

Klimaneutrale Zementregion

Erwitte / Geseke



Machbarkeitsanalyse
für die Dekarbonisierung
der heimischen Zementindustrie

Herausgeber

Klimaneutrale Zementregion Erwitte/Geseke

Stadt Erwitte
Am Markt 13
59597 Erwitte

T +49 (0)2943 896-314
wirtschaft@erwitte.de
www.erwitte.de

Autor

Dr. Dirk Brexel

Projektstelle Stadt Erwitte/Geseke

Lenkungskreis

Dr. Werner Cordes	Portlandzementwerk Wittekind Hugo Miebach Söhne KG
Dr. Steffen Gajewski	Heidelberg Materials AG
Dr. Marcel Kersting	Spenner GmbH & Co. KG
Markus Kürpick	Wirtschaftsförderung Kreis Soest GmbH
Dr. Iris Rieth-Menze	NRW.Energy4Climate
Dr. Johannes Ruppert	Verein Deutscher Zementwerke e.V.
Eva Waninger	Dyckerhoff GmbH
Julian Wolters	Thomas Zement GmbH u. Co. KG

Die vorliegende Studie wurde durch die Landesregierung Nordrhein-Westfalen aus dem Programm für rationelle Energieverwendung, regenerative Energien und Energiesparen - Programmbereich Innovation (progres.nrw - Innovation) gefördert.

Gefördert durch:

**Ministerium für Wirtschaft,
Industrie, Klimaschutz und Energie
des Landes Nordrhein-Westfalen**



Erwitte, im Januar 2024

Inhaltsverzeichnisverzeichnis

Zusammenfassung und Ergebnisse	4
1 Aufgabenstellung und Zielsetzung	5
2 Ausgangslage für eine klimaneutrale Zementregion	6
■ CO ₂ -Footprint der Zementregion Erwitte/Geseke	
■ Technologischer Pfad zur klimaneutralen Zementproduktion	
■ Geschäftsmodell einer klimaneutralen Zementproduktion	
■ Handlungsbedarf zum Aufbau einer klimaneutralen Zementregion	
3 Technische Optionen für die CO₂-Abscheidung	15
■ Anforderungen an die technische Lösungsfindung	
■ Eingrenzung des Lösungsraums für die CO ₂ -Abscheidung	
■ Oxyfuel als vollintegrierte Lösung	
■ Oxyfuel als teilintegrierte Lösung	
■ Zweites Verfahren für die CO ₂ -Abscheidung der Drehofenabgase	
■ Regionales Integrationskonzept auf Basis Oxyfuel-Technologie	
■ 360°-Klimabilanz für den Energieträger „Elektrizität“	
■ Aminwäsche mit Wärmerückgewinnung	
■ Regenerative und grundlastfähige Wärmequellen	
■ Regionales Integrationskonzept auf Basis der Aminwäsche	
■ 360°-Klimabilanz und Eingrenzung wärmebasierter Integrationsansatz	
4 Vollständige Systeme für den CO₂-Verbleib	31
■ Zielszenarien vollständiger CO ₂ -Systeme	
■ Carbon Capture & Storage (CCS)	
■ Carbon Capture & Utilization (CCU)	
■ Carbon Capture & Regional Utilization (CCR)	
■ Zusätzlicher Grünstrombedarf für CCS und CCU/CCR	
■ Bewertung und Eingrenzung des Zielszenarios CCR	
■ Bewertung und Eingrenzung des Zielszenarios CCU	
■ Bewertung des Zielszenarios CCS	
5 Hemmnisse und Akzeptanzanforderungen	42
■ Funktionsnachweis für nachrüstbare CO ₂ -Abscheidung	
■ Zugang zu klimaneutralem Strom bzw. Wasserstoff	
■ Zugang zu Prozesskette für Pipelinetransport und Speicherung von CO ₂	
■ Gesellschaftliche Akzeptanz für CCS in Deutschland	
■ Adaptierbarkeit des Geschäftsmodells auf CO ₂ -neutrale Zementproduktion	
6 Transformation zur klimaneutralen Zementregion	46
■ Inhaltliche Eingrenzung einer umfassenden Machbarkeitsanalyse	
■ Programm für eine umfassende Machbarkeitsanalyse	
Literaturverzeichnis	51
Abbildungsverzeichnis	53

Zusammenfassung und Ergebnisse

Die Zementindustrie prägt die Region Erwitte/Geseke seit mehr als 100 Jahren. Große Flächen der Stadtgebiete sind für den Kalksteinabbau vorgesehen, das Abbaumaterial besitzt eine außerordentlich gute Qualität und ist noch für Jahrzehnte zwischen Geseke und Erwitte verfügbar. Für die Zukunftsfähigkeit der Zementregion wird es darauf ankommen, die Zementherstellung klimaneutral auszurichten. Die Herausforderung besteht dabei vor allen Dingen darin, dass die Zementherstellung prozessbedingt mit hohen, am Ende unvermeidbaren Emissionen an CO₂ einhergeht, deren Minderung angesichts des Klimaschutzes aber unerlässlich ist und damit letztlich entscheidend für die langfristige Sicherung der Standorte.

Vor diesem Hintergrund und eingebettet in die Carbon Management Strategie des Landes Nordrhein-Westfalen hat das Projektkonsortium „Klimaneutrale Zementregion Erwitte/Geseke“ über einen Zeitraum von 15 Monaten untersucht, ob und wie die Zementproduktion vor Ort klimaneutral ausgerichtet werden kann. Die Zementregion hat einen fossilen CO₂-Ausstoß von jährlich rund 2,5 Mio. Tonnen, wovon 2/3 aus dem im Kalkstein gebundenen Kohlenstoff stammen und bei der Verarbeitung zu Zementklinker unvermeidbar freigesetzt werden. Der technologische Pfad zur Entwicklung einer CO₂-neutralen Zementproduktion führt daher notwendigerweise über eine energieintensive Abscheidung des CO₂ aus dem Abgas der Anlagen, um es anschließend zu speichern oder einer weiteren Nutzung zuzuführen. Maßgeblich für die Wirtschaftlichkeit der in der vorliegenden Studie untersuchten und eingegrenzten technischen Optionen ist dann auch die Energieeffizienz der zugrunde liegenden chemischen oder physikalischen CO₂-Abscheideverfahren. Um Klimaneutralität zu erreichen, ist zudem entscheidend, den Energieträger für die CO₂-Abscheidung selbst CO₂-frei in der erforderlichen Menge unter den regionalen Bedingungen bereitstellen zu können.

Für den Energieträger Elektrizität konnte im Rahmen dieser Studie ein skalierbarer, regionaler Integrationsansatz identifiziert werden, der mit physikalischen CO₂-Abscheideverfahren arbeitet. Eine größtmögliche elektrische Energieeffizienz wird erreicht, wenn der Klinkerbrennprozess künftig mit aus der Umgebungsluft separiertem Sauerstoff betrieben und dadurch der CO₂-Gehalt in den Ofenabgasen bereits weitgehend aufkonzentriert wird („Oxyfuel“). Dieses Konzept ist allerdings mit dem kompletten Neubau von Drehofenanlagen und einem hohen Investitionsvolumen verbunden. Relevant ist daher auch ein weiteres Verfahren, mit dem die Sauerstoffverbrennung auf die unvermeidbaren Prozessemissionen eingegrenzt und die Bestandsanlagen in der Zementregion nachgerüstet werden könnten („Partial Oxyfuel“). Die Untersuchung eines thermischen Energieansatzes in Kombination mit dem relevanten chemischen Abscheideverfahren („Aminwäsche“) führt zu dem Ergebnis, dass die zusätzliche CO₂-freie Prozesswärme nicht wirtschaftlich von außen bereitgestellt werden kann. Hintergrund sind insbesondere die fehlenden geologischen Voraussetzungen für eine Tiefen-Geothermie in der Region Erwitte/Geseke. Als möglicher Lösungsansatz wird eine über den aktuellen Stand der Technik hinausgehende Abwärmenutzung aus der bestehenden Zementklinkerproduktion aufgezeigt, mit der Hochtemperatur-Wärmepumpen zum Einsatz gebracht werden können.

Das führt letztlich zu der Erkenntnis, dass die Dekarbonisierung der Zementregion auf CO₂-freier Elektrizität basieren wird, die aufgrund des Dauerbetriebs bei der Zementproduktion überdies grundlastfähig sein muss. Der erhebliche zusätzliche Bedarf kann zum aktuellen Zeitpunkt auf eine Bandbreite zwischen 750 GWh und 1 TWh eingrenzt werden.

Die Verfügbarkeit von CO₂-freier Elektrizität hat sich im weiteren Verlauf der Untersuchung auch als limitierender Faktor für die mögliche Verwendung des abgeschiedenen CO₂ herausgestellt. Potenzielle Szenarien, in denen der Kohlenstoff im CO₂ chemisch nutzbar gemacht wird, führen zu einem außerordentlich großen Bedarf an grünem Wasserstoff. Die Einordnung dieses zusätzlichen CO₂-freien Energiebedarfs in den Gesamtkontext der Energiewende führt zu der Bewertung, dass die Nutzung von Wasserstoff für die CO₂-Umwandlung im Vergleich zu konkurrierenden Anwendungen zur Erreichung von Klimaneutralität noch auf absehbare Zeit ressourcenökonomisch nicht darstellbar ist.

Dieses wird sich erst dann ändern, wenn große Mengen grünen Wasserstoffs zu niedrigen Kosten importiert werden. Auch für den denkbaren Aufbau einer regionalen Wertschöpfung und die regionale Nutzung von kleineren CO₂-Teilmengen über eine Sektorenkopplung zur chemischen oder petrochemischen Industrie konnten für die Region Erwitte/Geseke keine Anknüpfungspunkte gefunden werden.

In der Folge bleibt die nachhaltige unterirdische Speicherung des CO₂ das einzig realistische Szenario für die Abwicklung eines kontinuierlichen CO₂-Massenstroms von 2,5 Mio. Tonnen im Jahr. Zudem stellt die Anbindung der Zementregion an eine Pipeline für den CO₂-Transport zu einer geeigneten Speicherstätte eine unabdingbare Voraussetzung dar.

Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse mit Blick auf die künftige Abscheidung und den Verbleib des CO₂ zeigt die vorliegende Machbarkeitsanalyse in einem ersten Schritt auf, welche Maßnahmen für die Transformation zu einer klimaneutralen Zementregion umzusetzen sind. Bereits heute ist deutlich, dass dieses mit absehbar hohen Investitionen und einem langen Realisierungszeitraum für den Umstieg auf eine CO₂-neutrale Anlagentechnologie verbunden ist. Auch führt die Umstellung zu einem zusätzlichen Energieaufwand und Transportbedarf für das abgeschiedene CO₂. Für die Umsetzung einer klimaneutralen Zementproduktion in der Region Erwitte/Geseke wird das Jahr 2045 als zeitlicher Horizont in den Blick genommen. Aufgrund der langen Vorlaufzeiten in allen Teilen der kompletten Prozesskette wird es jedoch de facto darauf ankommen, bereits bis zum Jahr 2030 die wesentlichen Voraussetzungen für die Transformation geschaffen zu haben.

Die ohnehin schon hohe Kapital-, Energie- und Massenstromintensität bei der Zementproduktion in der Region Erwitte/Geseke wird durch die Transformation zur Klimaneutralität noch einmal deutlich zulegen und auch die Herstellkosten pro Tonne Zement werden spürbar steigen. Letztlich wird die ökonomische Tragfähigkeit und zeitliche Umsetzbarkeit des Geschäftsmodells für eine klimaneutrale Zementproduktion aber maßgeblich von den technischen und rechtlichen Rahmenbedingungen abhängen. Hintergrund dafür ist zum einen der hohe Veränderungs- und Kostendruck durch die Reform des Europäischen Emissionshandels, der die EU-Klimaschutzziele umsetzt und die Transformation der Industrie hin zu Klimaneutralität bestimmt. Durch den dabei vorgesehenen schrittweisen Abbau von CO₂-Emissionszertifikaten und freien Zuteilungen für die Zementindustrie ergibt sich bereits sehr früh ein hoher Handlungsdruck. Zum anderen wird es darauf ankommen, Märkte für klimaneutrale Zemente zu schaffen und dafür Sorge zu tragen, dass klimaneutrale Zemente im Markt eine Chancengleichheit erhalten.

Deutlich wird auch, dass für die einzelnen Unternehmen erhebliche technische Risiken bestehen, da zum heutigen Zeitpunkt noch keine Lösungen mit nachgewiesener Machbarkeit im industriellen Maßstab verfügbar sind. Auch der Zugang zu den erforderlichen Infrastrukturen für klimaneutralen Strom bzw. Wasserstoff und für den Pipelinetransport und die Speicherung von CO₂ ist mit Blick auf deren zeitliche Verfügbarkeit, Bezahlbarkeit und gesellschaftliche Akzeptanz noch offen.

Um den Transformationspfad hin zu einer „Klimaneutralen Zementregion Erwitte/Geseke“ im Sinne der zeitlichen Umsetzbarkeit und ökonomischen Tragfähigkeit herauszuarbeiten, empfiehlt sich die Fortsetzung des Projektes in einer zweiten Phase. Die vorliegenden Machbarkeitsanalyse hat im Sinne eines Initiierungsprojektes ein 7-Punkte-Programm für eine nun anstehende, umfassende Machbarkeit abgeleitet, mit der die technischen und ökonomischen Anforderungen der bevorstehenden Transformation weiter konkretisiert werden kann. Dabei konzentriert sich der Umfang der weiteren regionalpartnerschaftlichen Kooperation auf den Aufbau der erforderlichen Infrastrukturen und den zum Gelingen der Transformation benötigten gesellschaftlichen Konsens.

1.

Aufgabenstellung und Zielsetzung

1. Aufgabenstellung und Zielsetzung

Die Carbon Management Strategie des Landes Nordrhein-Westfalen verfolgt das Ziel der Netto-Treibhausgasneutralität bis 2045. Hierzu ist eine grundlegende Transformation der Industrie erforderlich, von einer derzeit noch von fossilen Rohstoffen geprägten, hin zu einer klimaneutralen Produktions- und Wirtschaftsweise. Eingebettet in diese Carbon Management Strategie will das Projektkonsortium „Klimaneutrale Zementregion Erwitte/Geseke“ in Westfalen eine Modellregion für eine klimaneutrale Zementherstellung in Nordrhein-Westfalen und letztlich ganz Deutschland entwickeln. Im Einzugsbereich der beiden Städte produzieren fünf Zementwerke, die einen wichtigen Wirtschaftsfaktor für die Region darstellen, so dass einer erfolgreichen Transformation zu einer klimaneutralen Zementherstellung eine besondere Bedeutung zukommt.

Vor diesem Hintergrund wurde das auf 15 Monate angelegte Initiierungsprojekt „Klimaneutrale Zementregion Erwitte/Geseke“ begonnen. Das Projektkonsortium umfasst die folgenden Partner (Abbildung 1):

- Die beiden Kommunen Erwitte und Geseke
- Die fünf Zementhersteller mit Drehofenanlagen in Geseke und Erwitte
- Der Verein Deutscher Zementwerke als Dachverband der Zementindustrie
- Das Land NRW mit der Landesgesellschaft für Energie und Klimaschutz „Energy4Climate“
- Die Wirtschaftsförderungsgesellschaft des Kreises Soest



- Entwicklung eines ganzheitlichen Konzepts zur Dekarbonisierung der heimischen Zementindustrie
- Erstellung einer Machbarkeitsanalyse für die Transformation der Region
- Erarbeitung der technischen, ökonomischen, politischen und gesellschaftlichen Rahmenbedingungen
- Anknüpfung an die Carbon Management Strategie und Wasserstoff-Roadmap des Landes NRW

Ausgangspunkt für den anschließenden Prozess zur klimaneutralen Transformation

Abbildung 1: Konsortium und Ziele des Initiierungsprojektes

Gegenstand und Zielsetzung des Initiierungsprojektes ist die Entwicklung eines ganzheitlichen Konzepts zur Dekarbonisierung der heimischen Zementindustrie und eine Machbarkeitsanalyse für die Transformation der Region in diesen Zielzustand. Die Machbarkeit beinhaltet neben der technischen Umsetzbarkeit auch die ökonomische Sinnhaftigkeit und notwendige Veränderungen der politischen und gesellschaftlichen Rahmenbedingungen. Angestrebt wird darüber hinaus eine Einbettung der regionalen Transformation in die Carbon Management Strategie und in die Wasserstoff-Roadmap des Landes NRW [1,2].

Schlussendlich soll das Projekt zum initialen Ausgangspunkt für den anschließenden Prozess zur faktischen Umsetzung der klimaneutralen Transformation der Zementregion werden. Ein besonderes Augenmerk liegt daher auf der Fragestellung, inwieweit und in welchen Bereichen eine regionale Zusammenarbeit zu Synergien führt und damit zum Gelingen der Transformation beitragen kann. Neben der partnerschaftlichen Schaffung der notwendigen Rahmenbedingungen werden hierfür insbesondere die möglichen Skalen- und Verbundvorteile durch regionale Integrationslösungen und gemeinsam nutzbare Infrastrukturen entlang der künftigen Prozesskette in den Blick genommen.

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Arbeitsergebnisse des Initiierungsprojektes mit der folgenden inhaltlichen Struktur:

- Zunächst wird der heutige CO₂-Ausstoß und die technisch-ökonomische Ausgangslage für eine klimaneutrale Zementregion ermittelt sowie der sich daraus insgesamt ergebende Handlungsbedarf transparent gemacht (Kapitel 2).
- Auf dieser Basis werden die Anforderungen an die technische Lösungsfindung konkretisiert, die erkennbar zur Verfügung stehenden Optionen zur Zielerreichung eingegrenzt und zwei regionale Integrationsansätze entwickelt (Kapitel 3).
- Im Anschluss daran werden mögliche Szenarien für den künftigen Verbleib des CO₂ aus der Zementregion Erwitte / Geseke identifiziert und darauf basierende zukünftige Geschäftsmodelle hinsichtlich Ihrer Relevanz bewertet (Kapitel 4).
- Daraus werden dann die wesentlichen Hemmnisse und Akzeptanzanforderungen für die Transformation zur klimaneutralen Zementregion abgeleitet (Kapitel 5).
- Abschließend wird ein geeigneter Umfang für die künftige Kollaboration im regionalen Verbund herausgestellt und organisatorische Grundlagen für den weiteren regionalen Prozess skizziert (Kapitel 6).

2.

Ausgangslage für eine klimaneutrale Zementregion

2. Ausgangslage für eine klimaneutrale Zementregion

Die Zementindustrie prägt die Region Erwitte/Geseke seit mehr als 100 Jahren. Große Flächen der Stadtgebiete sind für den Kalksteinabbau vorgesehen und befinden sich als ehemalige Abbauf Flächen bzw. langfristiger Erwartungsflächen im Besitz der Zementindustrie. Das Abbaumaterial besitzt eine außerordentlich gute Qualität und ist noch für Jahrzehnte zwischen Geseke und Erwitte verfügbar. In Erwitte liegen drei Zementwerke der mittelständischen Familienunternehmen Spenner, Thomas Zement und Wittekind unmittelbar nebeneinander in einem Industriekomplex im Süden von Erwitte. Zwei weitere Drehofenanlagen der multinationalen Konzerne Dyckerhoff und Heidelberg Materials befinden sich im südlichen Stadtgebiet von Geseke (Abbildung 2).



Abbildung 2: Zementindustrie in der Region Erwitte/Geseke

CO₂-Footprint der Zementregion Erwitte/Geseke

Erwitte/Geseke ist nicht die einzige Region in Deutschland, in der Zement produziert wird, aber im Hinblick auf die Größenordnung eine besonders relevante. Der Liste der emissionshandelspflichtigen Anlagen der deutschen Emissionshandelsstelle (DEHSt) kann entnommen werden, dass die fünf Drehofenanlagen in der Region im Durchschnitt der Jahre 2019 bis 2021 insgesamt **2,5 Mio. t CO₂** fossilen Ursprungs pro Jahr emittiert haben [3]. Auf der Basis von anerkannten Durchschnittswerten für die deutsche Zementindustrie kann dieses Volumen wie folgt aufgeschlüsselt werden [4]:

- ca. 2/3 sind Prozessemissionen, d.h. sie entstehen bei der chemischen Umwandlung des im Kalkstein enthaltenen Kohlenstoffs zu Zementklinker
- ca. 1/3 stammen von den fossilen Brennstoffen, die zur Deckung des enormen thermischen Energiebedarfs bei der Zementklinkerproduktion eingesetzt werden müssen
- als fossile Brennstoffe kommen heute nicht mehr mehrheitlich Braun- oder Steinkohle zum Einsatz, sondern zu 69 % alternative Sekundärbrennstoffe wie Kunststoff, Textilien, Altöl oder Lösungsmittel; die Zementindustrie in Erwitte/Geseke spielt damit auch eine wichtige Rolle in der regionalen Entsorgungswirtschaft
- 30 % der Sekundärbrennstoffe sind nicht-fossilen, sondern biogenen Ursprungs (z.B. Klärschlamm); das führt zu einer Menge von 0,2 Mio. t, die der fossilen CO₂-Menge hinzugefügt werden müssen

Die Zementregion Erwitte/Geseke ist somit für ca. 2,7 Mio. t jährliche CO₂-Emissionen und damit für ca. 12,5% der deutschlandweit bei der Zementklinkerproduktion anfallenden CO₂-Emissionen verantwortlich.

Gemäß dem VET-Bericht der DEHSt für das Jahr 2022 betrug der spezifische Emissionsfaktor für Grauzementklinker 0,787 Tonnen Kohlendioxid je Tonne Zementklinker [5]. Aus dieser CO₂-Intensität errechnet sich eine jährliche Klinkerproduktion von ca. 3,4 Mio. Tonnen. Bei einem Klinker/Zement-Faktor der deutschen Zementindustrie von 0,70 im Jahr 2022 entstehen daraus ca. 4,9 Mio. t Zement (Abbildung 3).



Abbildung 3: Produktionskennzahlen und CO₂-Footprint der Zementregion Erwitte/Geseke

Technologischer Pfad zur klimaneutralen Zementproduktion

Zement aus fossilem Kalkstein ist weiterhin als Baustoff unverzichtbar, da es keine nicht-fossilen Alternativen dazu gibt. CO₂-Neutralität bei der Herstellung von Zement kann daher nicht primär über die Vermeidung von fossilem Kohlenstoff erreicht werden. Eine Elektrifizierung des Wärmebedarfs der Zementproduktion mit grünem Wasserstoff (wie z.B. zur Dekarbonisierung der Stahlindustrie angedacht) würde das aus dem Kalkstein stammende CO₂ – und damit den überwiegenden Anteil – schlichtweg nicht mindern. Die Dekarbonisierung der heimischen Zementindustrie kann daher nur über eine energieintensive Abscheidung und nachhaltige Verwendung bzw. Speicherung des beim Herstellungsprozess entstehenden CO₂ gelingen (Carbon Capture Utilization and Storage – CCUS).

Die CO₂-Roadmap der deutschen Zementindustrie sieht neben CCUS weitere CO₂-Minderungen durch konventionelle Maßnahmen entlang der Wertschöpfungskette vor [6]. Demnach wäre langfristig eine flankierende Reduzierung der künftig in der Zementregion Erwitte/Geseke abzuscheidenden CO₂-Mengen durch die weitere Verbesserung der thermischen Effizienz des Klinkerbrennprozesses und die Senkung der Klinkergehalte im Zement erreichbar. Darüber hinaus bieten optimierte Betonrezepturen sowie Bauteile mit reduziertem Betoneinsatz das Potenzial zur weiteren CO₂-Minderung entlang der Wertschöpfungskette. Letztlich hängt der Erfolg des Pfades zur

klimateutralen Zementproduktion in Deutschland aber vom flächendeckenden Einsatz von Carbon Capture-Technologien ab. Von den heute jährlich rund 20 Mio. Tonnen CO₂ verbleiben im klimateutralen Szenario bis 2050 trotz aller konventionellen Minderungsmaßnahmen noch > 10 Mio. Tonnen CO₂, die technisch ausschließlich durch CCUS-Technologien reduziert werden können (Abbildung 4). Damit würde der Technologie-Mix entlang der Wertschöpfungskette mit insgesamt 88% zur Erreichung von Klimateutralität beitragen. Die verbleibenden Emissionen werden reduziert durch einen moderaten Rückgang der Baunachfrage sowie den „bilanziellen“ Beiträgen der natürlichen Rekarbonatisierung von CO₂ im Beton und einen Beitrag „negativer“ Emissionen aus der CO₂-Abscheidung von biomassehaltigen Abfällen (BECCS), die netto zur Minderung von CO₂ in der Atmosphäre beitragen.

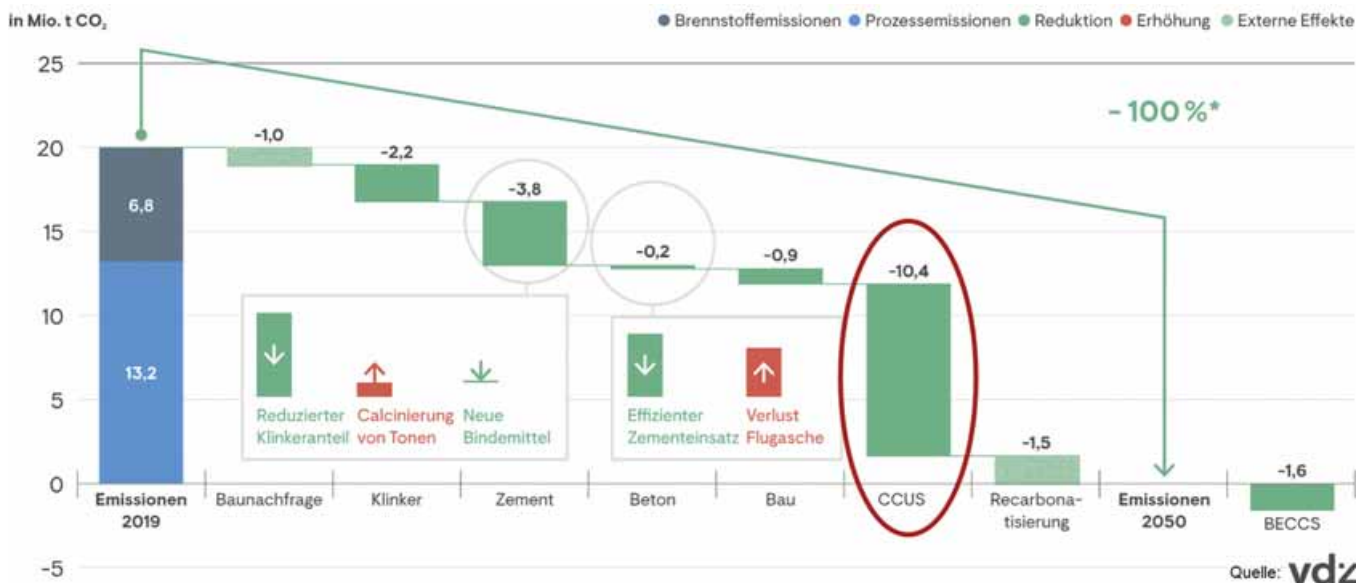


Abbildung 4: CO₂-Minderung der deutschen Zementindustrie im klimateutralen Szenario bis 2050

Eine vollständige Umstellung der Zementregion Erwitte/Geseke auf biogene Brennstoffe kommt nicht in Frage, da schlichtweg nicht genug primäre Biomasse aus einem regenerativen regionalen Kreislauf gewonnen werden kann. Um den thermischen Energiebedarf der Zementregion in Höhe von ca. 3,17 TWh zu decken, wären etwa 750.000 t Holz pro Jahr erforderlich (dieser Berechnung liegt ein thermischer Energiebedarf von 3.352 MJ/t Klinker und ein durchschnittlicher Brennwert von 4,2 kWh/kg Holz zugrunde). Die Folge wäre eine Abholzung von Wäldern in der Region oder eine überregionale Biomasse-Logistik, was kontraproduktiv für den Klimaschutz wäre. Eine Ausweitung des aktuellen Anteils von biogenen Sekundärbrennstoffen im Rahmen der reststofffreien Verwertung regionaler Abfallströme ist aber in Grenzen möglich und auch anzustreben.

Klimateutralität wird sich in der Modellregion für eine klimateurale Zementproduktion letztlich maßgeblich über CCUS definieren. Von daher wird sich diese Machbarkeitsanalyse thematisch auf CCUS konzentrieren. Für eine klimateurale Zementregion Erwitte/Geseke ist davon auszugehen, dass CO₂ fossilen Ursprungs in einer nicht signifikant nachlassenden Größenordnung von jährlich 2,5 Mio. t abgeschieden, verflüssigt und abtransportiert werden muss. Das entspräche einer Größenordnung von ca. 100.000 zusätzlichen LKW-Transporten pro Jahr (d.h. alle 5 Minuten ein LKW an 365 Tagen im Jahr) oder auch mehr als 40.000 Kesselwagen bei einem potenziellen Schienentransport, was die Dimensionen des zusätzlichen und kontinuierlichen Transportaufkommens anschaulich macht. Damit kann die Notwendigkeit zur Anbindung einer klimateutralen Zementregion an eine Pipeline bereits an dieser Stelle als alternativlos betrachtet werden.

Geschäftsmodell einer klimaneutralen Zementproduktion

Der Umstieg auf eine Anlagentechnologie mit CO₂-Abscheidung erfordert erhebliche Investitionen und führt absehbar zu einem dauerhaften zusätzlichen Energie- und Transportaufwand. Die ohnehin schon hohe Kapital-, Energie- und Massenstromintensität bei der Zementproduktion in der Region Erwitte/Geseke wird durch die Transformation zur Klimaneutralität noch einmal deutlich zulegen und auch die Herstellkosten pro Tonne Zement werden spürbar steigen. Es sind damit also sehr weitreichende unternehmerische Investitionsentscheidungen verbunden, für die es einen konkreten „Business Case“ geben muss. Es muss für die 5 Unternehmen der Zementregion trotz steigender Kosten wirtschaftlich darstellbar sein, künftig CO₂ zu vermeiden und klimaneutralen Zement zu produzieren.

Das Geschäftsmodell für eine klimaneutrale Zementproduktion wird maßgeblich von der absehbaren Entwicklung des CO₂-Emissionshandelssystems der Europäischen Union bestimmt. Am 19.12.22 einigten sich EU-Parlament und EU-Rat auf die Verschärfung der Klimaschutzziele „Fit for 55“. Damit soll im Jahr 2030 eine Minderung der CO₂-Emissionen um 55 % im Vergleich zu 1990 erreicht werden. Das Reformpaket beinhaltet zahlreiche Novellen bereits bestehender Richtlinien und Verordnungen sowie neue Regulierungen. Die Reform des EU ETS (European Union Emission Trading Scheme) wird das Geschäftsmodell der Zementindustrie und anderer energie- und CO₂-intensiver Branchen massiv verändern (Abbildung 5).

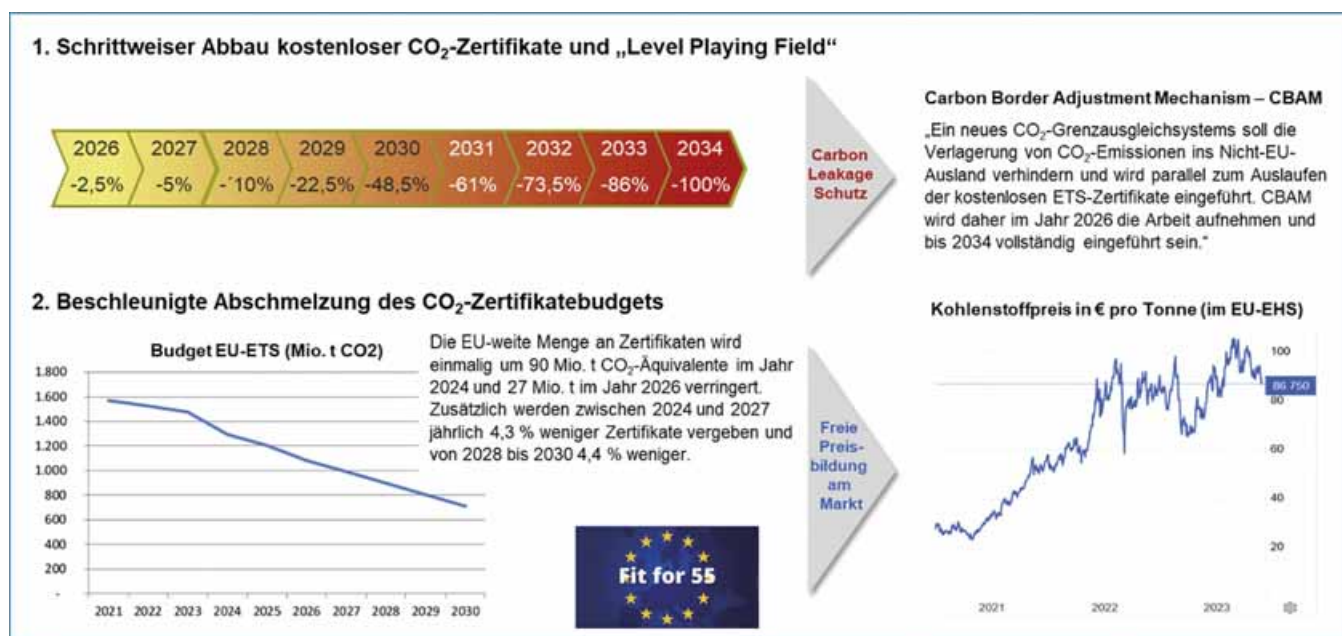


Abbildung 5: Verschärfung der Klimaschutzziele bis 2030 durch „Fit for 55“

Die kostenlosen ETS-Zertifikate für die Zementindustrie, die heute ca. 80 % ausmachen, werden von 2026 bis 2034 vollständig abgebaut. Bereits in 2030 sollen fast 50 % weniger freie CO₂-Zuteilungen vergeben werden. Bis 2030 soll auch die Summe der Emissionen über alle ETS-Sektoren mehr als halbiert werden. Um diese Verringerung zu erreichen und ein EU-weites „Level Playing Field“ zu schaffen, wird das EU-weite Zertifikatebudget einmalig um 90 Mio. t CO₂-Äquivalente im Jahr 2024 und 27 Mio. t im Jahr 2026 verringert. Zusätzlich werden zwischen 2024 und 2027 jährlich 4,3 % weniger Zertifikate vergeben und von 2028 bis 2030 4,4 % weniger. Ein neues CO₂-Grenzausgleichssystem (Carbon Border Adjustment Mechanism - CBAM) soll einen „Carbon Leakage Schutz“ gegen Importe von nicht klimaneutral-produzierten Zement in die EU sicherstellen. CBAM soll parallel zum Auslaufen der kostenlosen ETS-Zertifikate ab 2026 eingeführt und bis 2034 vollständig umgesetzt sein.

Die Reform des EU-ETS setzt einen politischen Rahmen, der in den kommenden Jahren noch weiter ausformuliert werden muss und wird. Das betrifft etwa die Neufestlegung der Benchmarks und

Zuteilungsmechanismen für die künftige Ermittlung der kostenlosen Zuteilungen oder auch der konkrete Mechanismus und die Wirksamkeit von CBAM. Insofern ist heute noch vieles unklar in Bezug auf die hier behandelte Aufgabenstellung. Besonders relevant sind in diesem Kontext insbesondere folgende beiden Aspekte:

- **Berücksichtigung CCUS bei der Emissionsbestimmung:** Eine ausdetaillierte Regelung für die Anerkennung von CCUS-Maßnahmen bei der Emissionsbestimmung ist für 2026 angekündigt. Von großer Bedeutung dabei ist die Frage, ob die Brennstoffemissionen, die als »schwer vermeidbare« CO₂-Emissionen im Zusammenhang mit der Zementherstellung gelten, eine gleichwertige Berücksichtigung im künftigen CO₂-Emissionshandel finden wie die unvermeidbaren Prozessemissionen. Ebenfalls noch nicht absehbar ist, inwieweit CCU-Anwendungen bei der künftigen Emissionsbestimmung gleichwertig zu CCS berücksichtigt werden, da dabei das CO₂ nicht dauerhaft gebunden wird und früher oder später wieder in die Atmosphäre gelangt.
- **Preisentwicklung bei CO₂-Zertifikaten:** Der Preis für CO₂-Zertifikate hat zu Beginn des Jahres 2023 bereits kurzzeitig die Schwelle von 100,- € je Tonne überschritten, was ab 2034 mit einer jährlichen Belastung von ca. 250 Mio. € für die Zementregion einhergehen würde. Die Preise für CO₂-Zertifikate spiegeln die Vermeidungskosten für CO₂ wider, insofern werden diese in dem Maße weiter steigen, wie der EU-Emissionshandel die CO₂-Zertifikate weiter verknappt und der Zementsektor teure Minderungsverfahren wie die CO₂-Abscheidung anwenden muss. Von Bedeutung ist in diesem Zusammenhang auch die angekündigte Überprüfung und Anpassung der Marktstabilitätsreserve (MSR), um deren Funktion zur Stabilisierung des Marktes bei rückläufiger Verfügbarkeit von CO₂-Zertifikaten zu stärken.

Bei aller noch bestehenden Unsicherheit ist die Reform des EU-ETS eine zwingende Voraussetzung dafür, dass es überhaupt zu einer europaweiten Umstellung auf klimaneutrale Zementproduktion kommen kann. Der Europäische Emissionshandel wird dadurch vollständig auf das Klimaschutzziel der EU ausgerichtet und auch zum wesentlichen Steuerungsinstrument für die Transformation der europäischen Zementindustrie hin zur Klimaneutralität.

Handlungsbedarf zum Aufbau einer klimaneutralen Zementregion

Die Verschärfung der Klimaschutzziele und gesetzlichen Rahmenbedingungen gemäß „Fit for 55“ ist bisher nicht mit der zeitlichen Perspektive für eine Umsetzung von CCUS in der deutschen Zementindustrie synchronisiert. Fest steht aber, dass bereits in sieben Jahren sowohl die freien CO₂-Zuteilungen als auch die zur Verfügung stehen CO₂-Zertifikate aus dem Emissionshandel halbiert sein werden. Es ist somit für die Unternehmen der Zementregion Erwitte/Geseke alternativlos, sich umgehend mit der Umstellung auf klimaneutrale Zementproduktion zu befassen und nicht darauf zu warten bis alle Rahmenbedingungen im Detail geklärt sind. Vor diesem Hintergrund sind die Unternehmen der Zementregion daher gut beraten, wenn sie den kommenden Umbruch nutzen, um ihre strategische Wettbewerbsfähigkeit zu hinterfragen und auszubauen. Dazu gehört insbesondere die Frage nach der eigenen „kritischen Masse“ und Kostenposition, aber auch die mögliche Realisierung von Skalen- und Synergieeffekten bei der Umsetzung von CCUS im regionalen Verbund.

Für die Umsetzung einer klimaneutralen Zementproduktion in der Region Erwitte/Geseke wird das Jahr 2045 als zeitlicher Horizont in den Blick genommen. De facto wird es jedoch darauf ankommen, bereits bis zum Jahr 2030 die wesentlichen Voraussetzungen für die Transformation geschaffen zu haben. Hintergrund sind die langen Vorlaufzeiten in allen Teilen der kompletten Prozesskette, insbesondere für die Abscheidung und weitere Verwendung bzw. Speicherung des CO₂ aus der Zementregion. Zudem werden ab 2035 keine freien Zuteilungen und ab 2040 kaum noch CO₂-Zertifikate aus dem Emissionshandel zur Verfügung stehen, so dass sich allein hieraus bereits sehr früh ein hoher Handlungsdruck ergibt.

3.

Technische Optionen für die CO₂-Abscheidung

3. Technische Optionen für die CO₂-Abscheidung

CCUS beginnt immer mit dem Prozess der CO₂-Abscheidung und beruht auf Technologien, die CO₂ aus den Ofenabgasen oder schon beim Zementherstellungsprozess herausfiltern können. Man unterscheidet daher zwischen „Post-Combustion“ Technologien mittels chemischer oder physikalischer Bindung des CO₂ und integrierten Verfahren, bei denen das CO₂ bereits während des Klinkerbrennprozesses aufkonzentriert wird [7]. Derzeit werden weltweit verschiedene Verfahren beider Kategorien im Pilot- und Demonstrationsmaßstab erprobt. Es gibt aber heute weder eine ausgereifte Technologie für die CO₂-Abscheidung beim Klinkerbrennprozess noch einen Funktionsnachweis im industriellen Maßstab. Den Unternehmen der Zementregion bietet sich somit noch keine Möglichkeit eine „standardisierte“ CO₂-neutrale Anlagentechnologie zu erwerben.

Anforderungen an die technische Lösungsfindung

Das Wissen über die verfügbaren CO₂-Abscheidungsverfahren und eine vergleichende Bewertung anhand von relevanten Kriterien wie Abscheiderate, technischer Reifegrad, CAPEX, OPEX und Energiebedarf für ein Referenzwerk ist in den „Technology Papers 2022“ der ECRA (European Cement Research Academy) dokumentiert [8]. Die Analyse der technischen Machbarkeit und Evaluierung von CO₂-Abscheidetechnologien stützt sich darauf ab, geht aber in weiten Teilen darüber hinaus (Abbildung 6).

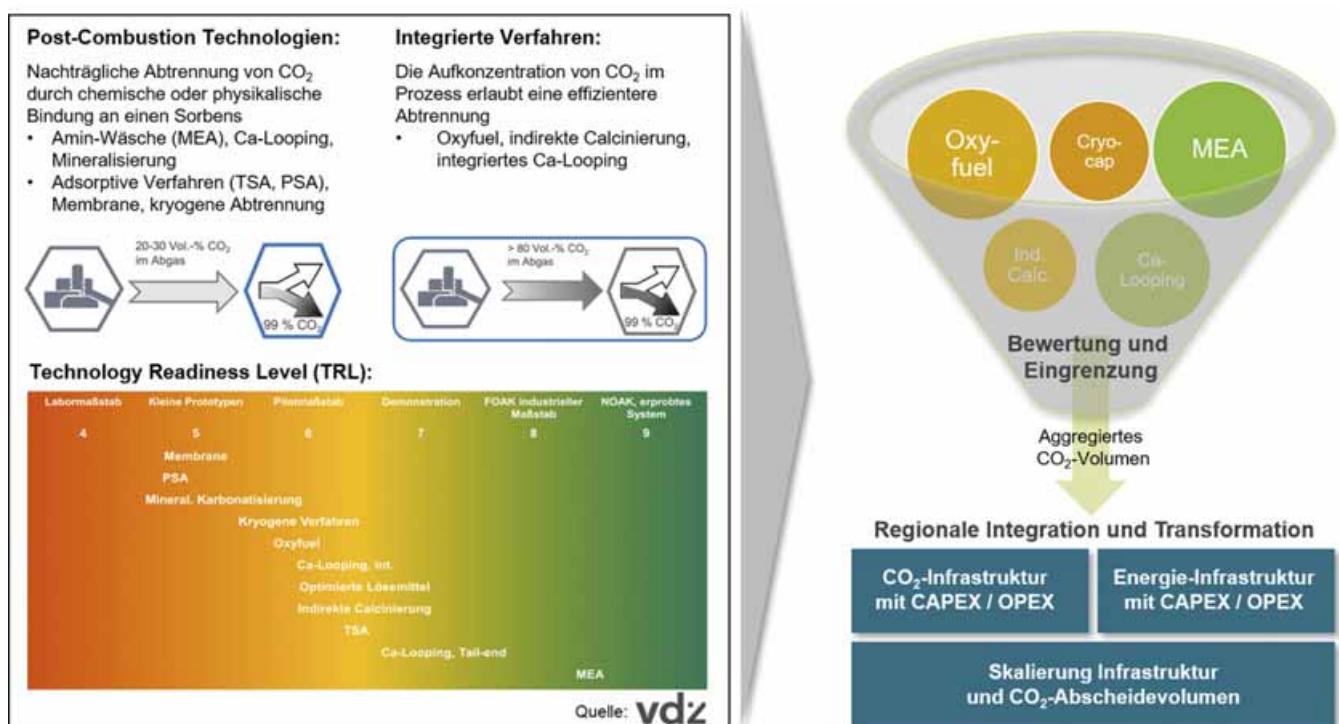


Abbildung 6: Evaluierung von CO₂-Abscheidetechnologien beim Klinkerbrennprozess

Zur Bewertung und Eingrenzung der Verfahren werden mit Blick auf eine regionale Integration und Transformation folgende drei Anforderungskriterien zusätzlich herangezogen:

- **CO₂-Infrastruktur:** Eine elementare Bedeutung hat die regionale Umsetzbarkeit der zur Verfügung stehenden CO₂-Abscheidetechnologien und die Wirtschaftlichkeit der Verfahren unter den vorhandenen Standortbedingungen. Diese wird maßgeblich durch die Möglichkeiten zum Aufbau integrierter Infrastrukturen für das aggregierte CO₂-Volumen der Region und zur Schaffung von Skalen- und Verbundvorteilen bestimmt.

Energie-Infrastruktur: Für die CO₂-Abscheidung und den Betrieb einer regionalen CO₂-Infrastruktur sind je nach Verfahren beträchtliche Mengen an zusätzlicher elektrischer bzw. thermischer Energie erforderlich. Dieser Bedarf muss selbstredend mittels regenerativer und möglichst regionaler Energiequellen gedeckt werden können. Es wäre kontraproduktiv für den Klimaschutz, wenn die für eine CO₂-Abscheidung zusätzlich erforderliche Energie durch die Verbrennung von Kohle oder Erdgas gewonnen werden müsste. Eine besondere Herausforderung dabei ist die hohe Grundlastbeanspruchung durch den Dauerbetrieb bei der Zementherstellung.

Skalierbarkeit: Die Berücksichtigung von unterschiedlichen Ausgangssituationen und Gegebenheiten erfordert die werkspezifische Konfigurierbarkeit einer regional integrierten CO₂- und Energieinfrastruktur. Das beinhaltet auch die Möglichkeit zur „sanften“ Migration in den Zielzustand und zum schrittweisen Hochfahren des aggregierten CO₂-Abscheidevolumens. Insbesondere die beteiligten Mittelständler, die nur einen Brennofen betreiben, benötigen einen möglichst risiko- und unterbrechungsfreien Umstieg auf eine CO₂-freie Anlagentechnik.

Im Ergebnis muß eine regionale Technologieauswahl für die CO₂-Abscheidung die klimaneutrale Erzeugung der dafür benötigten Energie als „limitierenden Gestaltungsfaktor“ integrativ einbeziehen und dabei auch die übergeordnete Energie- und Klimateffizienz im Gesamtkontext der Energiewende berücksichtigen. Darüber hinaus sind aus Sicht der Unternehmen der Investitionsschutz und die Beherrschbarkeit von technischen Risiken zentrale Aspekte der Lösungsfindung.

Eingrenzung des Lösungsraums für die CO₂-Abscheidung

Aufgrund der Vielzahl der zur Verfügung stehende Technologien ergibt sich ein breiter Lösungsraum, der viele alternative Lösungsansätze für ein regionales Integrations- und Transformationskonzept aufzeigt. Auf der einen Seite des Lösungsraums steht die Investition in eine neue Generation von Zementanlagentechnologie mit vollintegrierter CO₂-Abscheidung und auf der anderen Seite der Zubau von Anlagen für eine nachgeschaltete CO₂-Abscheidung mit der jeweils dafür erforderlichen „dekarbonisierten“ Energiegewinnung bzw. -aufbereitung. Dazwischen gibt es eine Reihe von teilintegrierten bzw. hybriden Lösungsansätzen, die auch miteinander kombiniert werden können.



Abbildung 7: Lösungsraum und Eingrenzung von CO₂-Abscheidetechnologien

Auf Basis der identifizierten Anforderungen an die technische Lösungsfindung und den zur Verfügung stehenden Erkenntnissen aus weltweiten Pilotprojekten wurde der Lösungsraum auf folgende (für eine regionale Integration und Transformation als relevant angesehene) Verfahren eingegrenzt (Abbildung 7):

- **Oxyfuel als vollintegrierte Lösung:** Bei „Pure Oxyfuel“ wird der Klinkerbrennprozess mit Sauerstoff statt Umgebungsluft durchgeführt, um dadurch eine hohe CO₂-Konzentration im Abgasstroms zu erhalten. Hinzu kommen Anlagen mit physikalischen (d.h. strombasierten) Verfahren für die Luftzerlegung und die weitergehende Aufkonzentration, Reinigung und Verflüssigung des CO₂-Abgasstroms. Der Projektpartner Heidelberg Materials hat zwischenzeitlich das Projekt „GeZero“ zum Neubau einer Oxyfuel-Drehofenanlage in Geseke bekanntgegeben.
- **Oxyfuel als teilintegrierte Lösung:** Der Neubau einer komplett neuen Drehofenanlage ist nicht für jedes Unternehmen darstellbar bzw. sinnvoll. Mit einem „Partial Oxyfuel“-Ansatz läßt sich die Sauerstoffverbrennung auf einen zugebauten Kalzinator mit einem separaten CO₂-Abgasstrom für die unvermeidbaren Prozessemissionen eingrenzen. Als Referenz diente hier insbesondere das CLEANER-Projekt in Italien [9]. Für die nachgelagerte CO₂-Abscheidung aus den Brennstoff-Emissionen des Drehofens musste dann ein dazu passendes zweites Verfahren gefunden werden.
- **Aminwäsche mit Wärmerückgewinnung:** Bei der Aminwäsche wird das CO₂ mit einem chemischen (d.h. wärmebasierten) Verfahren ausschließlich in „End-of-Pipe“-Anlagen abgeschieden. Es wird somit keine Veränderung am Klinkerbrennprozess erforderlich. Allerdings muß der hohe thermische Energiebedarf des Verfahrens zu einem großen Teil über eine „ausgeklügelte“ Wärmerückgewinnung aus der Zementherstellung gedeckt werden, wodurch die vorhandene Zementanlagentechnologie dann ebenfalls tangiert wird. Hierzu sind vor allem Erkenntnisse aus dem Norcem-Projekt in Brevik/Norwegen eingeflossen [10].

Oxyfuel als vollintegrierte Lösung

Eine neue Anlagengeneration mit „Pure Oxyfuel“-Technologie setzt den Benchmark hinsichtlich Energieeffizienz und Kosten für die CO₂-Abscheidung. Ein neugebautes Referenzwerk mit einer Kapazität von 6.000 t/d („Tagestonnen“) Zementklinker hat gegenüber einem konventionellen Werk mit gleicher Kapazität kalkulatorische Zusatzkosten für die CO₂-Abscheidung von ca. 40 € pro Tonne Klinker, die sich wie folgt aufschlüsseln:

- **ca. 45 % sind Kapitalkosten (CAPEX)** bei linearer Abschreibung über 20 Jahre. Diese bestehen zu einem Teil aus den Mehrkosten einer Oxyfuel-Drehofenanlage mit dafür ausgelegtem Wärmetauscher und Klinkerkühler („only capture related investment“). Der überwiegende Anteil resultiert aus den zusätzlichen Investitionen für eine stationäre ASU (Air Separation Unit) zur kontinuierlichen Sauerstoffproduktion und für eine CPU (Compression and Purification Unit) zur Aufbereitung und Verflüssigung des CO₂-Abgasstroms sowie den dafür zusätzlich erforderlichen Flächen, Leitungssystemen und Infrastrukturanbindungen (Wasser, Abwasser, Strom etc.).
- **ca. 55 % sind Betriebskosten (OPEX)**, die überwiegend für den Dauer-/Volumenbetrieb der ASU (ca. 0,33 t O₂/t cli) und der CPU (ca. 0,83 t CO₂/t cli) anfallen. Beide Einheiten haben zusammen einen Stromverbrauch von ca. 225 kWh/t cli, was einer Vervierfachung gegenüber der konventionellen Klinkerproduktion entspricht und zu einem Stromkostenanteil von > 40 % an den kalkulatorischen Zusatzkosten von rund 40 €/t cli führt.

Eine regionale Umsetzung von „Pure Oxyfuel“-Technologie zur Abscheidung von 2,5 Mio. t CO₂ wäre somit mit einem kontinuierlichen Input-Massenstrom von ca. 1 Mio. t Sauerstoff verbunden (siehe Abbildung 8). Sauerstoffproduktion und CO₂-Abscheidung führen zusammen zu einem zusätzlichen regionalen Grünstrombedarf von ca. 735 GWh. Das entspricht in etwa dem Jahresenergieertrag von 50 Windkraftanlagen mit 7 MW Nennleistung und einem Investitionsvolumen von ca. 300 Mio. €, was an dieser Stelle nur zur Veranschaulichung der Größenordnungen dienen soll.

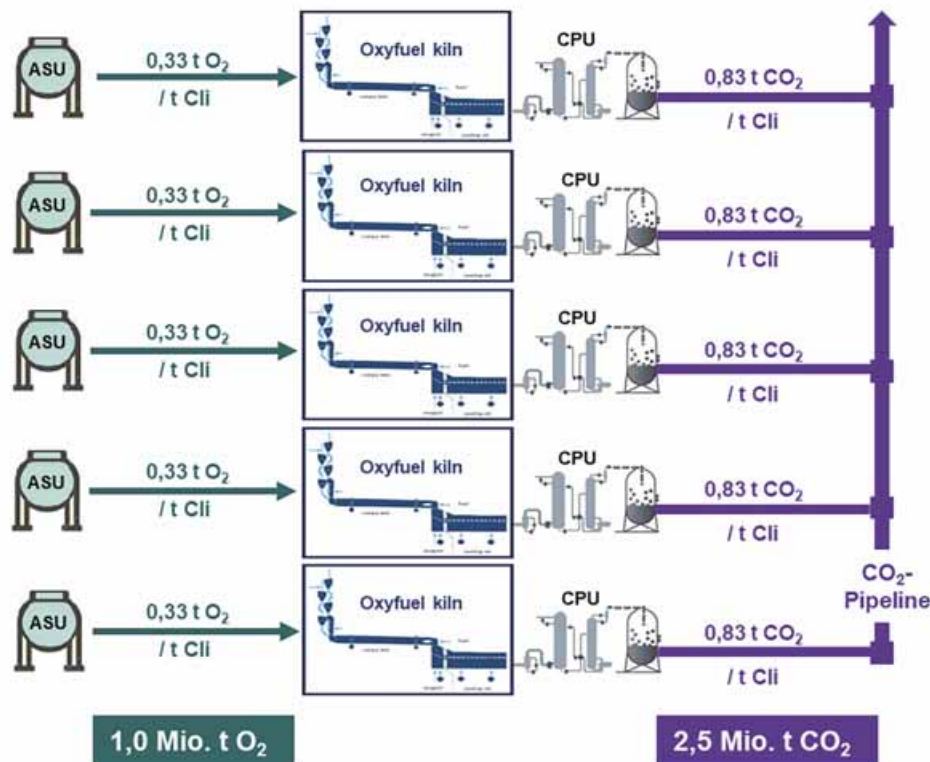


Abbildung 8: Regionale Massenströme bei Anwendung von Oxyfuel-Technologie

Eine Nachrüstung der 5 Drehofenanlagen incl. Wärmetauscher und Klinkerkühler mit „Pure Oxyfuel“-Technologie würde vom technischen Aufwand einem Neubau gleichkommen und wäre überdies mit einem entsprechend Migrationsrisiko verbunden. Die wirtschaftlich darstellbare Anwendung von „Pure Oxyfuel“-Technologie und Nutzbarmachung dessen Energie- und Kosteneffizienz für eine klimaneutrale Zementregion Erwitte/Geseke bedeutet daher den Neubau von Drehofenanlagen mit ASU/CPU und deren Hochfahren auf Dauerbetrieb parallel zu den vorhandenen Bestandsanlagen. Dabei wäre theoretisch auch eine Konzentration der regionalen Klinkerproduktion auf größere Einheiten ökonomisch sinnvoll. Die mengenmäßig abbildbare Substitution der fünf Bestandsanlagen durch zwei neue ECRA-Referenzwerke mit einer Kapazität von 6.000 t/d („dominant kiln size“) entspricht aber weder den in Deutschland vorzufindenden Größenordnungen noch den unternehmerischen Gegebenheiten in der Region Erwitte/Geseke.

Ein Neubau von fünf neuen Werken mit Abbildung der heutigen Kapazitätsverteilung würde die kalkulatorischen Zusatzkosten für die CO₂-Abscheidung wegen der Größendegression auf ca. 53 €/t cli erhöhen. Dieses Ergebnis unterliegt allerdings noch größeren Unsicherheiten in der gesamten Datenbasis und beinhaltet selbstredend noch keine Kosten für Transport und Speicherung. Insgesamt kann aber von einem enormen regionalen Investitionsvolumen von > 1,5 Milliarden € ausgegangen werden, welches überdies in Übereinstimmung mit den langfristigen Investitionszyklen für die Anlagentechnologie auf Unternehmensebene gebracht werden muß. Das wird voraussichtlich nicht für jedes der beteiligten Unternehmen wirtschaftlich darstellbar sein.

Oxyfuel als teilintegrierte Lösung

Um den kapitalintensiven Neubau eines Oxyfuel-Ofens zu vermeiden wird die Frage aufgeworfen, inwieweit eine Eingrenzung der Sauerstoffverbrennung auf die unvermeidbaren Prozessemissionen mittels eines teilintegrierten „Partial Oxyfuel“-Ansatzes technisch möglich und (dem Prinzip des abnehmenden Grenznutzens folgend) auch wirtschaftlich darstellbar ist. Dieses könnte durch die Nachrüstung von Bestandsanlagen mit einem Oxyfuel-Kalzinator erreicht werden, der in einem Temperaturbereich zwischen 920°C und 960°C den überwiegenden Anteil der aus dem Kalkstein stammenden CO₂ abscheidet und dafür einen separaten und CO₂-reichen Abgasstrom erzeugt (Abbildung 9).

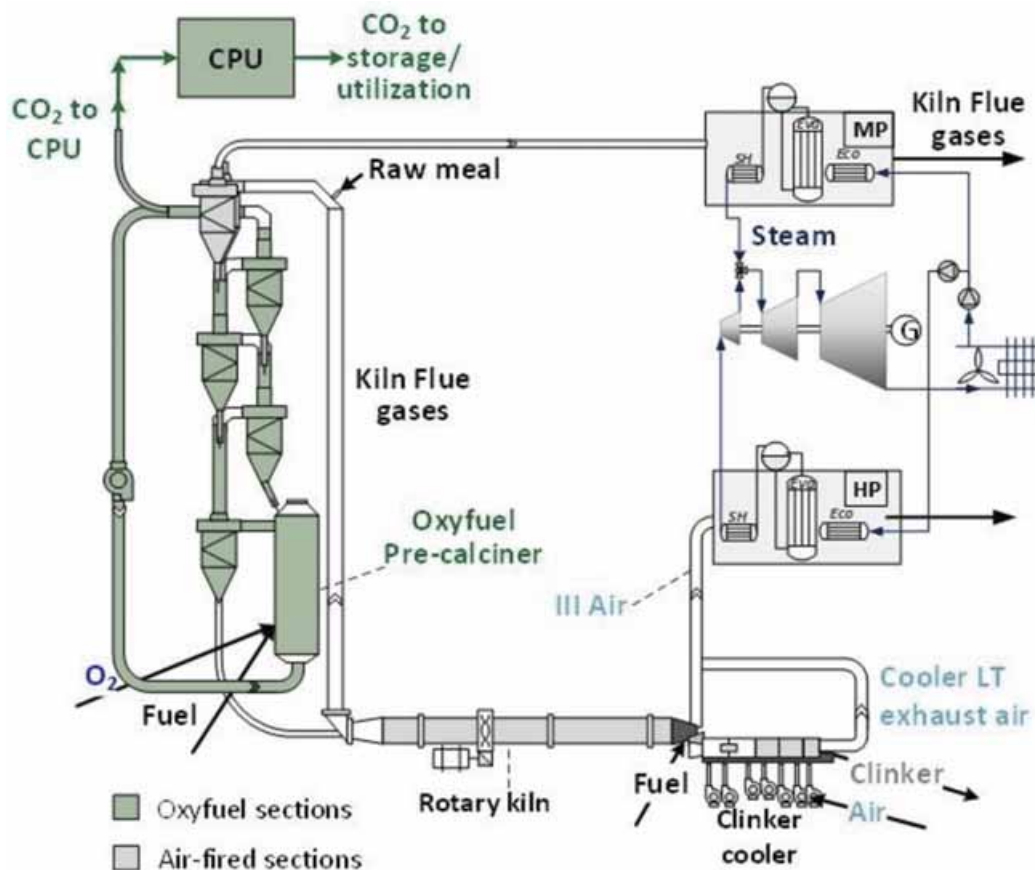


Abbildung 9: Oxyfuel-Kalzinator mit separatem und CO₂-reichem Abgasstrom [11]

Im Rahmen des CLEANKER-Projektes kommt eine Simulationsstudie für das Werk von Italcementi in Colleferro/Italien zu dem Ergebnis, dass die Nachrüstung von Bestandsanlagen mit einem Oxyfuel-Kalzinator und eine Aufteilung des Abgasstroms prinzipiell machbar ist [11]. Dazu wird lediglich der oberste Zyklon des Wärmetauscherturms weiterhin mit Ofenabgas beaufschlagt, um das Rohmehl vorzuwärmen und auch die Ofenabgase zu reinigen. Eine signifikante Modifikation der vorhandenen Anlage kann durch eine gezielte Steuerung der Prozessparameter vermieden werden. Dazu werden zwei wesentliche Betriebsparameter am Ausgang des Oxyfuel-Kalzinators (Temperatur von 920°C und O₂-Konzentration von 2,6 %) über die Zufuhr von Brennstoff und Sauerstoff so gesteuert, dass sich eine Kalzinierungsleistung von > 85 % einstellt. Zusätzlich wird eine Rezirkulationsleitung für das CO₂-reiche Gas vom Vorwärmerturm zurück zum Oxyfuel-Kalzinator gelegt. Damit wird die Gasgeschwindigkeit so gesteuert, wie sie im Ausgangszustand ist, um so den Neubau des Wärmetauschers zu vermeiden.

Kritischer Punkt des Ansatzes ist die Energie- und Klimabilanz. Die Hinzufügung eines Kalzinators führt wegen des zusätzlichen Brennstoffeintrags zu einer Erhöhung der Klinkerproduktivität um ca. 40 %, die in der Regel nicht benötigt wird. Das macht die Anpassung des Klinkerkühlers erforderlich,

da auch der Bedarf an K hlungsluft um 40 % zunimmt. Auch der integrierte Prozess der Wärmerückgewinnung wird teilweise aufgetrennt, wodurch sich der Primärenergiebedarf pro Tonne Klinker um 22,4 % erhöht. Eine weitere Herausforderung sind potenzielle „False air in-leakages“, die zu einer Verdünnung des CO₂-reichen Abgases des Oxyfuel-Kalzinators und damit zu einer Reduzierung der CO₂-Abscheiderate führen.

Auf der Basis von im Projektkonsortium verfügbarer Expertise konnten eine Reihe von technischen Ansätzen zur Optimierung der Energieeffizienz von „Partial Oxyfuel“ und zur Lösung weiterer kritischer Punkte dieses Lösungsansatzes identifiziert werden. Im Ergebnis erscheint die Nachrüstung von Bestandsanlagen mit einer teilintegrierten „Partial Oxyfuel“-Lösung prinzipiell machbar. Abstriche bei der Energieeffizienz mit zusätzlichem Brennstoffeinsatz von 10-15 % nach erfolgter Optimierung (und damit ca. 5 % zusätzliches CO₂) sind aber zu erwarten.

Auch der Umbau von Bestandsanlagen, die bereits über einen konventionellen Kalzinator verfügen, ist nach der „Colleferro-Philosophie“ prinzipiell denkbar, hier aber nicht genauer betrachtet worden. Es dürfte dabei weniger Probleme im Hinblick auf die Energiebilanz geben. Kritisch ist aber, ob die vorhandene Dimensionierung des Kalzinators zum Sauerstoff-Brennprozess passt und dabei der Materialdurchsatz insgesamt gewährleistet werden kann. Als Option für eine sanfte Migration von Bestandsanlagen mit Kalzinator bietet sich der Zubau eines zusätzlichen „Separate Oxy Calciners“ an (Abbildung 10).

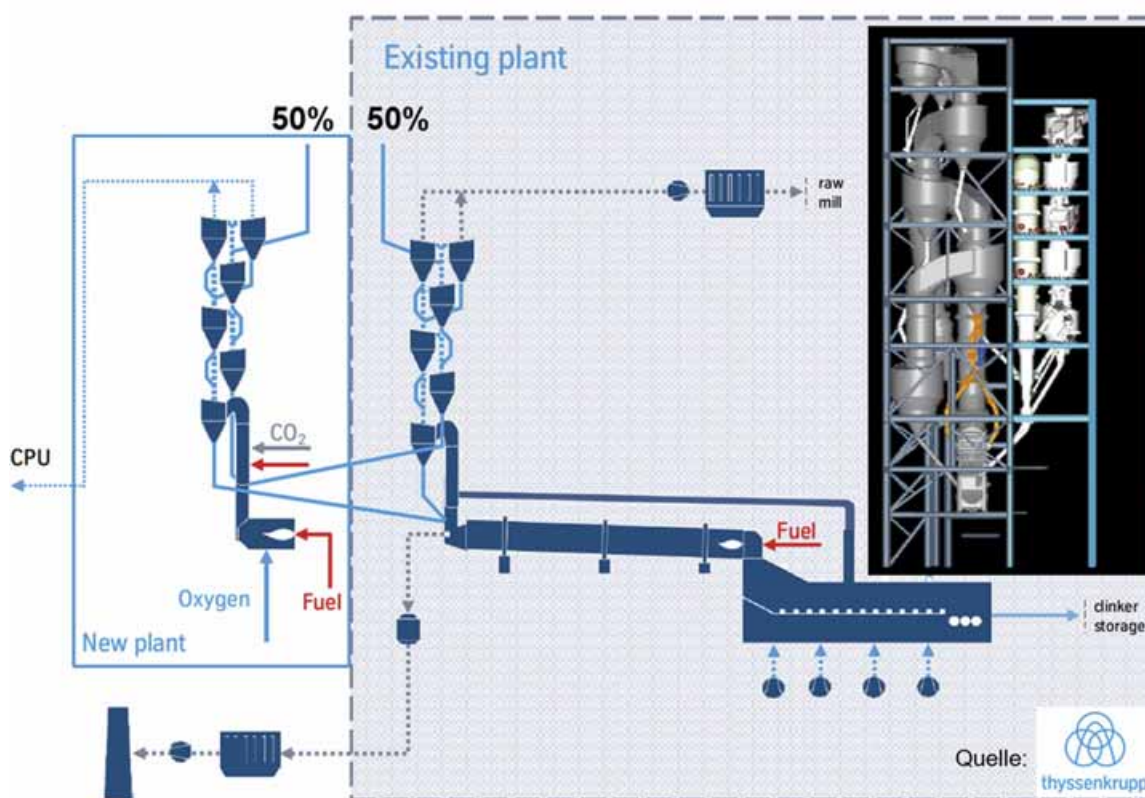


Abbildung 10: Simulation zur Nachrüstung eines zusätzlichen Oxyfuel-Kalzinators

Bei diesem Lösungsansatz eines namhaften Zementanlagenbauers mit Sitz in NRW wird eine Hochskalierung der CO₂-Abscheidung im zugebauten „Separate Oxy Calciner“ durch ein schrittweises Herunterfahren der Kalzinatorleistung der Bestandsanlage ermöglicht. Im Zielzustand „Null“ ergibt sich unter Berücksichtigung von Rohmaterialtrocknung und Begrenzung der Abgastemperaturen etwa eine 50:50-Aufteilung der Rohmehlzuf hrung auf den neuen und alten Vorwärmer. Eine interne Simulationsstudie kommt zum Ergebnis, dass der thermische Energiebedarf lediglich um < 10 %

ansteigt. Darüber hinaus ermöglicht die resultierende Brennstoffzuführung von ca. 65 % auf den „Separate Oxy Calciner“ die Abscheidung von ca. 75 % der CO₂-Emissionen bezogen auf die Altanlage. Insgesamt zeigt sich für die Zementregion Erwitte/Geseke eine heterogene Ausgangssituation in Bezug auf die Anlagentechnologie der Unternehmen, wodurch die zu lösenden kritischen Punkte, möglichen Optimierungspotenziale und resultierenden Investitionskosten für jede Bestandsanlage anders aussehen. Die technischen Realisierungskonzepte für Retrofitlösungen auf Basis „Partial Oxyfuel“ müssten daher jeweils unternehmensindividuell entwickelt werden.

Zweites Verfahren für die CO₂-Abscheidung der Drehofenabgase

Ein integriertes Calcium Looping ist das naheliegende zusätzliche Verfahren für die CO₂-Abscheidung aus den verbleibenden Abgasen der „Air-fired sections“ (Abbildung 11). Dabei wird das Rohmehl in einem geschlossenen Kreislauf als Sorbent genutzt. Während die Karbonatisierung von Calciumoxid (CaO) zu Calciumcarbonat (CaCO₃) bei ca. 650° C abläuft, erfolgt die Kalzinierung des CaCO₃ bei 920-950° C, wodurch das CaO wieder verfügbar gemacht und ein nahezu reiner CO₂-Abgasstrom erzeugt wird. Eine Erweiterung der identifizierten Partial Oxyfuel-Retrofitansätze um einen Karbonator ist technisch prinzipiell möglich und passt gut zum vorhandenen Knowhow-Profil der Zementwerke.

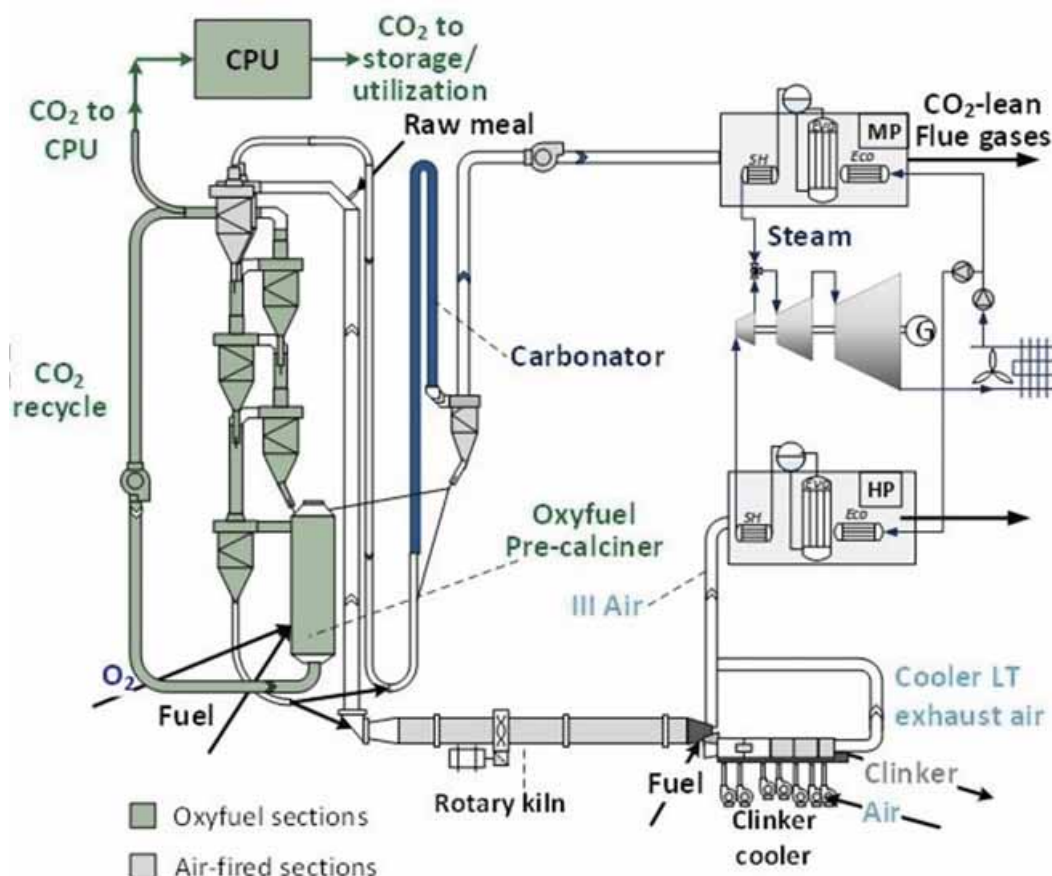


Abbildung 11: Ergänzung von Partial Oxyfuel mit Calcium Looping [11]

Allerdings nehmen beim Calcium Looping das technische Risiko und die Komplexität des Betriebs im Vergleich zu Partial Oxyfuel deutlich zu. Erfahrungen aus dem CLEANER-Projekt mit der Calcium Looping-Demonstrationsanlage bei Buzzi Unicem in Vernasca/Italien zeigen ein etwa doppeltes Materialvolumen im System. Hintergrund ist, dass nur 10-20 % des CaO auch CO₂ aufnehmen und dadurch große Mengen inaktiven Materials „im Kreis gefahren“ werden müssen. Darüber hinaus wird

der integrierte Prozess der Wärmerückgewinnung im Vergleich zu Partial Oxyfuel noch weiter aufgetrennt, wodurch der Primärenergiebedarf pro Tonne Klinker um 60-70 % steigt [12]. Im Ergebnis führt das zu mehr als 20 % zusätzlichem CO₂-Volumen, welches abtransportiert und einer nachhaltigen Speicherung bzw. Verwendung zugeführt werden müsste. Calcium Looping scheidet daher als Verfahren für eine regionale Lösungsfindung aus.

Stattdessen wird ein Verfahren gesucht, welches passend zum Oxyfuel-Prozess elektrifizierbar ist und dessen angereicherter CO₂-Abgasstrom in eine gemeinsame CPU hineinlaufen kann. Das kann nur mit zwei physikalischen CO₂-Separationsverfahren gelingen, die mit komplementären „Betriebspunkten“ im Hinblick auf den CO₂-Anteil im Abgas arbeiten (Abbildung 12):

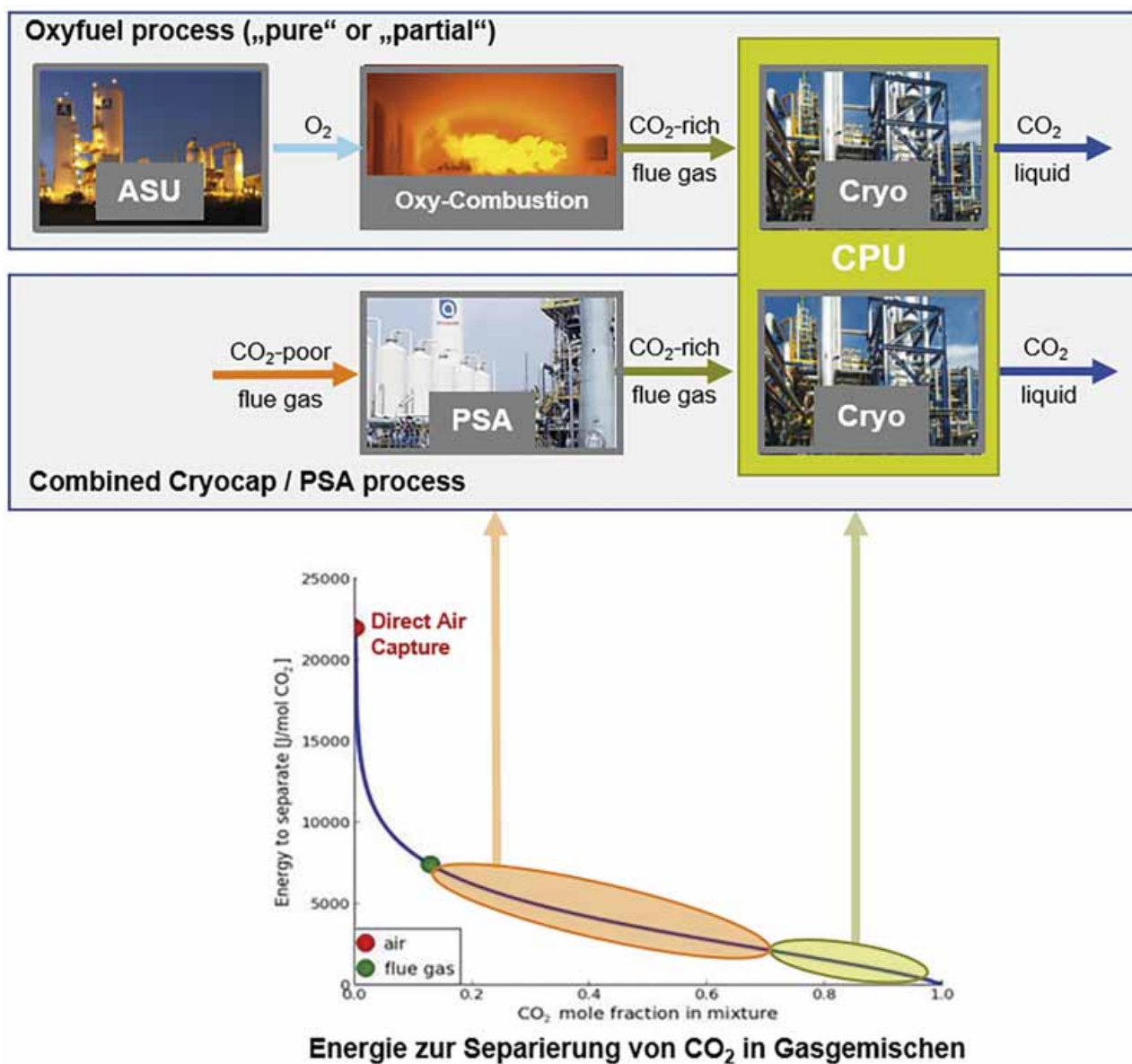


Abbildung 12: Komplementäre physikalische CO₂-Separationsverfahren PSA und Cryocap

- **Kryogene Abtrennung (Cryocap)** beinhaltet das Kühlen des Abgasstroms auf sehr niedrige Temperaturen, um das CO₂ unter Druck zu verflüssigen und dabei zu separieren. Dafür wird verfahrensbedingt eine hohe CO₂-Vorkonzentration und Reinheit des Abgasstroms insbesondere hinsichtlich Staub und auch Feuchte (würde gefrieren) benötigt. Cryocap ist mit seiner Kombination aus CO₂-Verflüssigung und -Aufkonzentration sowie der nötigen

Aufreinigung, die auch für den Pipelinetransport erforderlich ist, ein naheliegendes und aktuell präferiertes Verfahren des Anlagenbaus für die technische Realisierung einer CPU für Oxyfuel-Anwendungen.

■ **Pressure Swing Adsorption (PSA)** beinhaltet den Druckwechsel des Abgasstroms zur Anreicherung von CO₂ an der Oberfläche eines Festkörpers-Adsorbens mit anschließender Desorbierung. Die CO₂-Aufkonzentration erfolgt dabei stufenweise über eine Reihe von großbauenden Reaktoren. Das Verfahren ist aktuell noch in Erprobung (TRL=6). Staub und sonstige Verunreinigungen im Abgasstrom sind auch hier die kritischen Faktoren für eine Anwendung in der Zementindustrie.

Der kombinierte PSA/Cryocap-Prozess weist allerdings mit ca. 450 kWh/t CO₂ einen nahezu doppelten Stromverbrauch und damit eine deutlich schlechtere Energiebilanz im Vergleich zum Oxyfuel/Cryocap-Prozess auf. Es lohnt sich also bei Bestandsanlagen vom Grundsatz her in ein werksseitiges „Partial Oxyfuel“ als deutlich energieeffizienteres Verfahren zu investieren und eine PSA nur als zusätzliches Verfahren für die Aufkonzentration der verbleibenden ca. 25 % CO₂ vom Drehofen einzusetzen.

Allerdings ist diese pauschale Erkenntnis anlagen- bzw. unternehmensspezifisch insbesondere dann zu hinterfragen, wenn ein Retrofit von „Partial Oxyfuel“ z.B. wegen Platzmangel besonders schwierig und teuer wird oder dabei ein höherer Anstieg des Primärenergiebedarfs nicht vermieden werden kann. Bei kleinen Anlagen mit hohen CAPEX-Umlagen pro t CO₂ könnte alternativ dazu auch eine Investition in eine eigene Grünstromproduktion in Erwägung gezogen werden, um dem OPEX-Nachteil der PSA entgegenzuwirken. Derartige „Break-Even“-Betrachtungen müssten ebenfalls unternehmensindividuell für die regionalen Bestandsanlagen durchgeführt werden.

Regionales Integrationskonzept auf Basis Oxyfuel-Technologie

Für eine klimaneutrale Zementregion stellt sich grundsätzlich die Frage, wie Skalen- und Verbundvorteile durch eine integrierte regionale CO₂-Infrastruktur erzielt werden können und dabei unternehmensindividuelle Wege möglich bleiben. Durch die Kombination von Oxyfuel-Technologie mit den physikalischen Abscheideverfahren Cryocap und PSA wird ein derart skalierbares Lösungskonzept auf Basis eines umfassenden Energieträgers „Elektrizität“ grundsätzlich möglich. Auf Werksebene stehen variable Konfigurationen zur Auswahl. Diese reichen vom Neubau einer „Pure Oxyfuel“-Drehofenanlage über den Zubau eines „Partial Oxyfuel“-Kalzinators bis hin zum Verzicht auf jegliche Form der integrierten CO₂-Aufkonzentration im Abgasstrom. Die heterogenen Werkskonfigurationen können dennoch an eine gemeinsam nutzbare O₂- und CO₂-Infrastruktur aus ASU, PSA, Cryo-CPU angeschlossen werden, von der aus das verflüssigte CO₂ in einen regionalen Hub für die Pipelineanbindung mündet (Abbildung 13).

Im Gesamtkontext der Energiewende stellen sich allerdings Fragen mit Blick auf die übergeordnete Ressourceneffizienz und Grenzen von Klimaneutralität einer strombasierten CO₂-Abscheidung. Eine Projektion aus der Modellregion Erwitte/Geseke auf die gesamte deutsche Zementindustrie zeigt einen massiven zusätzlichen und insbesondere „grundlastfähigen“ Grünstrombedarf von bis zu 7 TWh auf, den es heute so nicht gibt. In der Folge würde es zu Opportunitätskosten im Gesamtkontext der Energiewende und Grenzen von Klimaneutralität durch die hohe zusätzliche Beanspruchung der Grundlast kommen, für die auf absehbare Zeit kein klimaneutraler Energieträger in relevantem Umfang verfügbar ist. Dem abnehmenden Grenznutzen der CO₂-Abscheidung in Bezug auf die Klimabilanz könnte theoretisch durch eine Optimierung der Reichweite begegnet werden. Allerdings ist eine variable CO₂-Abscheidung mit ausreichender Verfügbarkeit von Grünstrom bei integrierten Verfahren wie Oxyfuel nicht umsetzbar.

Aminwäsche mit Wärmerückgewinnung

Der überwiegende Anteil des Primärenergiebedarfs der Zementproduktion besteht nicht aus Elektrizität, sondern wird in Form von Wärme zugeführt. Vor dem Hintergrund einer möglichen Wärmerückgewinnung aus dem Klinkerbrennprozess wird in dieser Machbarkeitsanalyse daher gezielt nach einem alternativen regionalen Integrationsansatz auf Basis des Energieträgers Wärme gesucht. Als einziges wärmebasiertes Verfahren mit ausreichend hohem technischen Reifegrad wird die Aminwäsche identifiziert. Sie wird bereits im Kraftwerksbereich im industriellen Maßstab angewendet (TRL=8-9), befindet sich aber im Bereich der Zementklinkerproduktion mit seinen spezifischen Bedingungen noch in der Erprobung. Die Funktionsweise fokussiert die CO₂-Abscheidung am Ende des Prozesses, wodurch vom Grundsatz her eine Konzentration des regionalen CO₂-Volumens von 2,5 Mio. t auf eine Abscheideanlage möglich wird (Abbildung 14).

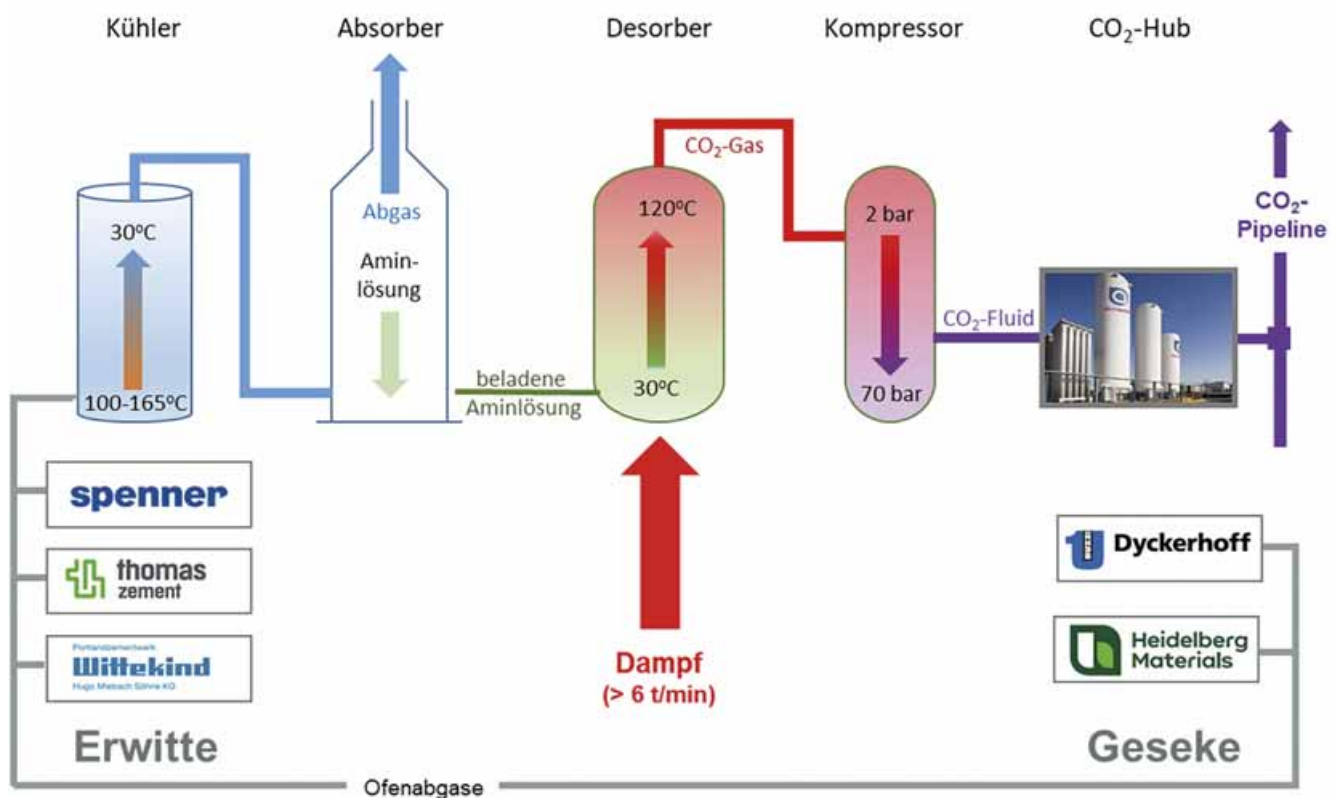


Abbildung 14: Regionale CO₂-Abscheidung durch Aminwäsche

Das Abgas wird dabei zunächst in einen Kühler geleitet und auf ca. 30 Grad heruntergekühlt. Während Stickstoff freigesetzt wird, reagiert und bindet sich das CO₂ mit einer Aminflüssigkeit (leicht alkalisch wässrige Lösung von Aminen) im Absorber. Das resultierende angereicherte Amin wird im Desorber mit großen Mengen Dampf erhitzt, so dass sich die Lösung wieder in CO₂ und flüssiges Amin aufteilt. Das verbleibende CO₂ ist mit 99 % fast vollständig rein. Es kann dadurch (anders als bei Oxyfuel) direkt zu einem Kompressor weitergeleitet und verflüssigt werden.

Für die Abscheidung des aggregierten CO₂-Volumens der Region mittels Aminwäsche wird jedoch die enorme Menge von ca. 6 Tonnen Dampf pro Minute benötigt. Der Energiebedarf des Desorbers liegt mit ca. 2,6 TWh für 2,5 Mio.t CO₂ in ähnlicher Größenordnung wie der thermische Energiebedarf des Klinkerbrennprozesses (ca. 3,17 TWh). Eine Dampferzeugung auf Basis dessen Brennstoff-Mix würde zu zusätzlichen CO₂-Brennstoffmissionen wie für die Zementklinkerproduktion selbst führen und wird daher hier nicht weiter ausgeführt. Eine an den definierten Anforderungskriterien ausgerichtete Lösungsfindung auf Basis der Aminwäsche muss vielmehr die klimaneutrale und zugleich wirtschaftlich darstellbare Gewinnung von Wärme in den Mittelpunkt stellen.

Die Lösung der Energiefrage bei der Aminwäsche muß auf der Rückgewinnung von Abwärme aus dem Klinkerbrennprozess aufsetzen. Als Referenzprojekt zum Stand der Technik hierzu dient das CCS-Pilotprojekt bei Norcem in Brevik/Norwegen, bei dem ebenfalls die Aminwäsche als CO₂-Abscheidungsverfahren zur Anwendung kommt [10]. Mit einem ausoptimierten System können demnach ca. 50 % des Wärmebedarfs der Aminwäsche durch eine integrierte Wärmerückgewinnung unter Ausschluß jeglicher Alternativen zur Abwärmenutzung generiert werden. Der Modellcharakter gilt allerdings nur für Standorte mit geringer Rohmaterialfeuchte, was für die Zementregion Geseke / Erwitte aber in besonderem Maße zutrifft.

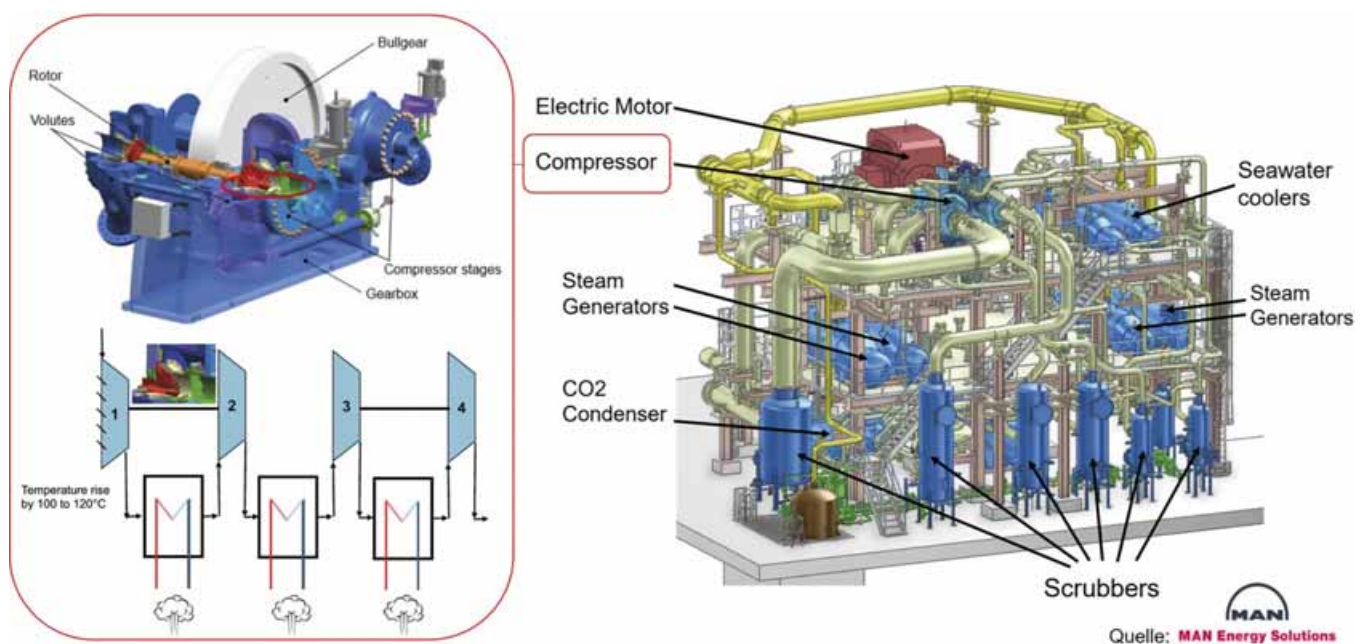


Abbildung 15: Integrierte Anlage zur CO₂-Verflüssigung und Dampfrückgewinnung [13]

Von der zurückgewonnenen Wärme stammen ca. 2/3 aus dem Klinkerbrennprozess und ca. 1/3 aus dem „End-of-Pipe“-Prozess der CO₂-Abscheidung und -Verflüssigung. Die Aufbereitung erfolgt in einer Integrierten Anlage zur CO₂-Verflüssigung und Dampfrückgewinnung, die von einem namhaften Energietechnik-Hersteller mit Co-Sitz in NRW entwickelt worden ist [13]. Zentrales Lösungselement der Anlage ist ein Integralgetriebe-Kompressor für eine stufenweise Verdichtung des CO₂ auf ca. 0,27 % Volumenprozent im flüssigen Zustand, wobei der Temperaturanstieg bei jeder Getriebestufe für die Dampferzeugung genutzt wird (Abbildung 15).

Regenerative und grundlastfähige Wärmequellen

Eine wärmebasierte CO₂-Abscheidung mit der Aminwäsche würde beim Stand der Technik der Abwärmenutzung aus dem Klinkerbrennprozess inklusive CO₂-Kompression einen zusätzlichen thermischen Energiebedarf von ca. 1,3 TWh mit sich bringen. Für diesen zusätzlichen Bedarf muß eine grundlastfähige regenerative Wärmequelle in der Region Erwitte/Geseke gefunden werden. Die Analyse der Machbarkeit führt zu folgendem Ergebnis:

- **Biomasse:** Hier gilt die gleiche Erkenntnis wie für die Umstellung des Klinkerbrennprozesses auf Biomasse, d.h. der thermische Energiebedarf übersteigt deutlich die kritische Größenordnung für eine Biomasse-Versorgung aus einem regenerativen regionalen Kreislauf.
- **Grünstrom bzw. Wasserstoff:** Eine Elektrifizierung des offenen Wärmebedarfs ist wirtschaftlich nicht darstellbar. Für die Dampferzeugung mittels Elektro- bzw. Wasserstoffkessel würde in etwa die 4-fache Menge an Strom benötigt als bei der CO₂-Abscheidung mit strombasierten Verfahren.
- **Geothermie:** Der hohe Wärmebedarf würde eine „offene Geothermie mit hoher Schüttungsrate“ erfordern wie sie z.B. bei den Stadtwerken in München eingesetzt wird (Abbildung 16 links oben). Als geeignetes Referenzprojekt für eine industrielle Anwendung wird das mit Mitteln des Landes NRW geförderte Forschungsprojekt „Kabel Zero“ im südwestfälischen Hagen identifiziert (Abbildung 16 rechts/unten). Dort kooperieren die Kabel Premium Pulp & Paper GmbH, Fraunhofer IEG und Fraunhofer UMSICHT, um am Standort des Papierherstellers eine Dampferzeugung zur Papiertrocknung mit Hilfe von Erdwärme zu entwickeln [14]. Die Papiertrocknung bei ~ 130° C mit einem thermischen Energiebedarf von 550 GWh entspricht von der Größenordnung dem Anforderungsprofil einer wärmebasierten CO₂-Abscheidung auf Basis der Aminwäsche.

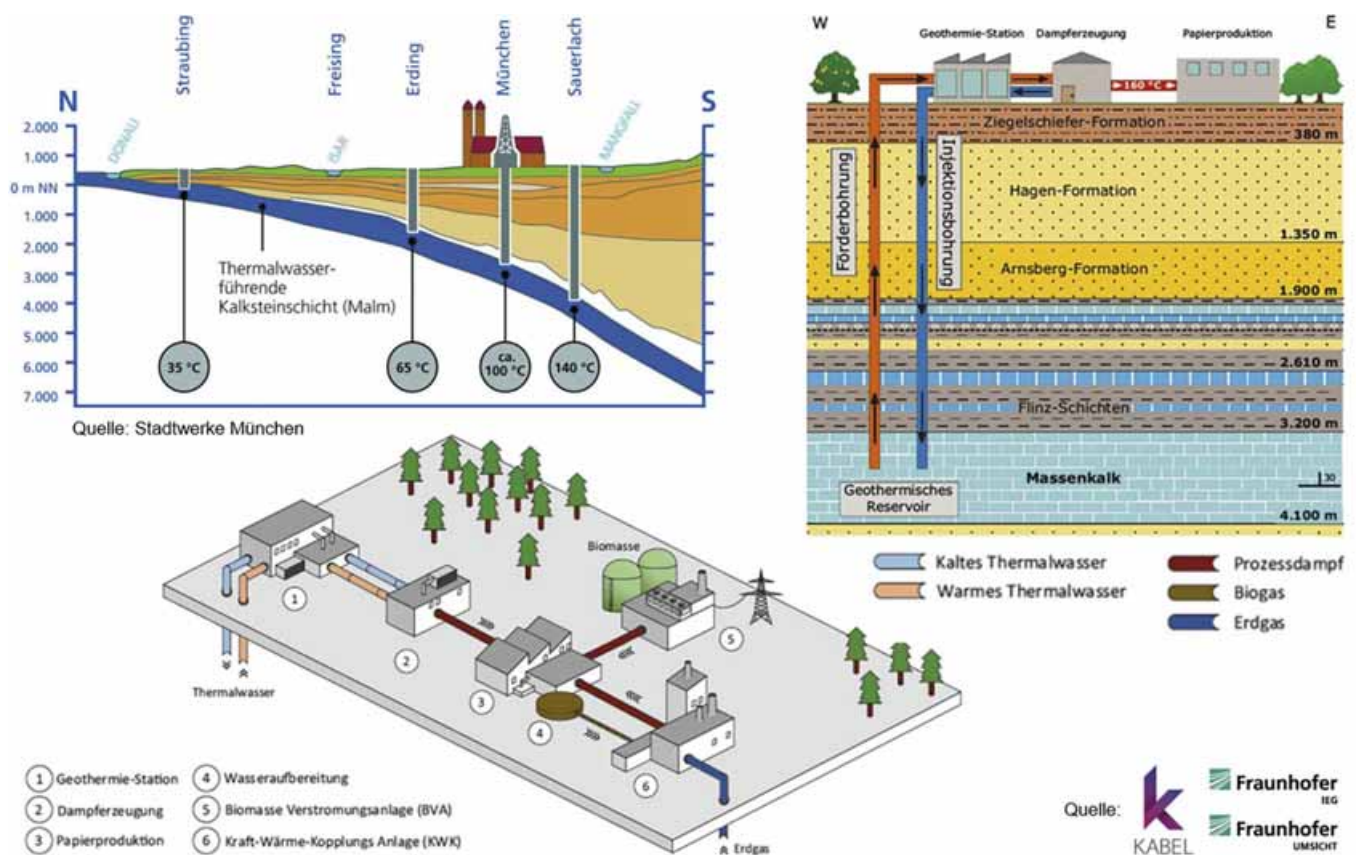


Abbildung 16: Tiefen-Geothermie-Anlage zur klimaneutralen Papiertrocknung [14]

Voraussetzung für die Erschließbarkeit einer regenerativen Energielösung auf Basis von Geothermie ist die regionale Verfügbarkeit von geothermischen Reservoirs in bis zu 4.000 m Tiefe (Abbildung 17). Die geologischen Voraussetzungen in der Region Erwitte/Geseke wurden mit Unterstützung der Fraunhofer-Einrichtung für Energieinfrastrukturen und Geothermie IEG in Bochum auf der Datenbasis vom Geologischen Dienst NRW (zentrale geowissenschaftliche Einrichtung des Landes Nordrhein-Westfalen im Zuständigkeitsbereich des MWIKE) untersucht.

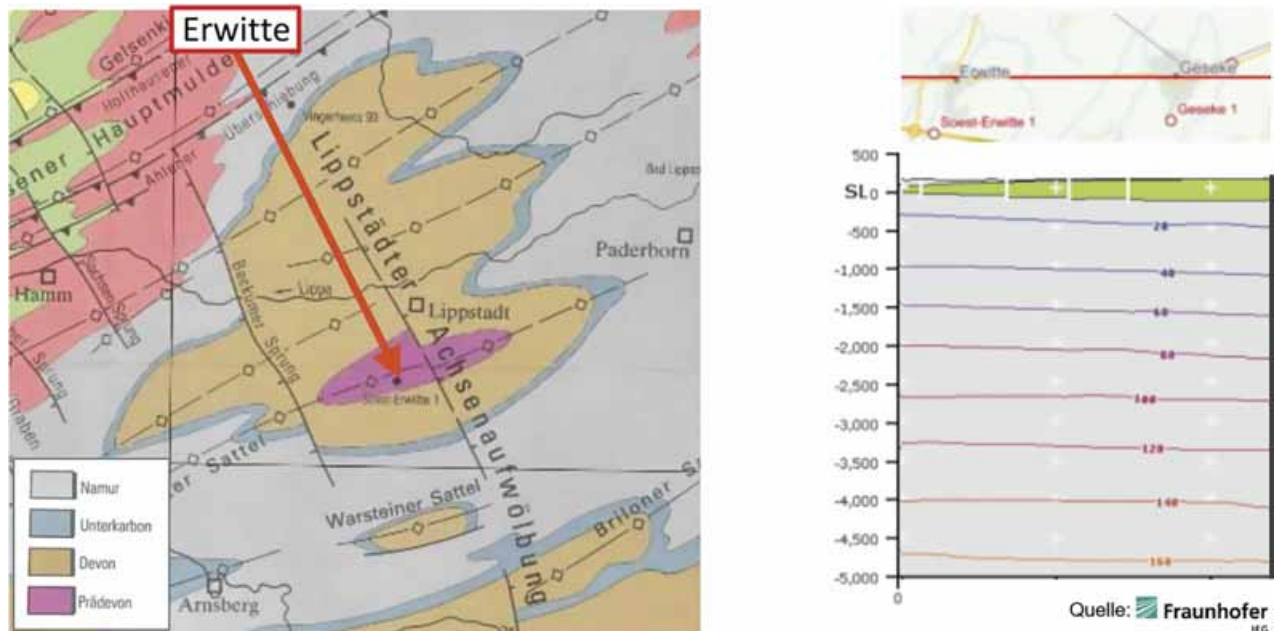


Abbildung 17: Geologischen Gegebenheit in der Umgebung von Erwitte/Geseke

Im Ergebnis sind die anvisierten geothermalen Reservoirs in der Region Erwitte/Geseke nicht verfügbar bzw. liegen sehr flach unterhalb der Oberfläche und weisen damit kein ausreichendes Temperaturniveau auf. Bereits in ca. 800 m Tiefe sind urzeitliche, wasserundurchlässige Gesteinsschichten anzutreffen, die durch entsprechende Bohrungen auch nachgewiesen worden sind. Geologischer Hintergrund dafür ist, dass Erwitte/Geseke direkt innerhalb der sogenannten „Lippstädter Achsenaufwölbung“ liegt. Diese führt u.a. zu ausgezeichneten Bedingungen für den Kalksteinabbau in der Region, bietet aber keine geeigneten Voraussetzungen für den Bau einer Tiefen-Geothermie-Anlage.

Regionales Integrationskonzept auf Basis der Aminwäsche

Ohne die Möglichkeit zur Erschließung einer regenerativen und grundlastfähigen Wärmequelle bleibt nur der Ausbau der thermischen Energieeffizienz durch eine erweiterte Abwärmenutzung über den aktuellen Stand der Technik hinaus. Das beinhaltet den zusätzlichen Einsatz von Grünstrom aus Wind und Sonne in einem mehrstufigen Wärmepumpenansatz, um die heute nicht nutzbare Abwärme auf einem Temperaturniveau unter ca. 120°C zusätzlich verfügbar zu machen (Abbildung 18).

Auf der Basis von im Projektkonsortium verfügbarer Expertise konnten eine Reihe von technischen Ansätzen zum Ausbau der multiplen Abwärmegewinnung aus der Zementklinkerproduktion auf niedrige Temperaturniveaus ermittelt werden. Im Bereich der industriellen Hochtemperatur-Wärmepumpen hat in den letzten Jahren eine dynamische technische Entwicklung stattgefunden und zu einem Stand der Technik geführt, der nach Meinung der dazu befragten Experten aus Wissenschaft und Industrie für die skizzierte Anwendung geeignet ist und noch weitergehende Perspektiven aufzeigt. Schließlich konnten von einem namhaften Chemieanlagenbauer mit Sitz in NRW die verfolgten Lösungsansätze zur Optimierung von Verfahrenstechnik und Sorbent-Rezeptur

bei der Aminwäsche und die sich daraus ergebende Perspektive für eine langfristige Reduzierung des Energiebedarfs in Erfahrung gebracht werden. Im Ergebnis erscheint die technische Machbarkeit eines regionalen Integrationsansatzes auf Basis „Aminwäsche mit Wärmerückgewinnung“ grundsätzlich gegeben.

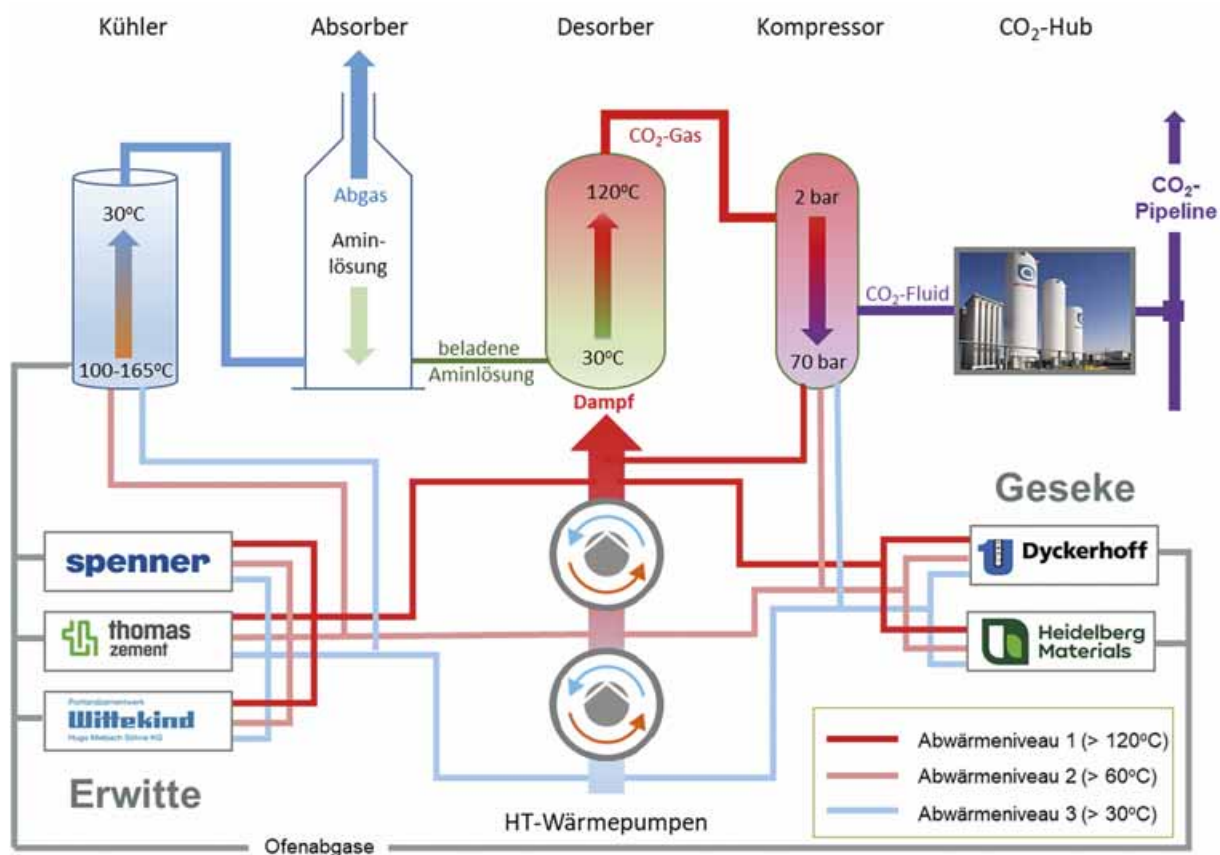


Abbildung 18: Regionales Integrationskonzept mit Aminwäsche und Wärmerückgewinnung

360°-Klimabilanz und Eingrenzung wärmebasierter Integrationsansatz

Die wärmebasierte Aminwäsche kann nur über den Ausbau der thermischen Energieeffizienz zu einer wettbewerbsfähigen Lösung für die Zementindustrie werden. Laufende Entwicklungen lassen eine Verbesserung der Energieeffizienz um ca. 33 % auf 2,4 GJ/t CO₂ bis 2030 erwarten. Das würde einem Primärenergiebedarf von ca. 1,67 TWh für 2,5 Mio. t CO₂ entsprechen bzw. 0,835 TWh zzgl. Strombedarf des Kompressors bei 50 % Wärmerückgewinnung. Somit würde ein wärmebasiertes Integrationskonzept mit dem Grad des über den Stand der Technik hinausgehenden Abwärme- und Grünstromeinsatzes zunehmend wirtschaftlich darstellbar.

Allerdings kann auch ein ausoptimierter wärmebasierter Integrationsansatz in einer umfassenden energetischen Betrachtung zu keiner energieeffizienteren regionalen Lösung als der strombasierte Integrationsansatz auf Basis von Oxyfuel führen. In dieser Betrachtung muß die alternative Nutzung der Abwärme aus dem Klinkerbrennprozess als Opportunitätskosten berücksichtigt werden. Das umfasst sowohl die vielfältige heutige Abwärmenutzung in den 5 Zementwerken der Region als auch die zusätzlichen Potenziale für eine erweiterte Wärmerückgewinnung. Es bleibt somit bei der Erkenntnis, dass die Energieeffizienz der regionalen CO₂-Abscheidung mit dem Grad der CO₂-Aufkonzentration durch „Oxy Combustion“ beim Klinkerbrennprozess ansteigt. Zur Klarstellung wird festgehalten, dass diese Erkenntnis nur für die Gegebenheiten in der Modellregion Erwitte/Geseke und dem fehlenden Zugang zu geothermischen oder sonstigen zusätzlichen Wärmequellen zutrifft.

4.

Vollständige Systeme für den CO₂-Verbleib

4. Vollständige Systeme für den CO₂-Verbleib

Klimaneutralität von Zementwerken gelingt nur durch den Aufbau vollständiger Systeme zur weiteren Nutzung oder Speicherung des abgeschiedenen CO₂. Das vorliegende Projekt soll daher eine übergeordnete Bewertung für die bestmögliche Verwendung und den Verbleib des CO₂ aus der Kalksteinverarbeitung in der Region Erwitte/Geseke ermöglichen. Als methodischer Ansatz dafür wird die Szenariotechnik gewählt, mit der multiple Zukunfts- bzw. Zielszenarien entwickelt und mit Blick auf unterschiedliche Dimensionen bewertet werden können. Diese Vorgehensweise bietet sich an, wenn es (wie im vorliegenden Fall) um die Entwicklung von Strategien und Konzepten mit einer Umsetzungsperspektive von einer Dekade oder mehr geht, dabei noch eine Reihe von Rahmenbedingungen unklar sind und ihre Entwicklung noch in ganz unterschiedliche Richtungen erfolgen kann [15].

Zielszenarien vollständiger CO₂-Systeme

Für die mögliche Verwendung und den Verbleib des CO₂ aus der Kalksteinverarbeitung in der Region Erwitte / Geseke werden drei Zielszenarien definiert und untersucht (Abbildung 19).

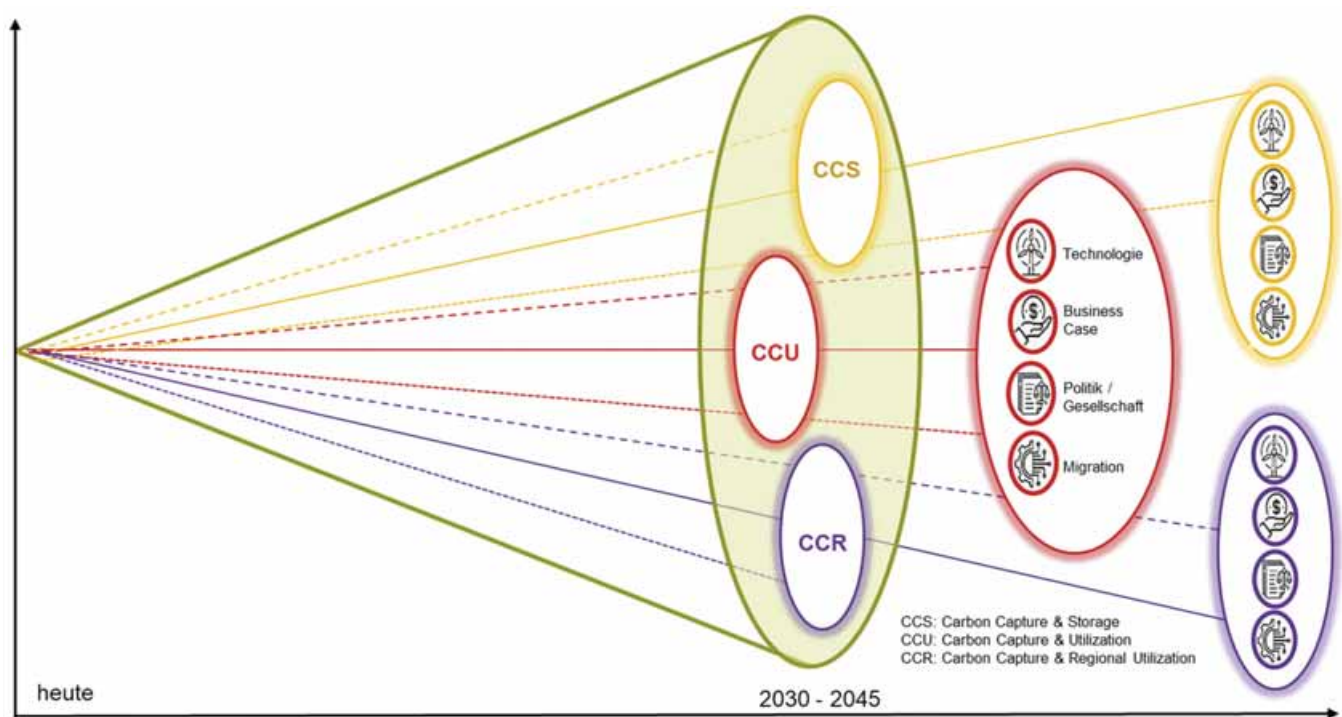


Abbildung 19: Entwicklung und Bewertung von multiplen Zielszenarien

Die ersten beiden Szenarien CCS und CCU sind bereits in der Carbon Management Strategie des Landes NRW angelegt. Als ein weiteres Szenario wird mit CCR die Überlegung eines regionalen CCU-Systems hinzugefügt. Hier geht es um die Frage, ob oder inwieweit in der Zementregion Erwitte / Geseke eine regionale CO₂-Kreislaufwirtschaft und zusätzliche Wertschöpfung am Ort des Rohstoffvorkommens aufgebaut werden könnte. Die Szenarien werden anhand folgender Bewertungskriterien analysiert und eingegrenzt:

- **Technologie:** Betrifft die Machbarkeit der jeweils erforderlichen Technologien und den Bedarf an CO₂-freier Energie, um diese zu betreiben. Die technologischen und energetischen Fragen bilden dabei „zwei Seiten einer Medaille“.

- **Business Case:** Behandelt die zusätzliche Kostenbelastung und wirtschaftliche Darstellbarkeit für die Unternehmen und die Frage, ob sich neue, tragfähige Geschäftsmodelle entwickeln lassen.
- **Politik/Gesellschaft:** Betrachtet die Vereinbarkeit mit dem erkennbaren politischen Willen und der gesellschaftlichen Akzeptanz sowie deren mögliche Entwicklungen. Hierbei sind bezogen auf das Ziel der Klimaneutralität weitere politische Rahmenbedingungen und Perspektiven zu berücksichtigen.
- **Migration:** Thematisiert die Fragestellung nach einer stufenweisen Umsetzbarkeit in einem zeitlichen Horizont von 2030 – 2045, der für die Umsetzung einer klimaneutralen Zementregion Erwitte/Geseke in den Blick genommenen wird.

Im Folgendem werden die drei Szenarien inhaltlich konkretisiert und schrittweise im Hinblick auf die genannten Bewertungskriterien eingegrenzt.

Carbon Capture & Storage (CCS)

Zum Schutz des Klimas soll das überwiegend aus dem Kalkstein stammende CO₂ nicht weiter in die Atmosphäre gelangen und wieder der Geologie in Form einer langfristigen Speicherung zugeführt werden (Abbildung 20).

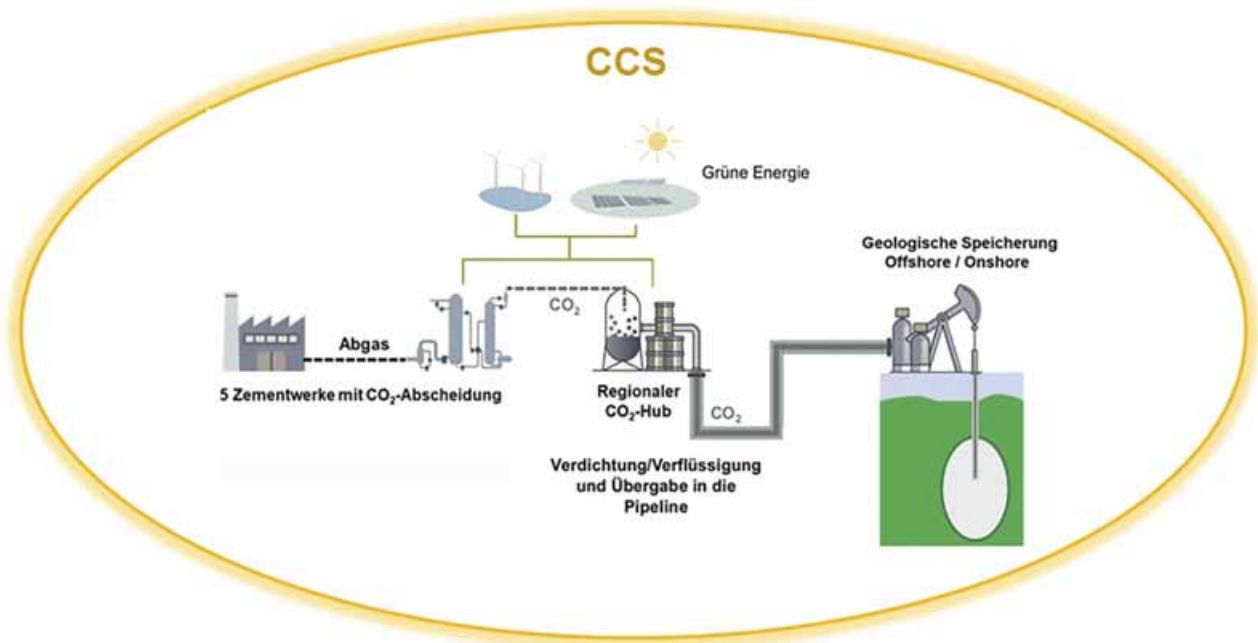


Abbildung 20: Zielszenario CCS

Es macht volkswirtschaftlich Sinn, vornehmlich an den konzentrierten Punktquellen der Zementindustrie große Mengen CO₂ abzuscheiden. Im Vergleich viel aufwendiger ist es, unvermeidbare aber deutlich weniger konzentrierte Treibhausgasemissionen in kleinteiligen Bereichen wie der Landwirtschaft einzusammeln. Auch die zunehmende Suche nach negativen Emissionsbeiträgen zum Ausgleich unvermeidbarer Emissionen zeigt, dass diese einerseits mit besonders hohem energetischem Aufwand (z.B. CO₂-Aufkonzentration aus der Atmosphäre durch Direct-Air-Capture) oder begrenzter Verfügbarkeit einhergehen (z.B. Nutzung biogener Brennstoffe mit CO₂-Abscheidung, BECCS). Die CO₂-Abscheidung an konzentrierten CO₂-Quellen der Industrie und die geologische CO₂-Speicherung wird auch von der „Wissenschaftsplattform Klimaschutz“ für eine bundesweite Carbon Management Strategie empfohlen [16]. CCS wird damit absehbar zur präferierten Lösung in der politischen Willensbildung für den Verbleib des in der Region abgeschiedenen CO₂. Kritischer Punkt ist die zeitliche Verfügbarkeit und die Bezahlbarkeit einer überregionalen CO₂-Infrastruktur für den Pipelinetransport und die Speicherung des CO₂ sowie die gesellschaftliche Akzeptanz dafür.

Carbon Capture & Utilization (CCU)

Das Szenario CCU behandelt die Frage, ob und wann ein Volumenmarkt für CO₂ insbesondere durch die Dekarbonisierung der kohlenstoffhaltigen Chemie entsteht und sich daraus ein vorteilhafteres Geschäftsmodell im Vergleich zu CCS entwickeln lässt (Abbildung 21).

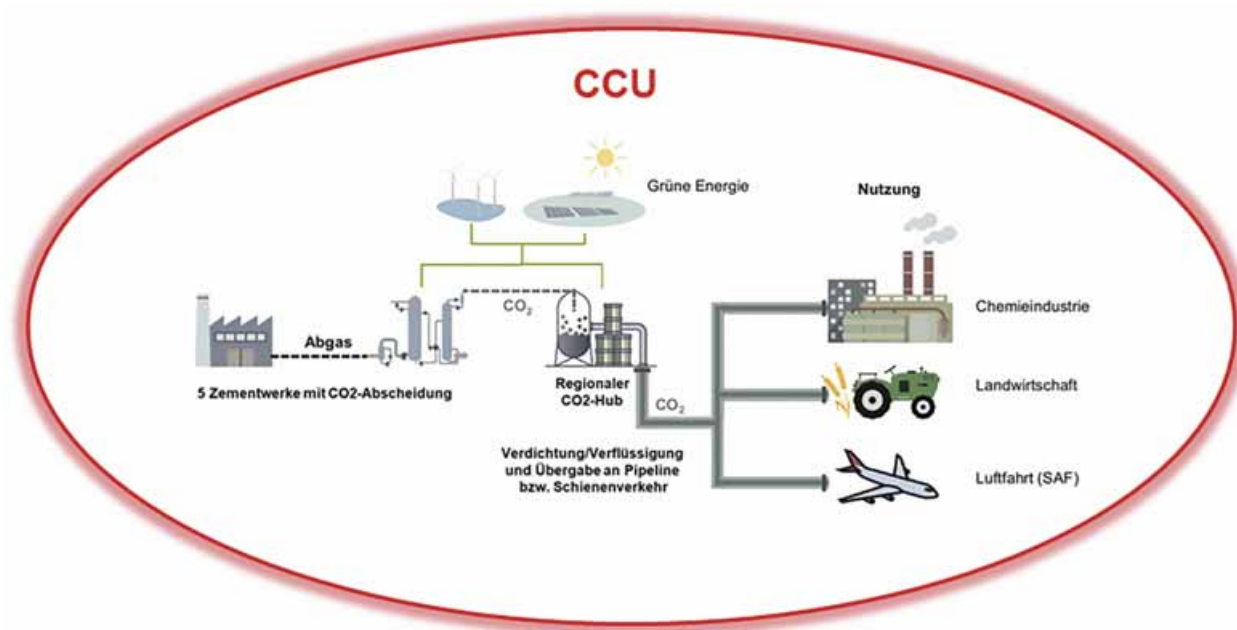


Abbildung 21: Zielszenario CCU

Die organische Chemieproduktion hat in Deutschland einen jährlichen Kohlenstoffbedarf von 20 Mio. Tonnen, der heute zu ca. 87 % mit fossilem Kohlenstoff aus Erdöl, Erdgas und Kohle und zu 13 % mit Biomasse gedeckt wird. Der biogene Anteil lässt sich aus den genannten Gründen auch in der Chemieindustrie nicht beliebig ausbauen, so dass der Kohlenstoff im CO₂ aus der Zementregion Erwitte/Geseke chemisch nutzbar gemacht werden könnte. Dazu sind allerdings große Mengen Energie in Form von Wasserstoff notwendig, wozu mit dem Ziel der Klimaneutralität nur CO₂-freie Energien oder vorhandene Prozessenergie genutzt werden dürften. Insofern ist bei CCU insbesondere die Frage der zeitlichen Verfügbarkeit und Wirtschaftlichkeit der erforderlichen CO₂-freien Energie relevant.

Darüber hinaus ist eine CCU-Wertschöpfung mit fossilem CO₂ bezüglich einer Entwicklung zur vollständigen Klimaneutralität nur dann wünschenswert, wenn damit der Kohlenstoff dauerhaft oder über sehr lange Zeiträume gebunden werden kann. Insbesondere Anwendungen, bei denen das CO₂ relativ schnell wieder in die Atmosphäre gelangt (wie z.B. e-Fuels) werden dem nicht gerecht, auch wenn sie heute gegenüber der Nutzung fossiler Treibstoffe eine Emissionsminderung darstellen kann. Kritischer Punkt des Szenarios CCU ist neben der Bereitstellung von grüner Energie daher auch die Frage, welche Wirtschaftlichkeit sich für die Zementwerke aus den Rahmenbedingungen der EU mit Blick auf die Zulässigkeit von fossilem CO₂ in nachhaltigen Produkten und die Anrechnung im EU-ETS ergeben.

Carbon Capture & Regional Utilization (CCR)

Im regionalen „Mehrwertszenario“ CCR bleiben das CO₂ und die mögliche Wertschöpfung in der Region. Ziel wäre es, die Zementregion Erwitte/Geseke durch lokale Lösungen weitgehend unabhängig von überregionalen Voraussetzungen und der Anbindung an eine überregionale Infrastruktur klimaneutral zu machen bzw. entscheidende Schritte hierzu regional zu entwickeln (Abbildung 22).

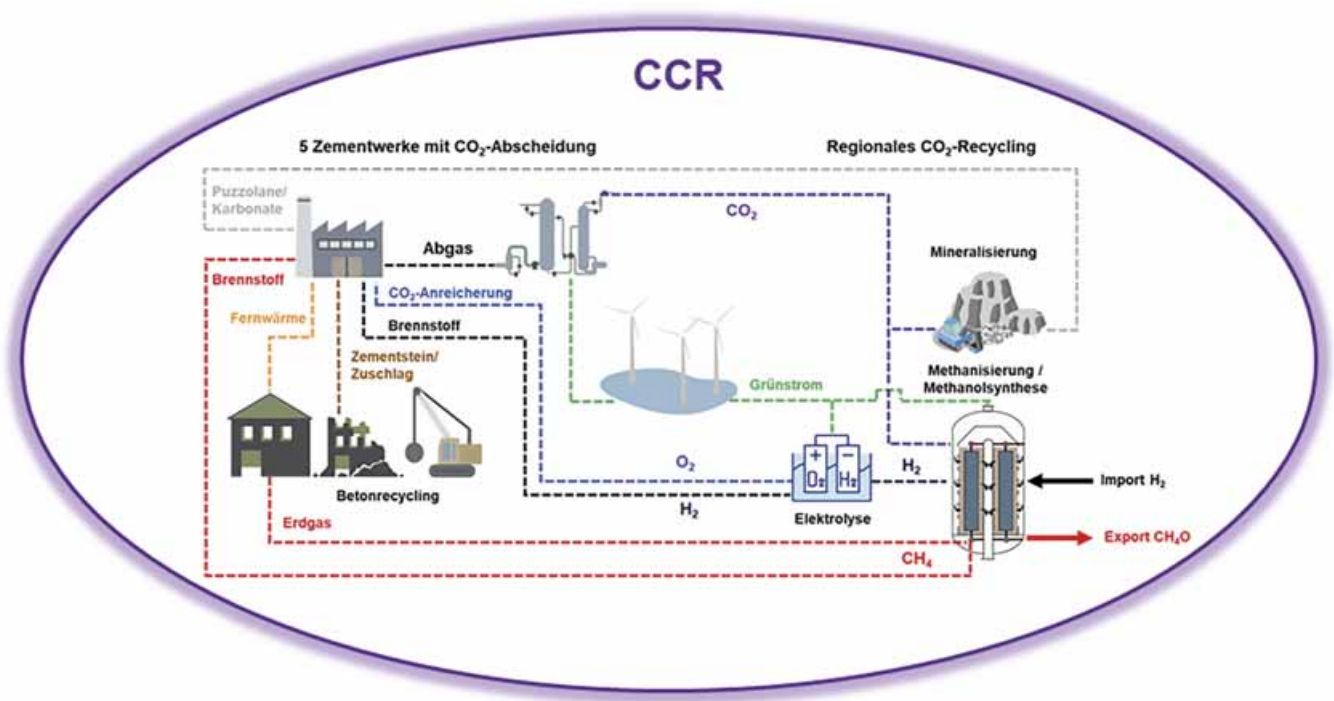


Abbildung 22: Zielszenario CCR

Ein kleiner Teil des abgeschiedenen CO₂ könnte durch Mineralisierung zu Zementklinker-Substituten recycelt werden, die dann wieder dem Zement zugefügt werden. Der überwiegende Teil des CO₂ müsste aber zu Methanol oder Methan synthetisiert werden. Das erzeugte Methanol würde als Grundstoff für die chemische Industrie vermarktet. Methan könnte als Ersatzbrennstoff im Drehofen oder in privaten Haushalten zum Einsatz kommen. Damit gelten hier die kritischen Faktoren des Szenarios CCU im Hinblick auf die Bereitstellung von grüner Energie und die sich aus den EU-Rahmenbedingungen ergebende Wirtschaftlichkeit analog. Als spezifischer kritischer Faktor dieses Szenarios kommen noch die Investitionen in den regionalen Aufbau von Produktionskapazitäten und Infrastrukturen für die Erzeugung von Grünstrom, die Elektrolyse von Wasserstoff und die Synthese von Methanol/Methan hinzu. Hier geht es letztlich um die Beurteilung, inwieweit eine Synthese von Grundchemikalien bzw. Methan am Standort des Kalksteinvorkommens sinnvoll wäre, ohne dass eine nennenswerte chemische oder petrochemische Industrie in der unmittelbaren Umgebung vorhanden ist.

Zusätzlicher Grünstrombedarf für CCS und CCU/CCR

Die effiziente Nutzbarkeit und Verfügbarkeit von klimaneutraler Energie hat sich als limitierender Gestaltungsfaktor für die technische Lösungsfindung bei der CO₂-Abscheidung herausgestellt und verdient deshalb auch besonderes Augenmerk bei der Frage des Verbleibs und der möglichen Verwendung des abgeschiedenen CO₂. Der zusätzliche Grünstrombedarf für die Abscheidung von 2,5 Mio. t CO₂ wurde in Kapitel 3 auf eine Bandbreite zwischen 0,75 und 1 TWh eingegrenzt. Darin sind sowohl die unvermeidbaren Prozessemissionen als auch die «schwer vermeidbaren» Brennstoffemissionen enthalten. Es wird daher zunächst die Frage aufgeworfen, inwieweit die abzuscheidende CO₂-Menge durch eine theoretisch denkbare Defossilisierung des Brennstoffeintrags um den 1/3-Anteil der Brennstoffemissionen reduziert werden kann, um so die nachfolgende CCUS-Prozesskette von diesem Volumen von vorne herein zu entlasten. Diese Fragestellung ist besonders relevant mit Blick auf den zusätzlichen Grünstrombedarf zur Weiterverarbeitung des CO₂ in den Szenarien CCU und CCR. Sie ist aber auch vor dem Hintergrund der im Zusammenhang mit CCS stehenden Kritik einer unnötig langen Aufrechterhaltung von fossilen Geschäftsmodellen bzw. –prozessen von Interesse.

Es ist heute aus verfahrenstechnischer Sicht noch ungelöst, den Klinkerbrennprozess ausschließlich mit Wasserstoff als Brennstoff zu betreiben. Abgesehen davon würden ca. 80.000 t Wasserstoff pro Jahr benötigt, um den thermischen Energiebedarf der Zementregion in Höhe von ca. 3,17 TWh zu decken (dieser Berechnung liegt ein thermischer Energiebedarf von 3.352 MJ pro Tonne Klinker und ein Brennwert von 39,6 kWh pro Kilogramm Wasserstoff zugrunde). Unter Berücksichtigung von Wirkungsgradverlusten bei der Elektrolyse wäre dafür CO₂-freier Strom in einer Größenordnung von etwa 4,24 TWh erforderlich (die Elektrolyse von 1 kg H₂ hat aktuell einen Strombedarf von ca. 53 kWh). Dieses entspricht wiederum der mehr als 4-fachen Energiemenge für eine Abscheidung bezogen auf das gesamte CO₂-Volumen von 2,5 Mio. t. Es wird daher insgesamt um mehr als den Faktor 10 energieeffizienter und damit nachhaltiger sein, das CO₂ aus den fossilen Brennstoffen in einer auf die Abscheidung der unvermeidlichen Prozessemissionen ausgerichteten Zementanlagentechnologie „mitabzuscheiden“ als den Wärmebedarf für die Zementherstellung zusätzlich über grünen Wasserstoff zu elektrifizieren. Demnach wäre es im künftigen CO₂-Emissionshandel aus ressourcenökonomischer Sicht geboten, die «schwer vermeidbaren» Brennstoffemissionen gleichwertig zu den unvermeidbaren Prozessemissionen zu berücksichtigen.

Im Szenario CCS beschränkt sich der zusätzliche Grünstrombedarf nach erfolgter Abscheidung und Verflüssigung auf den Transport und die Einlagerung des CO₂ unter den erforderlichen Druck- und Temperaturbedingungen. Dagegen geht die weitere Nutzung des abgeschiedenen CO₂ im Rahmen der Szenarien CCU und CCR mit einem besonders hohen Bedarf an CO₂-freier Energie einher. Hier ist insbesondere die Weiterverarbeitung von CO₂ und Wasserstoff zum chemischen Grundstoff Methanol relevant. Für die Synthese von 2,5 Mio. t CO₂ zu Methanol entsteht ein zusätzlicher Grünstrombedarf von ca. 18 TWh, der sich wie folgt berechnet:

- unter Berücksichtigung der Molekulargewichte erfordert die Herstellung von 1 kg Methanol (CH₃OH) theoretisch 1,3750 kg CO₂ sowie 0,1875 kg H₂, wobei 0,5625 kg H₂O als Nebenprodukt anfallen. Um 2,5 Mio. t CO₂ zu 1,8 Mio. t CH₃OH zu verarbeiten, sind somit 340.000 t H₂ erforderlich. In einer 360°-Energiebilanz ist die exotherme Reaktion zwischen CO₂ und Wasserstoff zu beachten.
- 1 kg H₂ hat einen Brennwert von 39,6 kWh und einen Strombedarf von 53 kWh bei der Elektrolyse mit einem Wirkungsgrad von heute 74 %. Zur Herstellung von 340.000 t H₂ sind heute somit ca. 18 TWh Strom erforderlich. Bei einer langfristigen Steigerung des Wirkungsgrades bei der Elektrolyse auf 98 % würde der Bedarf auf ca. 14 TWh sinken.



Abbildung 23: Einordnung des zusätzlichen Grünstrombedarfs für CCU/CCR

Abbildung 23 zeigt eine Einordnung der Bandbreiten des zusätzlichen Grünstrombedarfs für die Herstellung von Methanol in einem „Power-to-Liquid“-Prozess im Vergleich zur vorausgehenden CO₂-Abscheidung („Power-to-Capture“) oder einer angenommenen zusätzlichen Defossilisierung des Brennstoffeintrags mit grünem Wasserstoff („Power-to-Gas-to-Heat“). Eine Berücksichtigung von künftig möglichen Wirkungsgradsteigerungen bei der Elektrolyse und der exothermen Reaktion zwischen CO₂ und Wasserstoff bei der Synthese würde die Relationen nur unwesentlich verändern.

18 TWh entsprechen ca. 16 % des gesamten Stromverbrauchs von NRW, der aktuell bei etwa 111 TWh liegt. Dieses verdeutlicht ebenfalls die enorme Größenordnung des CO₂-freien Energiebedarfs, der mit einer CCU-Wertschöpfung für das CO₂-Abscheidevolumen aus der Zementregion Erwitte/Geseke verbunden wäre.

Bewertung und Eingrenzung des Zielszenarios CCR

Ein zusätzlicher regionaler Grünstrombedarf von 18 TWh entspricht in etwa dem Jahresenergieertrag von 1.200 Windkraftanlagen mit 7 MW Nennleistung und einem Investitionsvolumen von ca. 7,2 Milliarden €, was an dieser Stelle nur zur Veranschaulichung der Größenordnungen dienen soll. „Power-to-Liquid“-Anlagen brauchen zudem hohe Volllaststunden und können nicht ausschließlich mit Überschußstrom betrieben werden. Auch hier limitiert die Energiefrage, d.h. die Verfügbarkeit von CO₂-freiem Strom bzw. grünem Wasserstoff, letztlich die Möglichkeiten zur weiteren Nutzung des in der Region abgeschiedenen CO₂. Auf eine weitergehende Konkretisierung der dazu korrespondierenden Elektrolyse- und Synthesekapazitäten und Ermittlung deren CAPEX und OPEX wird daher verzichtet. Ein „regionales CCU“ mit der Erzeugung von erneuerbarer Energie und dem Aufbau von Elektrolyse- und Synthesekapazität vor Ort sprengt auch in einer langfristigen Perspektive den Rahmen des Vorstellbaren mit Blick auf die damit verbundenen Größenordnungen und mögliche CCR-Geschäftsmodelle der Unternehmen.

Zur Klarstellung wird festgehalten, dass diese Erkenntnis für die Gegebenheiten in der Modellregion Erwitte/Geseke und die erforderliche Abwicklung eines CO₂-Massenstroms von 2,5 Mio. t im Dauerbetrieb zutrifft. Ein „regionales CCU“ kann sehr wohl im Einzelfall und für begrenzte Mengen sinnvoll sein. Aus der derzeitigen Entwicklung von CCUS-Projekten lassen sich drei konkrete Beispiele nennen, in denen eine regionale CO₂-Nutzung angesichts besonderer Voraussetzungen vorgesehen ist:

- **Projekt Carbon2Business**, Zementwerk Lägerdorf/Schleswig-Holstein: In Verbindung mit dem Projekt Westküste-100 stellt die Nutzung des lokal verfügbaren und z.T. bisher ungenutzten Offshore-Windstroms für die CO₂-Nutzung in der nahegelegenen Raffinerie Heide eine wesentliche Voraussetzung dar [17].
- **Projekt Cap2U**, Zementwerk Lengfurt/NW-Bayern. Die vorgesehene CO₂-Nutzung steht hierbei in besonderer Verbindung mit einer heute z.T. hochpreisigen, allerdings mengenmäßig begrenzten CO₂-Nachfrage u.a. aus dem Lebensmittelbereich und der Möglichkeit, die bisherige direkte Herstellung von CO₂ durch die CO₂-Abscheidung im Zementwerk ersetzen zu können [18].
- **Projekt Rohrdorf CCU**, Zementwerk Rohrdorf/SO-Bayern: Die vorgesehene CO₂-Nutzung für die Produktion von z.B. Ameisensäure wird motiviert durch die anfängliche Perspektive zur Entwicklung eines regionalen CO₂-Transportnetzwerkes mit Verbindung zum nahe gelegenen Chemie-Standort Burghausen [19].

Alle drei Projektbeispiele erzielen ihre Berechtigung als Nischenanwendung über eine regionale Sektorenkopplung zur „Abnahmeseite“, wobei auch dort die Verfügbarkeit von CO₂-freier Energie einen wesentlichen und ggf. auch begrenzenden Faktor für die CO₂-Nutzung darstellt. Bei der Suche nach ähnlichen Modellen für eine CO₂-Teilmenge in der Region Erwitte/Geseke ist die Nutzung von Überschußstrom aus den Windparks im Paderborner Land als ein möglicher Ansatzpunkt aufgefallen. Es konnten aber keine nennenswerten Anknüpfungspunkte für sektorenübergreifende Wertschöpfungsketten zur regionalen CO₂-Nutzung identifiziert werden.

Bewertung und Eingrenzung des Zielszenarios CCU

Beim Umbau der Stromversorgung in Deutschland zu einem klimaneutralen Energiesystem bis 2045 ist Grünstrom ein „knappes Gut“, wodurch es zu Opportunitätskosten von CCU gegenüber konkurrierenden Anwendungen mit einem höheren Wirkungsgrad für Klimaneutralität kommt. Aufgrund des enormen zusätzlichen Grünstrombedarfs ist die Wirksamkeit einer überregionalen CCU-Wertschöpfung für 2,5 Mio. t CO₂ zum Klimaschutz im Kontext der Energiewende zu bewerten und einzuordnen. Dazu wird der aktuelle Entwurf des Netzentwicklungsplans 2037/2045 herangezogen, den die Übertragungsnetzbetreiber am 12. Juni 2023 an die Bundesnetzagentur übergeben haben und der veröffentlicht wurde [20]. Der Netzentwicklungsplan zeigt einen Anstieg des Stromverbrauchs in Deutschland von ca. 530 TWh in 2023 auf bis zu 1.300 TWh in 2045 auf. Damit verbunden ist eine nahezu Verhundertfachung der Grünstrom-Erzeugung bis 2045 (Abbildung 24).

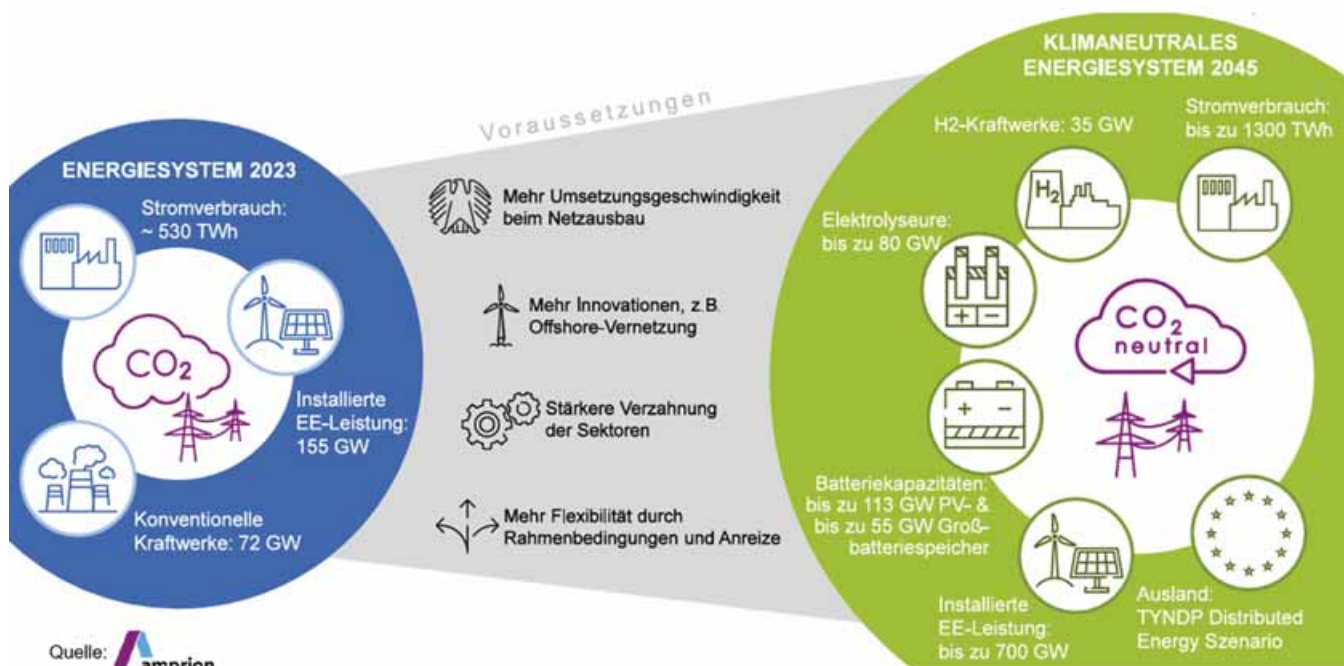


Abbildung 24: Überblick zum aktuellen Netzentwicklungsplan Strom für Deutschland

Für die Nutzung des zusätzlichen Grünstroms sind im Netzentwicklungsplan verschiedene Szenarien und Prioritäten abgebildet. Mit dem Ausstieg aus der Kohleverstromung muss zunächst die Umstellung des Energiemix auf regenerative Energien für den heutigen Bedarf gelingen. Mit Priorität abgebildet sind auch die zusätzlichen Bedarfe für die Elektrifizierung der Sektoren Verkehr („Elektromobilität“) und Wohnen („Wärmepumpe“) sowie die Erzeugung von Prozesswärme im industriellen Bereich („Hochtemperatur-Wärmepumpen“). Beim Ausbau der Wasserstoffelektrolyse liegt die Priorität auf der Integrierbarkeit der Erneuerbaren-Energie-Leistung mit Blick auf die Grundlastversorgung durch H₂-Kraftwerke. Eine Priorisierung von „Power-to-Liquid“ ist für den zeitlichen Horizont von 2030 bis 2045 aktuell nicht erkennbar und auch ressourcenökonomisch nicht darstellbar. Damit könnte eine CCU-Wertschöpfung im industriellen Maßstab energieseitig nur durch den zusätzlichen Import von großen Mengen grünen Wasserstoffs abgebildet werden.

Diese Auswertung macht deutlich, dass CCU-Anwendungen absehbar erst in einem zeitlich nachgelagerten Horizont auf industriellen Maßstab skalierbar sind, wenn grüner Wasserstoff in ausreichend großen Mengen importiert werden kann und „Commodity“ geworden ist.

Die Energieverfügbarkeit ist letztlich eine notwendige, aber nicht hinreichende Bedingung dafür, wann und ob es überhaupt zu einer nachhaltigen Entwicklung einer CCU-Wertschöpfung in Deutschland kommen kann. Die Frage, ob im langfristigen Zeithorizont ein Volumenmarkt für CO₂ entsteht und sich dann ein vorteilhafteres Geschäftsmodell im Vergleich zu CCS entwickeln lässt, kann heute nur als „offen“ bezeichnet werden. Ein politischer Wille für eine künftige Priorisierung und Schaffung der Rahmenbedingungen für eine großskalige Anwendung von „Power-to-Liquid“ sind aktuell jedenfalls nicht erkennbar. Vielmehr kann davon ausgegangen werden, dass die EU die Rahmenbedingungen für die Anrechnung im EU-ETS mit dem Ziel der Klimaneutralität z.T. restriktiv setzen wird und damit absehbar nicht davon ausgegangen werden kann, dass CCU bei der künftigen Emissionsanrechnung im EU-ETS gleichwertig zu CCS berücksichtigt wird. Es müsste sich dann ein Marktpreis für CO₂ entwickeln, der diesen erheblichen ökonomischen Nachteil mehr als kompensiert. Die Vorstellung, dass neben der notwendigen Energie auch das CO₂ einmal einen solchen Preis haben wird, bleibt aus heutiger Sicht auch mit Blick auf einen Zeithorizont nach 2045 mehr als fraglich.

Bewertung des Zielszenarios CCS

CCS ist somit das einzig „greifbare“ Szenario für den Verbleib des abgeschiedenen CO₂, auf das eine klimaneutrale Zementregion Erwitte/Geseke mit Blick auf den Zeithorizont 2030 bis 2045 gezielt hinarbeiten könnte. Das beinhaltet insbesondere die Schaffung einer überregionalen Infrastruktur für den Pipelinetransport und die Speicherung des CO₂. Einzig erkennbar verfolgte Option für die CO₂-Speicherung ist aktuell eine Einlagerung unter der ausländischen Nordsee:

- **Norwegen** will im Rahmen des strategischen „Longship“-Projektes seine Öl- und Gasindustrie dekarbonisieren und die grenzüberschreitende CO₂-Einlagerung als neues Geschäftsmodell entwickeln. Das Referenzprojekt „Northern Lights“ wird von der norwegischen Regierung im großen Stil gefördert und von einem Konsortium aus den globalen Energiekonzernen Shell, Total und Equinor betrieben, der sich wiederum im Mehrheitsbesitz vom norwegischen Staat befindet. Ab 2024 sollen zunächst jährlich etwa 1,5 Mio. Tonnen CO₂ etwa 100 km vor der norwegischen Küste in 2.500 Meter Tiefe eingelagert werden [21].
- **Dänemark** hat 2023 mit dem „Greensand-Projekt“ seine erste Speicheranlage für CO₂ unter dem Meeresgrund in Betrieb genommen. Unter maßgeblicher Beteiligung des britischen Chemieunternehmens Ineos und des deutschen Energiekonzerns Wintershall Dea sollen bis 2030 jährlich bis zu 8 Mio. Tonnen CO₂ in einer Tiefe von 1.800 Metern in einem ehemaligen Ölfeld etwa 200 Kilometer von der dänischen Küste eingelagert werden [22].

Verschiedene Unternehmen aus den Bereichen Schienentransport, Binnen- und Seeschifffahrt sowie Hafenterminal- und Pipelinebetrieb bereiten sich aktuell auf diesen neu entstehenden Markt und den Aufbau einer Logistikkette in Richtung Nordsee vor. Auch gibt es erste Überlegungen für eine Spezifikation des zu transportierenden CO₂, die zusätzliche Energiebedarfe an den Standorten der Zementwerke für weitere Stufen zur Erreichung bestimmter Reinheitsgrade hervorrufen kann. Einen guten Überblick zum Stand der Entwicklung konnte das Projektkonsortium bei der „2nd ECRA Conference on CO₂-Infrastructures“ am 19./20. Januar 2023 gewinnen, auf deren Inhalte an dieser Stelle verwiesen wird [23].

Im Ergebnis bleibt festzuhalten, dass die Verfügbarkeit einer geschlossenen Prozesskette für den Transport und die Speicherung von CO₂ ein „kritischen Faktor“ für die Machbarkeit einer klimaneutralen Zementregion Erwitte/Geseke ist. Der Pipeline-Betreiber Open Grid Europe (OGE) plant zwar in Deutschland den Bau eines Transportnetzes, mit dem künftig CO₂ von den Industriezentren und weiteren relevanten Binnenstandorten zu mehreren Häfen an der Nordseeküste transportiert und auf Tanker verladen werden soll [24]. Die aktuellen Planungen von OGE sehen aufgrund des großen CO₂-Volumens auch eine Anbindung der Zementregion Erwitte/Geseke vor. Allerdings ist die konkrete Verfügbarkeit und geografische Abdeckung dieses Pipelinesystems noch unklar.

Darüber hinaus wird der Aufbau einer Logistikkette aus der Zementregion Erwitte/Geseke bis in die tiefe Nordsee vor Skandinavien zu hohen Kosten führen, da der Transport von flüssigem CO₂ besondere Druck- und Temperaturbedingungen (d.h. auch Energie) benötigt und sich eine Mehrstufigkeit in der Kette mit Bedarf für Zwischenspeicherungen in den Hafenterminals kaum vermeiden lässt. Mit Blick auf den Aufbau der notwendigen CO₂-Speicherinfrastruktur zur Dekarbonisierung der heimischen Zementindustrie kann die Anbindung an eine mehrstufige Logistikkette über sehr große Distanzen nach Skandinavien nicht nur ökonomisch, sondern auch hinsichtlich der dabei entstehenden Abhängigkeiten in Frage gestellt werden. Fraglich wird dies insbesondere, wenn in Deutschland vergleichbare geologische Bedingungen und technische Möglichkeiten für eine CO₂-Speicherung bestehen.

Die geologischen Bedingungen im Norddeutschen Becken sind bis weit in die Ausschließliche Wirtschaftszone von Deutschland in die Nordsee hinein ähnlich. Salinare Aquifere sind weit verbreitet und bieten ein großes, zunächst theoretisch nutzbares „Porenvolumen“ an, in denen das CO₂ mineralisieren und dadurch langfristig wieder zu Kalkstein werden kann [25]. Darüber hinaus gibt es eine Vielzahl von ausgebeuteten Erdöl- und Erdgaslagerstätten, deren Speichereigenschaften aus Erkundung und Betrieb bereits bekannt sind und in denen das CO₂ bei erfolgreicher Eignungsprüfung eingelagert werden könnte. Salinare Aquifere sind im Vergleich zur Folgenutzung von Erdgasfeldern mit einem deutlich größeren Erkundungsaufwand auch im Hinblick auf die Soleverdrängung bzw. –aufnahme verbunden und können als langfristige Ausbaureserve angesehen werden. Die Geologie in der unmittelbaren Umgebung von Erwitte/Geseke bietet zwar wegen der „Lippstädter Achsenaufwölbung“ kein passendes Porenvolumen für eine CO₂-Einlagerung. Es gibt aber sehr viele untersuchungswürdige Gebiete und Lagerstätten ab ca. 100 km auf dem Weg zu den angedachten Infrastrukturen in Skandinavien.

Mit Unterstützung durch die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) in Hannover konnten Ansatzpunkten für eine mögliche CO₂-Speicherung in der weiteren Umgebung der Zementregion Erwitte/Geseke identifiziert werden (Abbildung 25). Demnach scheinen die geologischen Voraussetzungen für eine CO₂-Speicherung im äußersten nordöstlichen Teil von NRW und im Süden von Niedersachsen günstig zu sein. Für eine CO₂-Speicherung bietet sich insbesondere die Folgenutzung einer Vielzahl von erschöpften Erdgasfeldern in dieser Region an. Deren Langzeitdichtigkeit für Erdgase ist naturgemäß nachgewiesen und die verfügbare Speicherkapazität würde für Jahrzehnte reichen. Es sind prinzipiell für diese Region keine unlösbaren Probleme mit Blick auf die Geosicherheit bei der CO₂-Speicherung bekannt [26]. Auch dürfte dort die erforderliche technologische Kompetenz in den Bereichen Erdgasförderung und Bergbau ausreichend vorhanden sein. Eine weitere Prüfung der Eignung dieser Region für die CO₂-Speicherung scheint angesichts der ambitionierten Klimaschutzziele in Deutschland sinnvoll. Dabei sind mögliche Nutzungskonkurrenzen zur tiefen Geothermie und zur Unterspeicherung von Erdgas oder künftig Wasserstoff zu berücksichtigen.

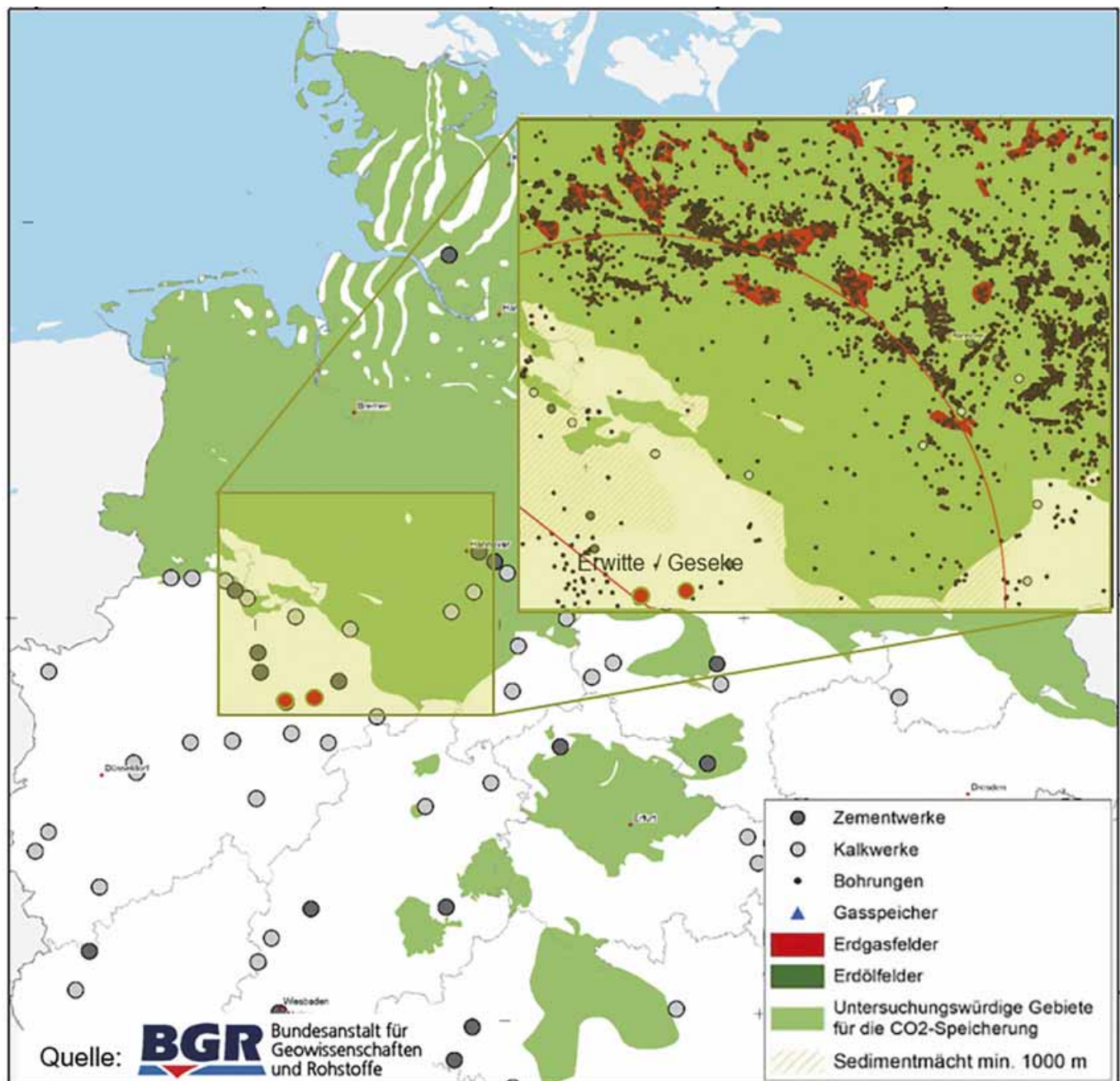


Abbildung 25: Untersuchungswürdige Lagerstätten für eine überregionale CO₂-Speicherung

5.

Hemmnisse und Akzeptanzanforderungen

5. Hemmnisse und Akzeptanzanforderungen

Die Transformation hin zu CO₂-Klimaneutralität wird die Zementregion Erwitte/Geseke vor bisher ungeahnte Herausforderungen stellen. Als zentrales Element der Transformation ist der Umstieg auf eine CO₂-neutrale Anlagentechnologie von den Unternehmen der Region individuell zu bewältigen. Als zweite große Herausforderung wurde der regionale Aufbau bzw. die Anbindung an eine Energie- und CO₂-Infrastruktur identifiziert, mit der eine geschlossenen Prozesskette zur Abscheidung und Speicherung des CO₂ aus der Zementregion betrieben werden kann. Schließlich ist eine flankierende Synchronisation der regionalen Transformation mit Politik und Gesellschaft unabdingbar, da diese ohne einen politischen Konsens und eine gesellschaftliche Akzeptanz in Deutschland und auf europäischer Ebene nicht gelingen kann. Aus einer zusammenfassenden Bewertung der vielfältigen Herausforderungen über diese drei Dimensionen der Transformation ergeben sich fünf konkrete Hemmnisse bzw. Akzeptanzanforderungen, die zum jetzigen Zeitpunkt als Ausschlusskriterien für die faktische Umsetzung einer klimaneutralen Zementregion mit Blick auf den anvisierten Zeithorizont von 2030 bis 2045 angesehen werden müssen (Abbildung 26).



Abbildung 26: Hemmnisse und Akzeptanzanforderungen für eine faktische Umsetzung

Funktionsnachweis für nachrüstbare CO₂-Abscheidung im Klinkerbrennprozess

Aufgrund der heterogenen technischen und ökonomischen Ausgangssituation bei den Unternehmen sind für den Umstieg auf eine CO₂-neutrale Anlagentechnologie jeweils unternehmensindividuelle Lösungen zu finden. Dabei kommen neben hohen Investitionen auch erhebliche technische Risiken auf jedes einzelne Unternehmen zu, da es zum heutigen Zeitpunkt noch keine verfügbaren Lösungen mit nachgewiesener Machbarkeit im industriellen Maßstab gibt.

In der Zementregion Erwitte/Geseke soll 2029 mit „GeZero“ das erste deutsche Zementwerk ohne CO₂-Emissionen in Betrieb genommen werden. Die Investitionsentscheidung von Heidelberg Materials zum Neubau einer Oxyfuel-Drehofenanlage ist gefallen, noch bevor ein Funktionsnachweis aus dem Oxyfuel-Pilotprojekt "catch4climate" in Mergelstetten vorliegt, an dem beide multinationalen Projektpartner mit Produktionsstandorten in Geseke beteiligt sind [27]. Heidelberg

Materials geht hier somit erkennbar ins Risiko, was mit einer Förderung in Höhe von 191 Mio. € aus dem EU-Innovationsfond auch honoriert wird. Trotz vielfältiger Erfahrungen mit Teststellungen im internationalen Konzernverbund müssen in diesem Projekt vor Ort in Geseke erstmals bisher branchenfremde Technologien integriert und für einen unterbrechungsfreien Dauerbetrieb hochgefahren werden.

Das Projekt „GeZero“ mit dem Neubau einer Oxyfuel-Drehofenanlage kann überdies nicht als generelle „Blaupause“ für die Transformation der Zementregion dienen, da ein kompletter Neubau nicht für alle Unternehmen in Frage kommt. Es fehlt der Nachweis für eine kosten- und energieeffiziente Nachrüstbarkeit der Bestandsanlagen in der Region mit einer CO₂-Abscheidung. Bei der Nachrüstung von Bestandsanlagen mit einer integrierten CO₂-Abscheidetechnologie ist zudem ein stufenweises Hochfahren und ein unterbrechungsfreier Betrieb nicht bzw. nur eingeschränkt realisierbar. Insbesondere für Mittelständler, die nur einen Drehofen betreiben, stellt der Umstieg auf eine CO₂-neutrale Anlagentechnologie daher eine besonders große Hürde dar („one shot only“). Ohne einen vorliegenden Funktionsnachweis für die Nachrüstbarkeit und Skalierbarkeit einer bezahlbaren technischen Lösung würde man sich einem nicht tragbaren unternehmerischen Risiko aussetzen.

Zugang zu klimaneutralem Strom bzw. Wasserstoff

Für die künftige CO₂-Abscheidung in der Zementregion Erwitte/Geseke werden große zusätzliche Mengen an bezahlbarer, klimaneutral erzeugter und grundlastfähiger Elektrizität benötigt. Dem zusätzlichen Bedarf kann punktuell durch den regionalen Ausbau der Grünstromerzeugung aus Wind und Sonne und in engen Grenzen durch eine lastabhängige Kalibrierung der CO₂-Abscheidung im Sinne netzdienlichen Grünstromverbrauchs begegnet werden. Wie nachgewiesen wurde, gibt es in der Region Erwitte/Geseke keine Möglichkeiten grundlastfähige Elektrizität aus Bioenergie und Erdwärme in der erforderlichen Größenordnung zu erzeugen. Es bleibt damit nur die Möglichkeit zur Speicherung von Überschussstrom aus Wind und Sonne durch Wasserstoff-Elektrolyse und dessen erneute Nutzbarmachung durch Wasserstoff-Kraftwerke. Die Schaffung von eigenen Speicherkapazitäten für Grünstrom würde die Zementregion und die Geschäftsmodelle der Unternehmen allerdings überfordern. Eine klimaneutrale Zementproduktion in der Region Erwitte/Geseke ist daher erst mit einem massiven Netzausbau und einem bidirektionalen Zugang zu einer leistungsfähigen Wasserstoff-Infrastruktur realisierbar.

Zugang zu Prozesskette für Pipelinetransport und Speicherung von CO₂

Eine Speicherung des in der Zementregion abgeschiedenen CO₂ in der tiefen Nordsee vor Skandinavien wäre mit hohen Kosten verbunden. Zum Schutz ihrer hohen Investitionen für die Erschließung der Hochsee-Speicher und den Aufbau einer geschlossenen Prozesskette dorthin werden die beteiligten Unternehmen zudem ein berechtigtes Interesse an langfristigen Abnahmeverpflichtungen haben. Wie bei anderen Infrastrukturen gilt es auch hier seitens der Politik zu gewähren, dass der Netzzugang geregelt wird und damit in für alle Beteiligten fairer Weise erfolgen kann. Im Hinblick auf den Pipelinetransport und die Speicherung des abgeschiedenen CO₂ fehlt bislang ein nationaler „CCS-Masterplan“, der zu bezahlbaren Angeboten an die Zementregion Erwitte/Geseke führen würde. Von der angekündigten Carbon-Management-Strategie der Bundesregierung werden konkrete Antworten auf die Fragen erwartet, ob eine CO₂-Speicherung in Deutschland zukünftig ermöglicht wird und wie ein Ordnungsrahmen und ein staatliches Engagement beim Aufbau einer wettbewerbskonformen CCS-Infrastruktur zur Erreichung der Klimaschutzziele aussehen könnte. Ohne eine solche Perspektive ist eine grundlegende Investitionsbedingung für die faktische Umsetzung einer klimaneutralen Zementregion Erwitte/Geseke nicht gegeben.

Gesellschaftliche Akzeptanz für CCS in Deutschland

Transport und Speicherung von CO₂ sind in Deutschland seit 2012 faktisch nicht möglich, d.h. es dürfte aktuell auch nicht exportiert werden. Damals wollten vor allem Braunkohlekraftwerke CCS nutzen, um Emissionen einzusparen. Kritiker wähten darin eine lebensverlängernde Maßnahme für fossile Industrien. Am Ende schränkte das Kohlendioxid-Speicherungsgesetz (KSpG) die Nutzung stark ein und erlaubte den Ländern ein faktisches Verbot. Ausgehend von dieser gesellschaftlichen Totalablehnung ist seit einigen Jahren eine Versachlichung der Debatte zu beobachten und auch ein Wendepunkt hin zu einer akzeptierten CO₂-Wirtschaft erkennbar. Allerdings ist CCS in der öffentlichen Wahrnehmung nach wie vor vornehmlich mit Infrastrukturbedarf und Zumutungen verbunden. Ein CCS-Narrativ für die Zementproduktion, wonach eine Rückführung des vornehmlich aus der Geologie stammenden Kohlenstoffs in dieselbe gut für den Klimaschutz ist, muß erst noch einen Weg ins öffentliche Bewusstsein finden. Es gibt auch noch keinen breiten gesellschaftlichen Diskurs darüber, dass die Geologie unter Deutschland einen wichtigen Beitrag zum Gelingen der Energiewende und zur Erreichung von Klimaneutralität leisten kann und dieses auch verantwortlich ist. Auf dem Weg dahin müssen neben der CO₂-Speicherung auch die tiefe Geothermie und die Kavernenspeicherung von Wasserstoff ausgebaut werden. Die gesellschaftliche Akzeptanz für CCS in Deutschland wird daher absehbar erst mit einer zunehmenden öffentlichen Aufklärung über die Umsetzbarkeit der Energiewende und die Erreichbarkeit von Klimaneutralität wachsen.

Adaptierbarkeit des Geschäftsmodells auf CO₂-neutrale Zementproduktion

Es ist erkennbarer politischer Wille, mit der Reform des EU-ETS die CO₂-Reduktionskosten in den Zertifikatspreisen abzubilden, damit die Unternehmen in die Dekarbonisierung ihrer Produktion investieren. Dieser Veränderungsdruck führt jedoch nur dann zum erwünschten Ergebnis, wenn die Transformation im vorgegebenen Rahmen auch zeitlich umsetzbar und bezahlbar ist und es dabei nicht zu ungleichen Wettbewerbsbedingungen kommt. Vor dem Hintergrund der noch bestehenden Herausforderungen und Unsicherheiten kann für die Zementregion Erwitte/Geseke allerdings noch kein Nachweis für die zeitliche Umsetzbarkeit und Bezahlbarkeit der geplanten Verschärfung des EU-ETS erbracht werden. Es kann zum jetzigen Zeitpunkt insbesondere nicht ausgeschlossen werden, dass es im Zeitraum nach 2030 durch die fortschreitende Entnahme von CO₂-Zertifikaten aus dem EU-ETS zu etwaigen Härten oder gar einem Verlust von industrieller Wertschöpfung in der Zementregion kommt. Auch im Hinblick auf die Gewährleistung eines „Level Playing Field“ durch das noch zu schaffende Grenzausgleichssystem CBAM sind heute noch Zweifel gerechtfertigt.

Für die zeitliche Umsetzbarkeit und ökonomische Tragfähigkeit des Geschäftsmodells einer klimaneutralen Zementproduktion bedarf es noch zusätzlicher Transparenz darüber, inwieweit die oben aufgeführten Herausforderungen mit Blick auf die erforderlichen Infrastrukturen im vorgegebenen Zeitfenster zu bewältigen sind und sich die politischen und gesellschaftlichen Rahmenbedingungen konform zum eingeschlagenen Weg entwickeln werden.

6.

Transformation zur klimaneutralen Zementregion

6. Transformation zur klimaneutralen Zementregion

Die Entwicklung einer CO₂-neutralen Zementproduktion in der Region/Erwitte ist eine technisch-ökonomische Herkulesaufgabe verbunden mit einem langen Realisierungszeitraum. Es ist zudem deutlich geworden, dass zum aktuellen Zeitpunkt noch signifikante Hürden und offene Punkte vorliegen, die für eine faktische Umsetzbarkeit vorab aufgelöst bzw. transparent gemacht werden müssen. Für den Aufbau der Klimaneutralen Zementregion Erwitte/Geseke bedarf es daher eines weiteren Vorbereitungsschrittes in Form einer sich anschließenden, umfassenden Machbarkeitsstudie.

Inhaltliche Eingrenzung einer umfassenden Machbarkeitsanalyse

Ausgangspunkt für eine umfassende Machbarkeitsanalyse ist der im Rahmen dieser Studie ermittelte Transaktionsumfang mit den dafür identifizierten Hemmnissen und Akzeptanzanforderungen. Im Hinblick auf den erforderlichen Umbau auf eine CO₂-neutrale Anlagentechnologie ist deutlich geworden, dass die Unternehmen hierzu aus heterogenen Ausgangslagen agieren müssen und auch untereinander zu Recht im Wettbewerb um den besten Weg stehen. Lösungsansätze für die werksseitige Nachrüstbarkeit von CO₂-Abscheidungsverfahren wurden in dieser vorliegenden Studie aufgezeigt.

Eine sich anschließende umfängliche Machbarkeitsstudie wird sich daher auf den regionalpartnerschaftlichen Kooperationsumfang konzentrieren, mit Fokus auf die Schaffung der erforderlichen Infrastrukturen in den Bereichen erneuerbare Energieversorgung, CO₂-Speicherung und -Pipeline-transport sowie deren flankierende Synchronisation mit Blick auf den politischen und gesellschaftlichen Konsens.

Mit der inhaltlichen Ausgestaltung der umfassenden Machbarkeitsanalyse ist auch der angestrebten Signalwirkung als Modellregion für klimaneutrale Zementproduktion Rechnung zu tragen. Diese kennzeichnet sich sowohl durch die Relevanz der Aufgabenstellung für die Klimaschutzziele und Stärkung des Industriestandortes NRW als auch durch die mögliche Multiplizierbarkeit der potenziellen Ergebnisse über die Modellregion hinaus. Mit dem Projekt «GeZero» des Konsortialpartners Heidelberg Materials verfügt die Modellregion Erwitte/Geseke bereits über einen Programmbaustein mit einer hohen öffentlichen Sichtbarkeit und einem ausgeprägten Modellcharakter. Im Mittelpunkt der weiteren Analyse steht daher insbesondere die Einbettung dieses und möglicher weiterer Vorhaben in eine regionale Infrastruktur, durch die eine künftige Generation von Zementanlagen mit CO₂-Abscheidung überhaupt CO₂-neutral betrieben werden kann.

Programm für eine umfassende Machbarkeitsanalyse

Im Folgenden wird ein 7-Punkte-Programm für eine zweite Projektphase im Sinne einer umfassenden Machbarkeitsanalyse abgeleitet, die der inhaltlichen Konkretisierung der regionalpartnerschaftlichen Kooperation und dem weiteren Aufbau einer Modellregion für Klimaneutrale Zementproduktion in Erwitte/Geseke dient (Abbildung 27):

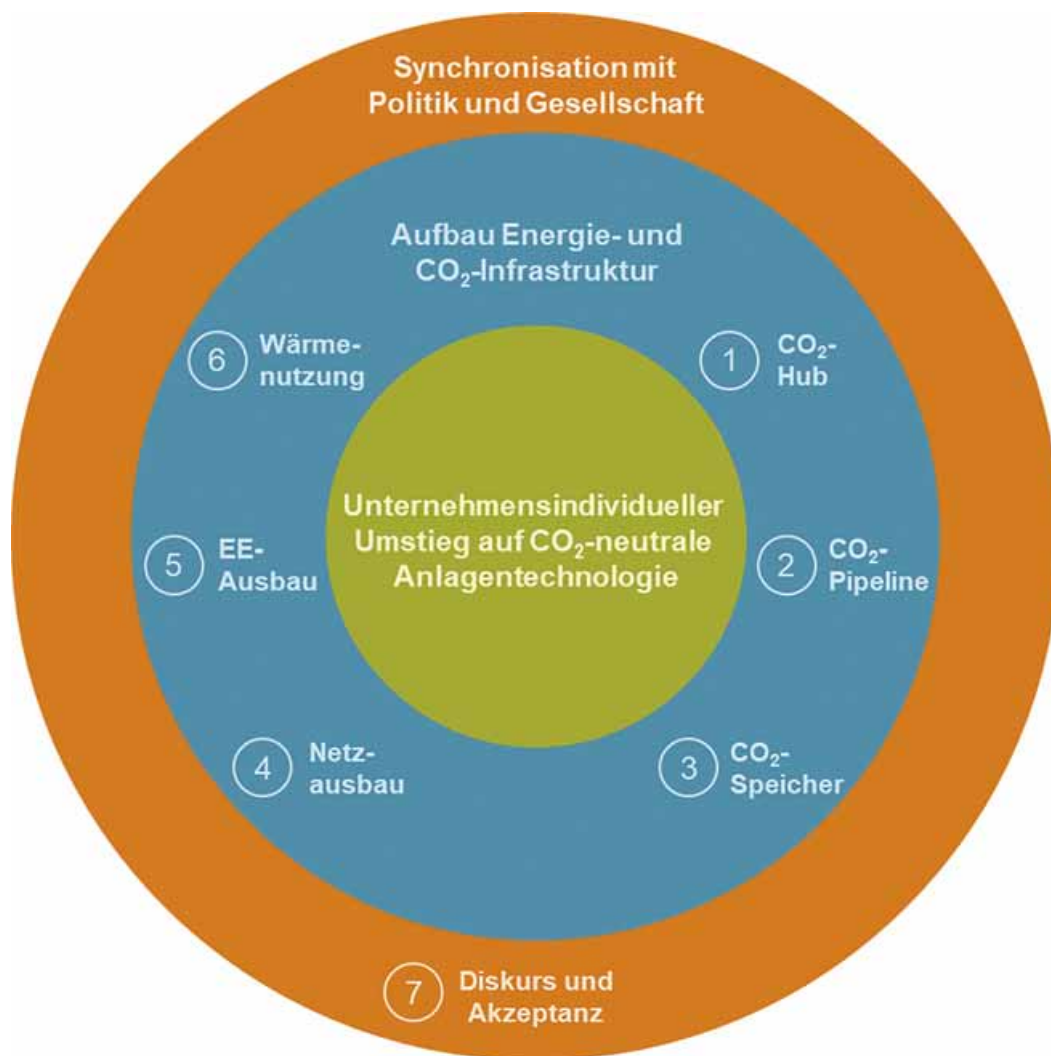


Abbildung 27: 7-Punkte-Programm für eine umfassende Machbarkeitsanalyse

- **CO₂-Hub:** Die Entwicklung eines oder mehrerer CO₂-Hubs ist eine Voraussetzung für den Betrieb einer regionalen CO₂-Infrastruktur. Dabei sind grundlegende technische Fragen zu klären hinsichtlich der Dimensionierung, der CO₂-Spezifikation und der Druck- und Temperaturbedingungen für die Annahme aus den Werken und die Abgabe in eine Pipeline. Ein weiterer Aspekt betrifft die Beherrschbarkeit von diskontinuierlichen Volumenströmen und die Konzeptionierung von Zwischenspeicherkapazitäten. Durch eine offene Gestaltung für weitere regionale CO₂-Emittenten könnten perspektivisch auch kleinere CO₂-Mengen mit unterschiedlichen Qualitäten angenommen und verarbeitet werden.
- **CO₂-Pipeline:** Die Anbindung der Zementregion Erwitte/Geseke an die geplante deutschlandweite CO₂-Pipeline ist Voraussetzung für den Transport des abgeschiedenen CO₂ zu einer geeigneten Lagerstätte. Vor diesem Hintergrund gilt es – anknüpfend an die Vorgespräche mit dem potenziellen Pipelinebetreiber – die geplante Pipelineführung und Bedarfsermittlung weiter zu konkretisieren und zu vertiefen. Hier ist es vor allem die Politik, die die Randbedingungen schaffen muss, dass sich ein tragfähiges Geschäftsmodell für den Bau und Betrieb einer CO₂-Pipeline in Deutschland entwickeln kann, das zudem eine langfristige Abnahmemöglichkeit für CO₂ aus der Zementregion gewährleistet – eine Voraussetzung, die im Übrigen auch in anderen Teilen Deutschlands in gleicher Weise zu erfüllen ist. Auf dieser Basis sind dann die künftigen Transportkosten in Abhängigkeit der Entfernung zu den möglichen CO₂-Speicherorten und unter Berücksichtigung von notwendigen Zwischenspeicherungen genauer zu ermitteln.

- **CO₂-Speicher:** Für die CO₂-Speicherung sind geeignete Lagerstätten sowie strategische Kooperationspartner für deren Betrieb erforderlich. Im Rahmen des Projektes sind diese Optionen herauszuarbeiten und der Kontakt mit potenziellen Partnern herzustellen bzw. innerhalb des Projektkonsortiums zu koordinieren. Speicherprojekte werden derzeit in der Tiefen Nordsee vor Skandinavien vorangetrieben. Die angekündigte bundesdeutsche Carbon Management Strategie wird diese Speicherstätten hervorheben und auf die bisherigen Regelungsdefizite vor allem beim Export von CO₂ eingehen. Es wird dabei auch um die Frage gehen, inwieweit die CO₂-Speicherung perspektivisch in Deutschland ermöglicht werden soll und ggf. weitere potenzielle Speicherstandorte in der deutschen Nordsee oder in der norddeutschen Tiefebene in den Blick genommen werden können. Auf dieser Basis sind dann die Kosten für die CO₂-Speicherung genauer zu ermitteln und die zur Verfügung stehenden Optionen gesamtheitlich zu bewerten.

- **Netzausbau:** Für die Entwicklung einer grundlastfähigen Versorgung der Zementregion Erwitte / Geseke mit klimaneutralem Strom ist der überregionale Netzausbau und der Zugang zu einer leistungsfähigen Wasserstoff-Infrastruktur unabdingbar. Insofern gilt es nach potenziellen Partnern und nach Anknüpfungspunkten für ein gegenseitiges wirtschaftliches Interesse zu suchen. Natürliche Gesprächspartner sind die deutschen Übertragungsnetzbetreiber und die relevanten regionalen Verteilnetzbetreiber und Energieversorgungsunternehmen. Als vorrangige Stoßrichtung wird die überregionale Nutzbarmachung von Überschußstrom aus PV- und Windkraftanlagen und dessen Speicherung in Form von grünem Wasserstoff verfolgt. Als ein erster konkreter Ansatzpunkt für die Analyse sind bereits die Windparks im Paderborner Land identifiziert worden, deren Überschußstrom heute ohne Speichermöglichkeiten ungenutzt bleibt und die sich zudem im Geltungsbereich eines anderen Übertragungsnetzbetreibers befinden. Es ist zu ermitteln, inwieweit die Anforderungen der Zementregion im Rahmen des laufenden Netzausbaus berücksichtigt werden können. Falls weitergehende Maßnahmen erforderlich werden, ist die Frage zu beantworten, ob dafür ein kooperatives Geschäftsmodell entwickelt werden kann. Abschließend wird gesamtheitlich zu bewerten sein, ob der Netzausbau konform zur zeitlichen Perspektive für die Entwicklung einer klimaneutralen Zementregion bewerkstelligt werden kann.

- **EE-Ausbau:** Der notwendige Netzausbau mit Zugang zu einer Wasserstoff-Infrastruktur kann in einer Modellregion durch die eigene Erzeugung von Erneuerbarer Energie aus Wind und Sonne auf den Abgrabungs- und Erwartungsflächen der Zementwerke flankiert werden. Mit diesem Programmbaustein wird die diesbezügliche Initiative der drei Erwitter Unternehmen in die umfassende Machbarkeitsanalyse zum Aufbau einer Modellregion eingebettet. Aktueller Arbeitsschwerpunkt ist die Absicherung der Genehmigungsfähigkeit in Einklang mit der absehbaren Änderung des Regionalplans, einem neuen Flugsicherungsmeldepunkt für den Regionalflughafen Paderborn/Lippstadt („KILO“) und dem angrenzenden Vogelschutzgebiet („Hellwegbörde“). In einer umfassenden Betrachtung ist die mögliche Einspeisung von Überschußstrom aus der Zementregion in eine Wasserstoffinfrastruktur zusätzlich in den Blick zu nehmen und somit eine Brücke zum bidirektionalen Netzausbau zu schlagen. In diesem Zusammenhang wird auch die Frage zu beantworten sein, inwieweit die anfängliche Initiative mit Unterstützung eines Planungsbüros in eine strategische Partnerschaft und ein kooperatives Geschäftsmodell mit einem regionalen Verteilnetzbetreiber weiterentwickelt werden kann. Dabei ist auch die Entwicklung eines Finanzierungsmodells mit Bürgerbeteiligung in Betracht zu ziehen und zu prüfen.

■ **Wärmenutzung:** Dieser Programmbaustein befasst sich mit dem möglichen Ausbau der Abwärmenutzung aus den Klinkerbrennprozessen der Zementwerke im Rahmen der kommunalen Wärmeplanung und wird zur Abrundung des Gesamtbildes zur Klimaneutralität einer künftigen Modellregion hinzugefügt. Bei der Machbarkeitsanalyse eines wärmebasierten Integrationsansatzes für die CO₂-Abscheidung wurde das Abwärmepotenzial aus der Zementherstellung in der Region Erwitte/Geseke abgeschätzt. Dabei wurden auch mögliche Lösungsansätze identifiziert, wie heute nicht nutzbare Abwärme auf niedrigen Temperaturniveaus künftig nutzbar gemacht werden könnte. Im Rahmen der umfassenden Machbarkeitsanalyse ist zu ermitteln, inwieweit ein Ausbau der integrierten Gewinnung und regionalen Nutzung von Abwärme aus den Zementwerken zu einer technischen Innovation im öffentlichen Interesse und Nutzen für den Klimaschutz führt, die eine Berücksichtigung im Rahmen der künftigen Modellregion rechtfertigen würde.

■ **Diskurs und Akzeptanz:** Beim Aufbau einer klimaneutralen Zementregion geht es nicht nur um technische und ökonomische Fragen. Auch ein grundsätzlicher politischer Konsens und die gesellschaftliche Akzeptanz sind für das Gelingen dieser Transformation unumgänglich. Insofern wird diese Fortsetzung des Projektes auch einen Schwerpunkt auf den Dialog mit allen relevanten Stakeholdern legen und sich in den öffentlichen Diskurs zum Thema CCS einbringen. Gegenüber der Politik gilt es insbesondere die Kosten und Bezahlbarkeit von CCS am konkreten Beispiel der Zementregion zu verdeutlichen und die Auswirkungen der weiteren Entwicklung der gesetzlichen Rahmenbedingungen z.B. im Bereich des Europäischen Emissionshandels oder des Kohlendioxid-Speicherungsgesetzes diesbezüglich aufzuzeigen. Für den gesellschaftlichen Diskurs geht es insbesondere darum, die Alternativlosigkeit von CCS zur Dekarbonisierung der Zementproduktion, aber auch den konkreten Nutzen für den Klimaschutz transparent zu machen. Darüber hinaus ist mit der gebotenen Sensibilität und Ausgewogenheit die Frage der Verantwortbarkeit von CCS in Deutschland zu thematisieren. Dabei soll auch ausgelotet werden, mit welchen Methoden z.B. der Akzeptanzforschung ein gutes Miteinander aller Beteiligten erreicht und mit welchen Partnern dafür zusammengearbeitet werden kann.

Die inhaltliche Auseinandersetzung mit dem 7-Punkte-Programm in der sich anschließenden Projektphase wird dazu beitragen, einen geeigneten Transformationspfad zur klimaneutralen Zementregion zu identifizieren. Insbesondere werden die beteiligten Unternehmen dabei weitere Klarheit darüber bekommen, inwieweit der Umstieg ihres heutigen Geschäftsmodells auf eine klimaneutrale Zementproduktion gelingen kann und auch zeitlich umsetzbar ist.

Literaturverzeichnis

- [1] Ministerium für Wirtschaft, Innovation, Digitalisierung und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen: Carbon Management Strategie Nordrhein-Westfalen. Düsseldorf, 2021.
- [2] Ministerium für Wirtschaft, Innovation, Digitalisierung und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen: Wasserstoff Roadmap Nordrhein-Westfalen. Düsseldorf, 2020.
- [3] Deutsche Emissionshandelsstelle (DEHSt) im Umweltbundesamt: Liste der emissionshandelspflichtigen Anlagen in Deutschland, Stand 02.05.2022. Aggregierte Emissionsdaten der 5 Werke im Durchschnitt der Jahre 2019-2021.
- [4] Verein Deutscher Zementwerke e.V., Hrsg.: Umweltdaten der deutschen Zementindustrie 2022; Düsseldorf, 2023.
- [5] Deutsche Emissionshandelsstelle (DEHSt) im Umweltbundesamt: Treibhausgasemissionen 2022 - Emissionshandelspflichtige stationäre Anlagen und Luftverkehr in Deutschland (VET-Bericht 2022).
- [6] Verein Deutscher Zementwerke e.V., Hrsg.: Dekarbonisierung von Zement und Beton – Minderungspfade und Handlungsstrategien, Düsseldorf, 2020.
- [7] Fleiger K., Hoenig V.: Technologien zur CO₂-Abscheidung beim Klinkerbrennprozess, VDZ-Jahrestagung, Düsseldorf 2022.
- [8] European Cement Research Academy, Ed. The ECRA Technology Papers 2022 - State of the Art Cement Manufacturing - Current Technologies and their Future Development. Duesseldorf, 2022. Available at: <https://ecra-online.org/research/technology-papers/>
- [9] CLEANKER – Clean Clinker by Calcium Looping Process for Low-CO₂ Cement Production. Available at: <https://www.cleanker.eu/>
- [10] Brevik, Per: Update on CC-Technology - Norcem Brevik CCS Project. Presentation ECRA Online-Seminar OS21-03, 10 June 2021.
- [11] Cremona R., De Lena E., Magli F., Romano M.C., Gatti M., Hammerich J., Lindemann Lino M., Pellegrino G., Spinelli M.: Retrofitting partial oxyfuel and Integrated Ca-Looping technologies to an existing cement plant: a case study. 16th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies, GHGT-16, Lyon 2022.
- [12] De Lena E., Magli F., Romano M.C., Gatti M., Lindemann Lino M., Hoenig V., Spinelli M.: Comparative analysis of the Oxyfuel and Calcium looping processes for low-carbon cement production. 15th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies, GHGT-15, Abu Dhabi 2021.
- [13] Klotsche P., MAN Energy Solutions: Elements for CO₂ logistics and compression. Presentation 2nd ECRA Online Conference „CO₂ Infrastructures“, 19-20 January 2023.
- [14] Kabel ZERO - Eine Tiefen-Geothermie-Anlage zur klimaneutralen Papiertrocknung. Verfügbar unter: https://www.kabelpaper.de/fileadmin/user_upload/kabel-zero/Forschungsprojekt_-_Geothermale_Papiertrocknung.pdf
- [15] Gausemeier, Jürgen (Hrsg.) Die Szenario-Technik - Werkzeug für den Umgang mit einer multiplen Zukunft. Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Universität Paderborn, 1995.
- [16] Wissenschaftsplattform Klimaschutz: Klimaneutralität nur möglich mit langfristiger CO₂-Speicherung – Empfehlungen zu CCS und negativen Emissionen. Verfügbar unter: <https://www.wissenschaftsplattform-klimaschutz.de/de/Klimaneutralitaet-nur-moeglich-mit-langfristiger-CO2-Speicherung.html>

- [17] CARBON2BUSINESS - EU-Fördergelder für Zementwende. Verfügbar unter: <https://perspektiven.holcim.de/innovation/carbon2business-eu-foerdergelder-fuer-zementwende/>
- [18] Capture2Use – Neues Verfahren zur CO₂-Abscheidung in der Zementproduktion. Verfügbar unter: <https://www.klimaschutz-industrie.de/foerderung/dekarbonisierung-in-der-industrie/projekt/capture2use/>
- [19] CCU/S Zementwerk Rohrdorf - Erste Anlage zur CO₂-Rückgewinnung in der Zementindustrie in Betrieb gegangen. Verfügbar unter: <https://www.rohrdorfer.eu/>
- [20] Netzentwicklungsplan Strom 2037 mit Ausblick 2045, Version 2023. Zweiter Entwurf der Übertragungsnetzbetreiber. Stand 12. Juni 2023 (in der aktualisierten Fassung vom 27. Juli 2023).
- [21] Northern Lights - CO₂ transport and storage. Available at: <https://ccsnorway.com/transport-storage-northern-lights/>
- [22] Project Greensand - enabling Denmark to use CO₂ storage as part of the solution to the climate challenges. Available at: <https://www.projectgreensand.com/en/hvad-er-project-greensand>
- [23] 2nd ECRA Conference on CO₂-Infrastructures, 19-20 January 2023. Available at: <https://ecra-online.org/research/conferences/conference-2023/>
- [24] Erfurth J., Open Grid Europe: Development of Pipeline Infrastructures for CO₂ Transport in Germany. Presentation 2nd ECRA Conference on CO₂-Infrastructures, 19-20 January 2023.
- [25] Reinhold, K., Müller, C. & Riesenberger, C. (2011): Informationssystem Speichergesteine für den Standort Deutschland – Abschlussbericht. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Berlin/Hannover 2011
- [26] Schulz, R., Suchi, E., Öhlschläger, D., Dittmann, J., Knopf, S. & Müller, C.: Geothermie-Atlas zur Darstellung möglicher Nutzungskonkurrenzen zwischen CCS und Tiefer Geothermie. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover 2013. Verfügbar unter: https://www.geotis.de/homepage/publication?loc=de#final_reports
- [27] Projekt „catch4climate“: Bau und Betrieb einer Demonstrationsanlage im halbindustriellen Maßstab zur CO₂ Abscheidung mit dem Oxyfuel-Verfahren. Verfügbar unter: <https://catch4climate.com/#projekt>

Abbildungsverzeichnisverzeichnis

- Abbildung 1: Konsortium und Ziele des Initiierungsprojektes
- Abbildung 2: Zementindustrie in der Region Erwitte/Geseke
- Abbildung 3: Produktionskennzahlen und CO₂-Footprint der Zementregion Erwitte/Geseke
- Abbildung 4: CO₂-Minderung der deutschen Zementindustrie im klimaneutralen Szenario bis 2050
- Abbildung 5: Verschärfung der Klimaschutzziele bis 2030 durch „Fit for 55“
- Abbildung 6: Evaluierung von CO₂-Abscheidetechnologien beim Klinkerbrennprozess
- Abbildung 7: Lösungsraum und Eingrenzung von CO₂-Abscheidetechnologien
- Abbildung 8: Regionale Massenströme bei Anwendung von Oxyfuel-Technologie
- Abbildung 9: Oxyfuel-Kalzinator mit separatem und CO₂-reichem Abgasstrom
- Abbildung 10: Simulation zur Nachrüstung eines zusätzlichen Oxyfuel-Kalzinators
- Abbildung 12: Komplementäre physikalische CO₂-Separationsverfahren PSA und Cryocap
- Abbildung 13: Regionales Integrationskonzept auf Basis Oxyfuel-Technologie
- Abbildung 14: Regionale CO₂-Abscheidung durch Aminwäsche
- Abbildung 15: Integrierte Anlage zur CO₂-Verflüssigung und Dampfückgewinnung
- Abbildung 16: Tiefen-Geothermie-Anlage zur klimaneutralen Papiertrocknung
- Abbildung 17: Geologischen Gegebenheit in der Umgebung von Erwitte/Geseke
- Abbildung 18: Regionales Integrationskonzept mit Aminwäsche und Wärmerückgewinnung
- Abbildung 19: Entwicklung und Bewertung von multiplen Zielszenarien
- Abbildung 20: Zielszenario CCS
- Abbildung 21: Zielszenario CCU
- Abbildung 22: Zielszenario CCR
- Abbildung 23: Einordnung des zusätzlichen Grünstrombedarfs für CCU/CCR
- Abbildung 24: Überblick zum aktuellen Netzentwicklungsplan Strom für Deutschland
- Abbildung 25: Untersuchungswürdige Lagerstätten für eine überregionale CO₂-Speicherung
- Abbildung 26: Hemmnisse und Akzeptanzanforderungen für eine faktische Umsetzung
- Abbildung 27: 7-Punkte-Programm für eine umfassende Machbarkeitsanalyse

