweise calcinierte Tone) werden zukünftig in Deutschland flächendeckend verfügbar sein. Räumliche Gegebenheiten und etwaige Transportbedarfe sind somit bei einer Gesamtbewertung dieses Instruments zu berücksichtigen.

Eine nachhaltige öffentliche Beschaffung, d.h. die Selbstverpflichtung des Staats und staatseigener Unternehmen bei Bauprojekten, klimafreundliche Materialien zu verwenden, ist ein weiteres Instrument, um einen Absatzmarkt für NZB zu schaffen. Die öffentliche Hand kann als wichtiger Bauträger eine Vorreiter- und Vorbildrolle einnehmen, bevor die Abnahme von CO₂-armen Zementen bzw. der Einsatz innovativer Betonbautechniken auch von privaten Bauträgern eingefordert wird. Es sind dabei die unterschiedlichen Einsatzmöglichkeiten von NZB zu berücksichtigen (Hoch-/Tiefbau sowie verschiedene Expositionsclassen).

Ein wichtiges Instrument für die Markteinführung von NZB ist die Sichtbarmachung und Berechnung des CO₂-Fußabdrucks von Bauten, um diesen zu einem relevanten Kennwert für Auftraggeber*innen, Planer*innen und andere Akteure und Akteurinnen aus der Praxis zu machen. Technisch-bilanziell ist dies bereits möglich. Aus Sicht mehrerer Stakeholder*innen sollten dabei die CO₂-Emissionen über den gesamten Lebenszyklus von Gebäuden bilanziert werden, d.h. der Energieaufwand der Baustoffe, die Effekte der Wärmedämmung und -Speicherung bis hin zum Recycling. Ein geeigneter Kennwert für diese Bilanzierung ist z. B. die auf die Nutzfläche bezogene spezifische Einheit kg CO₂/(m² a). Dabei ist zu beachten, dass die Einhaltung von spezifischen Energiegrenzwerten (und indirekt auch CO₂-Grenzwerten) während der Nutzungsphase bereits über das Gebäudeenergiegesetz und dem darin implementierten Energieausweis geregelt ist.

Mögliche informatorische Steuerungsinstrumente auf der Grundlage des CO₂-Fußabdrucks von Gebäuden (graue Energie) sind Gebäudepässe bzw. die Integration spez. CO₂-Kennwerte in die bestehenden Gebäudeenergieausweise (für Neubauten). Mögliche nächste Schritte wären dann eine Gebäudeklassifizierung (vgl. Energieeffizienz-Label) und ggf. Anreize über KfW-Kredite oder etwaige regulatorische Vorgaben (bspw. Einführung eines verbindlichen Grenzwertes für CO₂ pro Quadratmeter Nutzfläche und Jahr durch den Gesetzgeber). Die Politik (BMWK bzw. BMWSB¹¹⁰) wären die verantwortlichen Akteure, um einen CO₂-Fußabdruck verpflichtend einzuführen. Für diese Instrumente ist es in einem ersten Schritt allerdings notwendig, eine fundierte Datenbasis zu den Gebäudeemissionen unter Berücksichtigung ihrer jeweiligen Baustoffe zu schaffen. Ein möglicher Akteur dafür ist die Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (DGNB e.V.).

Ein Beispiel für ein auf internationaler Ebene bereits bestehendes Zertifizierungssystem der CO₂-effizienz von Betonen ist die Klassifizierung von CO₂-Klassen des Concrete Sustainability Council (CSC)¹¹¹: Die Klassen weisen aus, wie viel effizienter ein Beton im Vergleich zu einem (regionalen) Referenzbeton bei gleicher Leistungsfähigkeit ist.

Für eine Integration von neuen Zementen und Bautechniken in die Baupraxis sind - in Ergänzung zur neuen Zementnorm DIN EN 197-5 - Änderungen von Bau- und Produktnormen erforderlich. Technische Regelwerkssetzungen sind ein zentrales Instrument für die Verbreitung neuer Zemente und Betonbautechniken und werden fortlaufend durchgeführt, um ein klinkereffizientes Bauen zu ermöglichen. Eine geänderte Normung ist notwendig, um Baustoffe hinsichtlich ihrer Umweltwirkung einordnen zu können und die Nutzung im Bau zu vereinfachen. Eine neue Betonnorm DIN 1045-2:2021 liegt derzeit in der Entwurfsveröffentlichung für das Einspruchsverfahren vor (Stand April 2022). In dieser neuen Betonnorm werden u.a. die Anwendungsregeln für Portlandkompositzementen (CEM II/C-M) spezifiziert. Portlandkompositzemente mit calcinierten Tonen sind in einer derzeit gültigen Musterverwaltungsvorschrift für technische Bauwerke nicht abgedeckt, werden aber Teil dieser Betonnorm für CEM II/C-Zemente sein. Daneben werden derzeit vom Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb) verschiedene Richtlinien erarbeitet, die ein material- und CO₂-effizientes Bauen befördern können (z. B. zu Ultrahochfesten Betonen, zu Fertigteilhohlplatten und zur Dauerhaftigkeitsprüfung nach dem System der Expositionswiderstandsklassen in Verbindung mit Performanceprüfungen).

¹¹⁰ BMWK: Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz / BMWSB: Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen

¹¹¹ Bei der CSC-Zertifizierung werden CO₂-optimierte Betone - je nach Minderung der THG-Emissionen [kg CO₂-Äquivalente je m³ Beton] um 30, 40, 50 bzw. 60 % gegenüber einem regionalen Referenzwert - in vier Klassen eingeteilt (www.csc-zertifizierung.de). Concrete Sustainability Council: www.concretesustainabilitycouncil.com

Mangelnde Erfahrung mit NZB und Wissensdefizite führen zu einer bislang geringen Marktnachfrage. Es sind daher auch Informations-, Aus- und Weiterbildungsangebote notwendig, um deren Einführung in der Baupraxis zu unterstützen. Diese sollten sich insbesondere an Anwender wie Planer*innen und Architekten und Architektinnen richten¹¹². Eine bereits existierende Plattform, die Informationen und Schulungen anbietet, ist beispielsweise das Informationszentrum Beton¹¹³. Ein weiteres Instrument ist in diesem Zusammenhang die Planungshilfe „Nachhaltig bauen mit Beton“ des DAfStb¹¹⁴. Auch eine verstärkte Integration des Themas CO₂-arme Zemente und Betonbautechniken bzw. CO₂-armes Bauen in die Hochschullehre ist eine Möglichkeit.

6.2 Instrumente für CCUS-Infrastrukturen

Zentrale Handlungsfelder für den Aufbau einer überregionalen CO₂-Infrastruktur sind die Schaffung geeigneter rechtlicher Rahmenbedingungen sowie entsprechende Planungs- und Entwicklungsprozesse. Wichtige rechtliche und planerischer Rahmenbedingungen für den Transport, die Speicherung und Nutzung von CO₂ sind noch nicht abschließend geregelt. Dies ist aber eine Voraussetzung für die Realisierung der hohen Investitionsbedarfe. Neben wirtschaftlich-technischen und regulatorischen Fragen geht es auch um gesellschaftliche Diskurse und Beteiligungsprozesse, um auch für Laien Informationen für fundierte Entscheidungen bereitzustellen und für Akzeptanz für die benötigten Infrastrukturen zu werben.

Die Errichtung von Anlagen zur CO₂-Abscheidung wird in Deutschland über das Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) geregelt. Eine Regelungslücke ist, dass sich das immissionsschutzrechtliche Genehmigungsverfahren bisher nur auf CO₂-Abscheidungsanlagen für CCS, nicht aber für CCU bezieht, obwohl sich die Anlagen technologisch nicht unterscheiden. Der Rechtsrahmen ist dementsprechend zu erweitern. Für die kurzfristige Umsetzung von CCUS-Projekten (beispielsweise „Westküste 100“¹¹⁵) könnten temporäre Ausnahmegenehmigungen die Zeit überbrücken, bis eine entsprechende Überarbeitung des BImSchG erfolgt ist.

Eine zentrale Rechtsgrundlage für die Speicherung und den Transport von CO₂ ist das 2012 beschlossene Kohlendioxid-Speicherungsgesetz (KSpG). Das KSpG regelt die „Erforschung, Erprobung und Demonstration von Technologien zur dauerhaften Speicherung von Kohlendioxid in unterirdischen Gesteinsschichten“ (KSpG § 1). Die CO₂-Nutzung wird darin nicht berücksichtigt, da bei der Verabschiedung des Gesetzes entsprechende Technologien noch nicht ausgereift waren. Eine notwendige Änderung ist daher die Erweiterung des bestehenden Rechtsrahmens/KSpG auf die CO₂-Nutzung. Entsprechende Anpassungen befinden sich bereits innerhalb der Bundesregierung bzw. dem BMWK in der Diskussion. In einem ersten Schritt sind geringfügige rechtliche Anpassungen denkbar („minimalinvasiv“), um eine schnelle Entwicklung und Bewilligung von Projekten zu ermöglichen, bevor in einem nächsten Schritt eine umfassende Anpassung des KSpG vorgenommen werden sollte.

Der innerstaatliche Transport von CO₂ erfordert eine entsprechende Rechtsverordnung (bspw. nach Vorbild der Gashochdruckleitungsverordnung). Prinzipiell ist ein CO₂-Transport mit unterschiedlichen Transportmitteln wie LKW, Zug und Schiff möglich. Größere Mengen sind wirtschaftlich aber nur über Pipelines zu transportieren. Im Unterschied zu Wasserstoff, der in

¹¹² Die CO₂-Bilanzierung ist bislang noch keine Leistung, die für Planer*innen und Architekten/ Architektinnen vergütet wird. Um dies zu ermöglichen, müsste die Honorarordnung für Architekten und Ingenieure (HOAI) dementsprechend angepasst werden.

¹¹³ s.u. www.beton.org

¹¹⁴ www.dafstb.de/application/2021-10-29_DAfStb-Planungshilfe_Nachhaltig_Bauen_mit_Beton_final.pdf

¹¹⁵ www.westkueste100.de

(bestehenden) Erdgasleitungen transportiert werden kann, sind für den Transport von flüssigem bzw. überkritischem CO₂ neue Leitungen zu errichten.

Für einen grenzüberschreitenden Transport von CO₂ mit dem Ziel der Offshore-Speicherung im tiefen Untergrund unter dem Meeresboden ist eine Ratifizierung des Zusatzes zu §6 im London-Protokoll (weltweites Übereinkommen für den Schutz der Meeresumwelt) durch Deutschland notwendig. In einem nächsten Schritt müsste Deutschland bilaterale Abkommen mit den Ländern schließen, in die das CO₂ transportiert werden soll (v.a. Nordsee-Anrainerstaaten wie Norwegen). Ein zentraler Aspekt werden Haftungsfragen sein (wer haftet für wie lange für die Speicherung und Nichtwiederfreisetzung des CO₂?). Dafür sind politische Aushandlungsprozesse notwendig. Alternativ zu bilateralen Abkommen ist eine supranationale Regelung auf EU-Ebene denkbar. Neben bilateralen Abkommen zwischen Staaten sind parallel auch Verhandlungen zwischen Staaten und Unternehmen als CO₂-„Anbieter“ erforderlich. Grundsätzlich ist festzulegen, in welche Staaten CO₂ überhaupt exportiert werden darf bzw. soll. Es kommen prinzipiell auch Drittstaaten außerhalb der EU in Betracht. Neben dem über das London-Protokoll zu regelndem Transport für eine Offshore-Speicherung ist prinzipiell auch eine Onshore-Speicherung im Ausland denkbar. Hierfür wäre zu prüfen, ob der durch das London-Protokoll gesetzte Rechtsrahmen ausreichend ist, oder ob ein neuer/ergänzender Rechtsrahmen geschaffen werden müsste.

Neben dem Rechtsrahmen sind damit zusammenhängende Fragen zum Planungs- und Entwicklungsprozess einer CO₂-Infrastruktur zu klären. Wichtige Fragen sind hier insbesondere die Zuständigkeiten für die Planung, technische und nicht-technische Zugangsvoraussetzungen,¹¹⁶ Third-Party Access sowie Trassenverläufe und anzuschließende Standorte, Transport-Volumina, etc. Da CO₂ kein Energieträger ist und es keinen Endverbrauchermarkt gibt, ist die Planung einer CO₂-Infrastruktur bislang nicht Gegenstand einer Regulierung z. B. durch die Bundesnetzagentur (BNetzA). Daher können auch nicht-staatliche Akteure eine führende Rolle bei der Planung und Entwicklung eines CO₂-Pipelinenetzes einnehmen.

Für die Planung und Entwicklung einer CO₂-Infrastruktur können zwei sich ergänzende strategische Ansatzpunkte unterschieden werden. Auf der einen Seite geht es um Bottom-Up-Ansätze, bei denen regionale Cluster als „Keimzellen“ einer großmaßstäbigen CO₂-Infrastruktur fungieren. Dabei kann es sich um Initiativen wie das oben genannte Projekt „Westküste 100“ oder das geplante CO₂-Netz der Open Grid Europe (OGE)¹¹⁷ handeln. Der Sachverstand von Unternehmen ist einzubeziehen, etwa um Quellen-Senken-Beziehungen offenzulegen und technische Zugangsfragen zu klären. Auf der anderen Seite geht es um Top-Down-Ansätze durch den Staat (Bund oder Länder), der Anreize für Kooperationen zwischen Unternehmen für die Bildung von Clustern (bspw. über Förderprogramme) sowie strategische Leitplanken setzen kann (bspw. durch eine – noch zu entwickelnde – Carbon Management Strategie des Bundes)¹¹⁸. Grundsätzlich ist für die Planung und Entwicklung einer CO₂-Infrastruktur ein Zusammenspiel von Gasnetzbetreibern, Ländern (Ausführung/Genehmigung) und Bund (Regulatorik) sowie Eigentümern der Punktquellen erforderlich.

Die Beschleunigung von Planungs- und Genehmigungsverfahren ist ein wichtiger Hebel für einen zügigen Aufbau einer CO₂-Infrastruktur. Neben Verfahrensfragen geht es dabei auch um die Notwendigkeit, Regulierungsbehörden mit fachkundigem und entscheidungsbefugtem Personal

¹¹⁶ Technische Zugangsvoraussetzungen regeln Aspekte wie z. B. den erforderlichen Reinheitsgrad des in eine Pipeline einzuspeisenden CO₂ und die erlaubten Verunreinigungen. Nicht-technische Zugangsvoraussetzungen regeln z. B., welcher Anlagentyp für eine Einspeisung in eine Pipeline überhaupt zugelassen wird.

¹¹⁷ www.co2-netz.de

¹¹⁸ Vgl. die Carbon-Management-Strategie des Landes NRW: www.wirtschaft.nrw/carbon-management-strategie-nrw

auszustatten sowie materielle Zielkonflikte (bspw. zwischen Infrastrukturausbau und Belangen des Umweltschutzes) zu klären.

Eine Herausforderung für die Errichtung einer großmaßstäbigen CO₂-Infrastruktur ist die geringe gesellschaftliche Akzeptanz für (Pipeline-)Infrastrukturen (insbesondere auf der lokalen Ebene). Dies hat sich in der Vergangenheit bei diversen energiebezogenen Infrastrukturvorhaben auch im Zusammenhang mit CCS gezeigt. Gesellschaftlicher Diskurs und Beteiligungsprozesse sind daher notwendig, um ein Verständnis für Maßnahmen zu schaffen, Bedenken aufzunehmen und im Idealfall darüber auch lokale und regionale Akzeptanz entstehen zu lassen. Eine lokale Beteiligung ist nach §4 KSpG auch gesetzlich erforderlich. In Beteiligungs- und Dialogprozessen sollte eine klare Kommunikation der Ziele dieser Prozesse, von übergeordneten Maßgaben (z. B. Klimaneutralität, Notwendigkeit, CO₂ zu transportieren) und der Entscheidungsbefugnisse der beteiligten Akteure und Akteurinnen gewährleistet werden. Es kann davon ausgegangen werden, dass aufgrund des bestehenden Zeitdrucks bei der Erreichung von Klimazielen Planungs- und Beteiligungsprozesse auch parallel zueinander verlaufen müssen.

7 Quellenverzeichnis

- Agora Energiewende (Hrsg.). (2019). *Klimaneutrale Industrie (Hauptstudie) Schlüsseltechnologien und Politikoptionen für Stahl, Chemie und Zement*.
- CarbonCure. (2020). *CarbonCure's 500 Megatonne CO2 Reduction Technical Roadmap*.
<https://www.carboncure.com/>
- Cembureau. (2020). *Cementing the European Green Deal – Reaching climate neutrality along the cement and concrete value chain by 2050*. The European Cement Association.
- CSI / ECRA. (2017). *Development of State of the Art Techniques in Cement Manufacturing: Trying to Look Ahead*. (A-2016/2305; Technology Papers). Cement Sustainability Initiative, European Cement Research Academy. www.ecra-online.org
- Favier, A., de Wolf, C., Scrivener, K., & Habert, G. (2018). *A sustainable future for the european cement and concrete industry—Technology assessment for full decarbonisation of the industry by 2050*. ETH Zürich; EPFL.
- GCCA. (2021). *Concrete Future—The GCCA 2050 Cement and Concrete Industry Roadmap for Net Zero Concrete*. Global Cement and Concrete Association.
- Hills, T., Leeson, D., Florin, N., & Fennell, P. (2016). Carbon capture in the cement industry: Technologies, progress, and retrofitting. *Environmental science & technology*, 50(1), 368–377.
- IEA. (2021). *Energy Technology Perspectives 2020*. International Energy Agency.
<https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2020>
- IEA/CSI. (2018). *Technology Roadmap – Low-Carbon Transition in the Cement Industry*. International Energy Agency (IEA), Cement Sustainability Initiative (CSI).
- ieaghg. (2013). *Deployment of CCS in the cement industry* (Nr. 2013/19).
- Jäckel, H.-G., Hamann, D., Krampitz, T., & Lieberwirth, H. (2022). CF-bewehrter Beton—Idealer Baustoff und eine Recycling-Herausforderung. *recovery - Recycling Technology Worldwide*, 02/2022. www.recovery-worldwide.com/de/artikel/idealer-baustoff-und-eine-recycling-herausforderung_3743970.html
- Lechtenböhmer, S., Nanning, S., Hillebrand, B., & Buttermann, H.-G. (2006). *Einsatz von Sekundärbrennstoffen* (Texte 07/06). Umweltbundesamt.
- Material Economics. (2019). *Industrial Transformation 2050 – Pathways to Net-Zero Emissions from EU Heavy Industry*.
- Mineral Products Association, Cinar Ltd, & VDZ. (2019). *Options for switching UK cement production sites to near zero CO2 emission fuel: Technical and financial feasibility – Summary Report* [Feasibility Study for the Department for Business Energy and Industrial Strategy].
- Möhrle, M. G., & Isenmann, R. (2008). *Technologie-Roadmapping—Zukunftsstrategien für Technologieunternehmen* (3. Aufl.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-74755-0>
- National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. (2019). *Gaseous Carbon Waste Streams Utilization: Status and Research Needs*. The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/25232>
- Nolting, U., Dehn, F., Haist, M., & Link, J. (2018). *Betone der Zukunft – Herausforderungen und Chancen* [14. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung]. Karlsruher Institut für Technologie (KIT).
- Prognos, Öko-Institut, & Wuppertal Institut. (2021). *Klimaneutrales Deutschland 2045*. Studie im Auftrag von Stiftung Klimaneutralität, Agora Energiewende und Agora Verkehrswende.
- Project LEILAC. (2021). *LEILAC Technology Roadmap to 2050 – A cost-effective path to carbon neutral industrial production*. Web: www.project-leilac.eu

- Ruppert, J., Wagener, C., Palm, S., Scheuer, W., & Hoenig, V. (2020). *Prozesskettenorientierte Ermittlung der Material- und Energieeffizienzpotentiale in der Zementindustrie: Abschlussbericht* (Bericht im Auftrag des im Auftrag des Umweltbundesamtes (UFOPLAN FKZ 3716 36 320 0) 48 / 2020; UBA Texte). VDZ.
- Schneider, M. (2019). The cement industry on the way to a low-carbon future. *Cement and Concrete Research*, 124.
- Scrivener, K. L., John, V. M., & Gartner, E. M. (2018). Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry. *Cement and Concrete Research*, 114, 2–26.
- Snæbjörnsdóttir, S. Ó., Sigfússon, B., Marieni, C., Goldberg, D., Gislason, S. R., & Oelkers, E. H. (2020). Carbon dioxide storage through mineral carbonation. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1(2), 90–102.
- Snæbjörnsdóttir, S. Ó., Wiese, F., Fridriksson, T., Ármannsson, H., Einarsson, G. M., & Gislason, S. R. (2014). CO₂ storage potential of basaltic rocks in Iceland and the oceanic ridges. *Energy Procedia*, 63, 4585–4600.
- UBA. (2009). *CCS - Rahmenbedingungen des Umweltschutzes für eine sich entwickelnde Technik* (S. 22). www.umweltbundesamt.de/publikationen/ccs-rahmenbedingungen-des-umweltschutzes-fuer-eine
- UBA. (2022). *Treibhausgas-Emissionen in Deutschland*. Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/treibhausgas-emissionen-in-deutschland#emissionsentwicklung>
- VDZ. (2020a). *Dekarbonisierung von Zement und Beton—Minderungspfade und Handlungsstrategien. Eine CO₂-Roadmap für die deutsche Zementindustrie*. Verein Deutscher Zementwerke e.V.
- VDZ. (2020b). *Umweltdaten der deutschen Zementindustrie – 2019*. Verein Deutscher Zementwerke.
- VDZ. (2022). *Umweltdaten der deutschen Zementindustrie – 2021*. Verein Deutscher Zementwerke.
- Verein Deutscher Zementwerke e.V. (Hrsg.). (2002). *Zement Taschenbuch 2002* (50. Ausgabe). Bau+Technik.
- Voldsund, M., Gardarsdóttir, S. O., De Lena, E., Pérez-Calvo, J.-F., Jamali, A., Berstad, D., Fu, C., Romano, M., Roussanaly, S., Anantharaman, R., Hoppe, H., Sutter, D., Mazzotti, M., Gazzani, M., Cinti, G., & Jordal, K. (2019). Comparison of Technologies for CO₂ Capture from Cement Production—Part 1: Technical Evaluation. *Energies*, 12(3), 559. <https://doi.org/10.3390/en12030559>
- Zeschmar-Lahl, B., Schönberger, H., & Waltisber, J. (2020). *Abfallmitverbrennung in Zementwerken – Sachverständigengutachten* (TEXTE 202/2020). Umweltbundesamt.