

---

# Klimaschutzverträge für die Industrie- transformation

---

Analyse zur Zementbranche

---

**ANALYSE**

---

**Agora**  
Industrie



---

# Klimaschutzverträge für die Industrie- transformation

---

## IMPRESSUM

---

### ANALYSE

Klimaschutzverträge für die  
Industrietransformation:  
Analyse zur Zementbranche

### ERSTELLT VON

Agora Industrie  
Anna-Louisa-Karsch-Straße 2 | 10178 Berlin  
T +49 (0)30 700 14 35-000  
F +49 (0)30 700 14 35-129  
www.agora-industrie.de  
info@agora-industrie.de

### PROJEKTPARTNER

Ecologic Institute, gGmbH  
www.ecologic.eu  
berlin@ecologic.eu

FutureCamp Climate GmbH  
www.future-camp.de  
munich@future-camp.de

Wuppertal Institut gGmbH  
www.wupperinst.org  
info@wupperinst.org

Satz: grafikbuero.berlin | Melanie Wiener  
Korrektorat: Infotext GmbH  
Titelbild: leekris, iStock

**259/02-A-2022/DE**

Version: 1.0, April 2022

### PROJEKTLEITUNG

Philipp D. Hauser  
Philipp.Hauser@agora-energiewende.de

### AUTORINNEN UND AUTOREN

Philipp D. Hauser, Helen Burmeister, Nina  
Zetsche, Paul J. Münnich (alle Agora Industrie);  
Thomas Mühlpointner, Lea Klausmann  
(FutureCamp); Georg Holtz (Wuppertal Institut)



Unter diesem Scan-Code steht  
diese Publikation als PDF zum  
Download zur Verfügung.

### Bitte zitieren als:

*Agora Industrie, FutureCamp, Wuppertal Institut  
und Ecologic Institut (2022): Klimaschutzverträge  
für die Industrietransformation. Analyse zur  
Zementbranche.*

www.agora-energiewende.de

---

## DANKSAGUNG

Im Rahmen dieses Projekts zur Rolle von Klimaschutzverträgen für die Industrietransformation wurden im Dezember 2020 und März 2021 Workshops mit Beteiligten aus Wirtschaft, Wissenschaft, Ministerien und nachgeordneten Behörden durchgeführt, um grundlegende Konzepte und Annahmen für den Transformationspfad der Zementindustrie zu diskutieren. Im Rahmen der Diskussionen wurden Kosten für Investitionen und den Betrieb von CCUS-Anlagen in der Zementindustrie erörtert und die Anforderungen an Klimaschutzverträge zur Absicherung der nötigen Investitionen definiert.

Auf der Basis der Ergebnisse und Schlussfolgerungen wurde diese Analyse zur Zementbranche und der dazugehörige Transformationskostenrechner erstellt.

Mit dieser Publikation präsentieren wir die Resultate unserer Arbeit und danken nochmals herzlich allen Teilnehmerinnen und Teilnehmern für ihre Unterstützung, ihre fachliche Expertise und die konstruktiven Diskussionen.

Die Schlussfolgerungen und Ergebnisse dieser Veröffentlichung spiegeln dabei nicht notwendigerweise die Meinungen der einzelnen Teilnehmerinnen und Teilnehmer wider.

Die Verantwortung für die Ergebnisse liegt ausschließlich bei Agora Industrie und ihren Partnern Future Camp, Ecologic Institut und dem Wuppertal Institut.

Für die tatkräftige Mitarbeit bei der Erstellung dieser Publikation bedanken wir uns bei unseren Kolleginnen und Kollegen, insbesondere bei Frank Peter, Ada Rühling, Urs Karcher, Jahel Mielke, Fiona Seiler, Wido Witecka, Oliver Sartor und Utz Tillmann (alle Agora Energiewende), Andreas Kohn, Roland Geres, Dominik Glock (alle Future Camp), Alexander Scholz, Anna Leipprand, Stefan Lechtenböhrer (alle Wuppertal Institut) und Benjamin Görlach, Jan-Erik Thie und Karl Lehmann (alle Ecologic Institut).



---

# Vorwort

---

Liebe Leserinnen und Leser,

die Diskussion der Maßnahmen zur Erreichung der Klimaneutralität hat eine neue Qualität erreicht. Um dem Urteil des deutschen Bundesverfassungsgerichtes zur mangelnden Ambition und generationsübergreifenden Gerechtigkeit des Klimaschutzgesetzes von 2019 zu entsprechen, wurde das Gesetz überarbeitet und muss von der neuen Bundesregierung regulatorisch umgesetzt werden. Die verabschiedeten Ziele einer CO<sub>2</sub>-Minderung von 65 Prozent bis 2030 und der Klimaneutralität bis 2045 definieren damit auch den Transformationspfad für die Industrie.

Der Zementindustrie kommt bei der Erreichung der Klimaneutralität eine zentrale Rolle zu. Mit einem Anteil von knapp drei Prozent der deutschen Emissionen bietet sie ein strategisches Minderungspotenzial. Da Zementklinker ein unverzichtbarer Werkstoff für unsere Wirtschaft bleiben wird, der auch unter Ausschöpfung sämtlicher Minderungsstrategien mit unvermeidbaren Prozessemissionen einhergeht, muss seine Produktion durch CCUS, die Abscheidung und Speicherung oder langfristige Verwendung der unvermeidbaren CO<sub>2</sub>-Emissionen klimaneutral

ausgerichtet werden. Der Aufbau der dafür nötigen Anlagen und Infrastruktur erlaubt dabei nicht nur die klimafreundliche Produktion der Zementindustrie, sondern eröffnet Chancen, einen klimapositiven Beitrag für die Klimaneutralität des Landes insgesamt zu leisten.

Um diese Chancen zu nutzen, müssen zusätzliche Kosten für den Aufbau und Betrieb dieser Anlagen kurzfristig über Klimaschutzverträge abgesichert werden. Nur wenn die CO<sub>2</sub>-arme Produktion vor der Konkurrenz durch etablierte CO<sub>2</sub>-intensive Alternativen geschützt wird, kann sie sich als Standard für eine globale und klimaneutrale Wirtschaft durchsetzen.

In dieser Studie legt Agora Industrie die Resultate ihrer Arbeit zur Umsetzung von Klimaschutzverträgen als zentrales Instrument zur Transformation der Zementindustrie für die deutsche und europäische Klimapolitik vor.

Ich wünsche eine angenehme Lektüre!

Ihr Frank Peter  
*Direktor Industrie, Agora Energiewende*

## Ergebnisse auf einen Blick:

1

**Um Klimaneutralität bis 2045 zu erreichen, müssen erste Anlagen zur Zementproduktion noch vor 2030 mit der Carbon Capture Utilization and Storage (CCUS) Technologie ausgestattet werden.**

Zudem muss der Einsatz von Zement über Materialeffizienz und Substitution gemindert werden. So wird die Zementproduktion in Deutschland zukunftsfähig.

2

**Der Einsatz von CCUS in der Zementindustrie ist ein erster wichtiger Schritt zum Aufbau einer CCUS-Strategie und Infrastruktur.** In enger Zusammenarbeit mit europäischen Partnern müssen dafür der nationale und europäische Rechtsrahmen für die CO<sub>2</sub>-Speicherung aufgebaut werden.

3

**Klimaschutzverträge (Carbon Contracts for Difference) sind das geeignete Instrument, um die Mehrkosten einer klimafreundlichen Zementproduktion abzusichern.** Durch den Einsatz von nachhaltiger Biomasse und biogenen Reststoffen in der CCS-basierten Zementproduktion (BECCS) können darüber hinaus kostengünstige CO<sub>2</sub>-Senkeneffekte erzielt werden.

4

**Der Finanzierungsbedarf zur Transformation der Zementindustrie bis 2030 ist mit unter 300 Millionen Euro gering.** Klimaschutzverträge sind kurzfristig zentral, um Investitionen abzusichern, höhere Kosten können jedoch mithilfe einer EU-EHS-Reform, eines Grenzausgleichsmechanismus (CBAM) und dem Aufbau von grünen Leitmärkten für CO<sub>2</sub>-armen Zement kompensiert werden.



---

# Inhalt

---

<b>1</b>	<b>Infogramm und Glossar</b>	<b>9</b>
<b>2</b>	<b>Hintergrund und Ziel</b>	<b>17</b>
<b>3</b>	<b>Status und Transformation der Zementindustrie</b>	<b>19</b>
3.1	Ein Transformationspfad zur Klimaneutralität bis 2045	20
3.1.1	Strategien der Materialeffizienz, Substitution und ressourceneffizienten Kreislaufwirtschaft	20
3.1.2	Strategisches Potenzial des CCUS	22
3.2	Kurzbeschreibung der Klimaschutztechnologien: Oxyfuel- und E-LEILAC-Verfahren	23
3.3	Infrastruktur und innovative Verfahren für das CCUS	25
<b>4</b>	<b>Klimaschutzverträge zur Transformation der Zementindustrie</b>	<b>27</b>
4.1	Abschätzung der CO <sub>2</sub> -Minderungskosten	27
4.2	Abschätzung der Mehrkosten einer CO <sub>2</sub> -armen Produktion	28
4.3	Sensitivitätsbetrachtungen bezüglich fluktuierender Preise	33
4.3.1	Sensitivität des Strompreises	34
4.3.2	Sensitivität der Kosten für CO <sub>2</sub> -Transport und Speicherung	34
4.3.3	Variation Brennstoffmix	34
4.3.4	Einfluss der CO <sub>2</sub> -Senkenleistung auf die CO <sub>2</sub> -Minderungskosten	36
4.4	Dynamisierung von Klimaschutzverträgen für fluktuierende Mehrkosten	37
<b>5</b>	<b>Aspekte der Ausgestaltung und Optionen für Klimaschutzverträge</b>	<b>39</b>
5.1	Wechselwirkungen der Klimaschutzverträge mit dem EU-EHS	39
5.1.1	CCfD im Falle von äquivalenten kostenfreien Zuteilungen	43
5.1.2	Einführung eines CBAM und Wegfall der kostenfreien Zuteilungen	45
5.1.3	Überblick der Szenarien zur Umsetzung von Klimaschutzverträgen	46
5.2	Klimaschutzverträge zum Aufbau grüner Leitmärkte	47
5.3	Umgang mit CO <sub>2</sub> -Senken	51
5.4	Zusammenfassende Diskussion zur Dynamisierung von Klimaschutzverträgen	52
5.4.1	Dynamisierung und Abrechnung betrieblicher Mehrkosten	53
5.4.2	Dynamisierung und Anrechnung des CO <sub>2</sub> -Preises	53
5.4.3	Anrechnung von frei vermarkteten Mengen an CO <sub>2</sub> -armem Zement	54
5.4.4	Ankauf der CO <sub>2</sub> -Senkenleistung	54

---

---

<b>6</b>	<b>Szenarien zur Berechnung der Transformationskosten der Zementbranche</b>	<b>55</b>
6.1	Generelle Annahmen für die Projektion der Transformationskosten	56
6.2	Szenarien und Ergebnisse für die Transformationskosten beim Betrieb mit konventionellen Brennstoffen	56
6.3	Szenarien und Ergebnisse für eine Projektion der Transformationskosten unter Verwendung von Biomasse	59
6.4	Diskussion der Ergebnisse zur Projektion der Transformationskosten	62

---

<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick für eine Umsetzung von Klimaschutzverträgen</b>	<b>63</b>
7.1	Strategische Ziele	63
7.2	Relevanz der Rahmenbedingungen	64
7.3	Prinzipien für die rasche Umsetzung	66
7.4	Prinzipien für das Auswahlverfahren	67
7.5	Ein Appell für die zügige Umsetzung	68

---

<b>8</b>	<b>Annex I: Beschreibung des Transformationskostenrechners</b>	<b>69</b>
----------	--	-----------

---

<b>9</b>	<b>Annex II: Hinterlegte Annahmen zu Preisen und Berechnungsparametern</b>	<b>73</b>
----------	--	-----------

---

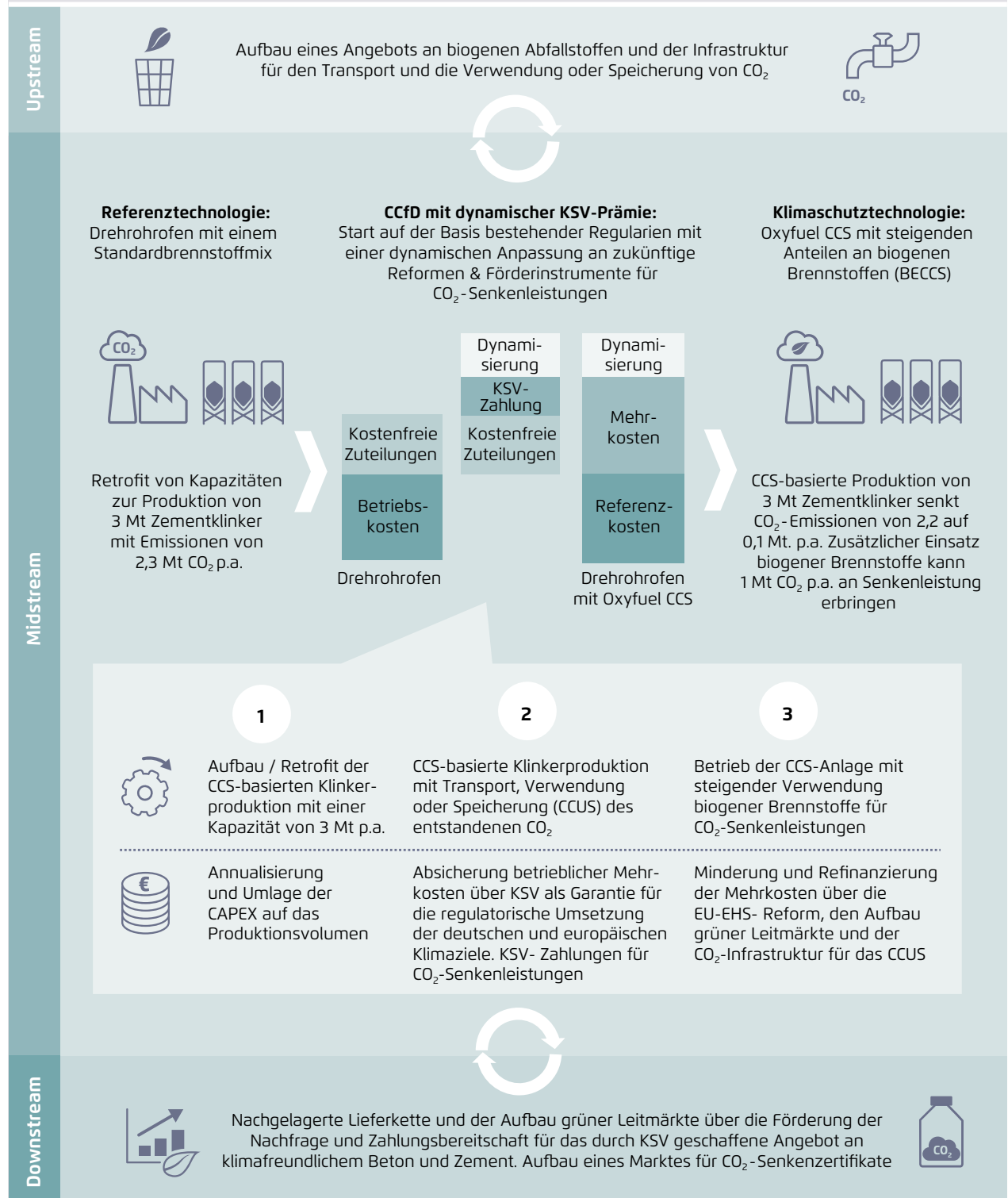
<b>10</b>	<b>Literatur</b>	<b>75</b>
-----------	------------------	-----------



# 1 Infogramm und Glossar

Infogramm zur Rolle von Klimaschutzverträgen für die Transformation der Zementproduktion

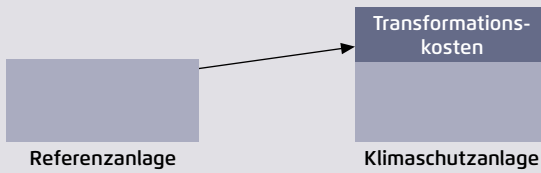
Abbildung 1



Glossar in Bildern und Gleichungen

Abbildung 2

Bei der Umstellung der Produktion von einer Referenz- auf die Klimaschutzanlage entstehen zusätzliche Kosten: **Transformationskosten**.



Bei der Umrechnung der Transformationskosten auf die Tonne Grundstoff ergeben sich die **Mehrkosten (€/t<sub>GS</sub>)**. Mehrkosten bei Investitionen [Δ CAPEX] müssen dafür annualisiert werden und zusammen mit den Mehrkosten beim Betrieb [Δ OPEX] für Energie, Rohstoffe und andere Betriebsmittel auf das Produktionsvolumen umgelegt werden.

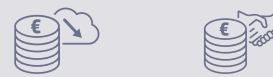
$$\text{Mehrkosten (€/t}_{GS}) = \Delta \text{CAPEX}^* / t_{GS} + \Delta \text{OPEX} / t_{GS}$$

\* Annualisierung erfolgt mit einem geeigneten Zinssatz über die Abschreibungszeit.

Die **CO<sub>2</sub>-Minderungskosten** sind der Quotient aus den Mehrkosten (€/t<sub>GS</sub>) und der CO<sub>2</sub>-Minderung, die sich aus der Umstellung der Produktion von Referenz- [x] auf Klimaschutztechnologie [y] ergeben.

$$\text{CO}_2\text{-Minderungskosten (€/t CO}_2) = \frac{\text{Mehrkosten (€/t}_{GS})}{\text{Minderung der CO}_2\text{-Emissionen [x-y] (t CO}_2\text{/t}_{GS})}$$

Die Projektion der durchschnittlichen CO<sub>2</sub>-Minderungskosten ergibt den **Vertragspreis**.



$$\text{CO}_2\text{-Minderungskosten (€/t CO}_2) = \text{Vertragspreis (€/t CO}_2)$$

Auf Basis dieses Vertragspreises wird zwischen öffentlicher Hand und dem Unternehmen ein **Klimaschutzvertrag** geschlossen.



Der Vertragspreis ist die Grundlage für die Berechnung einer dynamischen **Klimaschutzprämie**. Die Dynamisierung soll den Einfluss schwankender Mehrkosten ausgleichen.



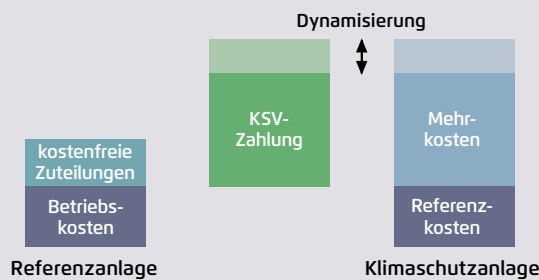
$$\text{Dynamisierung} = F(\text{Mehrkosten, Zeit})$$

Der Klimaschutzvertrag hat **mehrere Ausgestaltungsformen**:

Carbon Contract (CC) für den Fall, dass der CO<sub>2</sub>-Marktpreis keine oder nur eine geringe Rolle spielt:

$$\text{KSV-Zahlung (€)} = \text{dynamische KS-Prämie (€/t CO}_2) \times \text{verifizierte CO}_2\text{-Minderung (t CO}_2) \text{ p. a.}$$

$$\text{dynamische KS-Prämie (€/t CO}_2) = \frac{\text{dynamische Mehrkosten (€/t}_{GS})}{\text{spezifische CO}_2\text{-Minderung (t CO}_2 / \text{t}_{GS})}$$

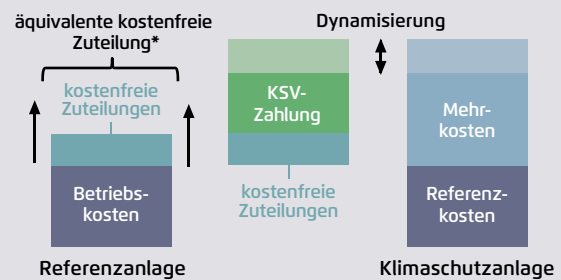


Carbon Contract for Difference (Ccfd) im Falle äquivalenter kostenfreier Zuteilungen\* für Referenz- & Klimaschutzanlage:

$$\text{KSV-Zahlung (€)} = \text{dynamische KS-Prämie (€/t CO}_2) \times \text{verifizierte CO}_2\text{-Minderung (t CO}_2) \text{ p. a.}$$

$$\text{dynamische KS-Prämie (€/t CO}_2) = \frac{\text{dynamische Mehrkosten (€/t}_{GS})}{\text{spezifische CO}_2\text{-Minderung (t CO}_2 / \text{t}_{GS})} - \text{kostenfreie Zuteilungen (€/t CO}_2)$$

\* Äquivalenz kostenfreier Zuteilungen ist auch bei Abschaffung gegeben.



Glossar in einer didaktischen Sequenz		Tabelle 1
Begriff	Erläuterung	
<b>Klimaschutzanlage/ -technologie/ -verfahren</b> (als Synonyme verwendet)	<p>Der Begriff Klimaschutzanlage bezeichnet eine neu errichtete Anlage zur industriellen Produktion von Grundstoffen, die durch die Verwendung einer <b>klimafreundlichen, klimaneutralen</b> oder potenziell <b>klimapositiven</b> Technologie mit dem Ziel der Klimaneutralität bis 2045 kompatibel ist. Im Vergleich zur <b>Referenzanlage</b> führt die Produktion zu einer <b>verifizierbaren CO<sub>2</sub>-Minderung</b>, ist aber wegen höherer Investitions- und Betriebskosten in der Regel teurer. Im Rahmen dieser Studie wird die Zementproduktion mit einer Oxyfuel-Anlage beziehungsweise einer E-LEILAC-Anlage in Kombination mit <b>CCUS</b> als Klimaschutztechnologie analysiert.</p>	
<b>Referenzanlage/ -technologie/ -verfahren</b> (als Synonyme verwendet)	<p>Der Begriff Referenzanlage bezeichnet eine konventionelle Anlage zur CO<sub>2</sub>-intensiven industriellen Produktion von Grundstoffen. Durch geringere Kosten im Vergleich zur <b>Klimaschutzanlage</b> definiert das Verfahren die <b>Referenzkosten</b> für die Grundstoffproduktion.</p>	
<b>Referenzkosten (€/t<sub>GS</sub>)</b>	<p>Referenzkosten beziffern die Kosten für die Produktion einer Tonne Grundstoff (€/t<sub>GS</sub>), welche in einer <b>Referenzanlage</b> entstehen. Referenzkosten werden durch schwankende Marktpreise für Betriebsstoffe und den <b>effektiven CO<sub>2</sub>-Preis</b> beeinflusst.</p>	
<b>Transformationskosten (€)</b>	<p>Transformationskosten beziffern die gesamten zusätzlichen Kosten bei Investition und Betrieb einer <b>Klimaschutzanlage</b> im Vergleich zu einer <b>Referenzanlage</b> mit äquivalentem Produktionsvolumen. Transformationskosten können nach zusätzlichen Kosten bei der Investition (Δ CAPEX) und beim Betrieb (Δ OPEX) ausgewiesen werden und für einzelne Jahre oder die gesamte Dauer eines <b>Klimaschutzvertrages</b> beziffert werden. Über die Transformationskosten lässt sich der Bedarf an zusätzlichen Investitionen und Betriebsbeihilfen für die Transformation einer Industrieanlage oder einer ganzen Branche abschätzen.</p>	

<p><b>Mehrkosten (€/t<sub>GS</sub>)</b></p> <p><b>betriebliche Mehrkosten (€/t<sub>GS</sub>)</b></p>	<p>Mehrkosten errechnen sich aus den annualisierten <b>Transformationskosten</b>, beziehen sich aber auf eine Tonne des produzierten Grundstoffes (€/t<sub>GS</sub>). Um zusätzliche Kosten bei der Investition (Δ CAPEX) auf die jährliche Produktion an Grundstoffen umzulegen, müssen sie mit einem geeigneten Zinssatz über ihre Abschreibungszeit annualisiert werden. Werden nur zusätzliche Kosten beim Betrieb (Δ OPEX) betrachtet und auf die Jahresproduktion umgelegt, ergeben sich <b>betriebliche Mehrkosten</b>. Diese beruhen auf höheren und schwankenden Kosten für Energieträger, Rohstoffe und andere Betriebsmittel. Aufgrund der Kostenschwankungen für <b>Klimaschutz-</b> und <b>Referenzanlage</b> variieren betriebliche Mehrkosten. Je nach Technologie und Regularien für die Vergabe von kostenfreien Zuteilungen kann der <b>CO<sub>2</sub>-Marktpreis</b> oder aber ein <b>effektiver CO<sub>2</sub>-Preis</b> auf Klimaschutz- und Referenzanlage wirken und so die Mehrkosten beeinflussen.</p>
<p><b>verifizierbare oder verifizierte CO<sub>2</sub>-Senke oder Senkenleistung</b></p>	<p>Durch die Verwendung nachhaltiger Biomasse in Verbindung mit CCS ergibt sich über <b>BECCS</b> eine CO<sub>2</sub>-Senkenleistung, die mit einer geeigneten Methode quantifiziert und verifiziert werden muss. Die Kriterien für Berechnung und Verifizierung der CO<sub>2</sub>-Senkenleistung werden im Rahmen des <b>Klimaschutzvertrages</b> festgelegt.</p>
<p><b>spezifische CO<sub>2</sub>-Minderung</b></p>	<p>Durch die Produktion einer Tonne eines Grundstoffes mit der <b>Klimaschutzanlage</b> ergibt sich im Vergleich zur <b>Referenzanlage</b> eine spezifische CO<sub>2</sub>-Minderung pro Tonne an finalem Produkt. Die Kriterien für Berechnung und Verifizierung der spezifischen CO<sub>2</sub>-Minderung werden im Rahmen des Klimaschutzvertrages festgelegt.</p>
<p><b>Klimaschutzvertrag</b></p>	<p>Ein Klimaschutzvertrag ist ein projektbezogener Vertrag zwischen einem Unternehmen und der öffentlichen Hand. Auf der Basis eines <b>Vertragspreises</b> garantiert der Staat dem Unternehmen die Zahlung einer <b>Klimaschutzprämie</b>, um die <b>Mehrkosten</b> der klimafreundlichen Produktion zu tragen, und sichert damit ihren wirtschaftlichen Betrieb. Der Klimaschutzvertrag kann in der Form eines <b>Carbon Contracts</b> oder als <b>Carbon Contract for Difference</b> ausgestaltet sein.</p>
<p><b>Carbon Contract</b></p>	<p>Der <i>Carbon Contract</i> ist ein <b>Klimaschutzvertrag</b>, bei dem der <b>CO<sub>2</sub>-Marktpreis</b> aufgrund der vorherrschenden Regularien im EU-EHS keine oder nur eine untergeordnete Rolle für die Definition der <b>Klimaschutzprämie</b> spielt. Bei einer Anpassung der Regularien kann ein <b>Carbon Contract</b> in einen <b>CCfD</b> überführt werden.</p>
<p><b>Carbon Contract for Difference (CCfD)</b></p>	<p>Der <i>Carbon Contract for Difference</i> (CCfD) ist ein <b>Klimaschutzvertrag</b>, bei dem der <b>CO<sub>2</sub>-Marktpreis</b> aufgrund der vorherrschenden Regularien direkt die <b>Mehrkosten</b> beeinflusst. Bei einem <i>CCfD</i> wird der <b>CO<sub>2</sub>-Marktpreis</b> vom <b>Vertragspreis</b> abgezogen, um eine variable <b>Klimaschutzprämie</b> zu errechnen. Beim <i>CCfD</i> wird für den Vertragspreis auch der Begriff Strike Price verwendet.</p>

<b>Vertragspreis (€/t CO<sub>2</sub>)</b>	Der <b>Vertragspreis</b> wird auf der Basis einer transparenten Berechnung der mittleren <b>CO<sub>2</sub>-Minderungskosten</b> definiert. Der Vertragspreis ist die Grundlage zur Berechnung der <b>Klimaschutzprämie</b> , deren Zahlung die <b>Mehrkosten</b> einer Produktion mit der Klimaschutztechnologie kompensieren soll. Über eine <b>Dynamisierung</b> der Klimaschutzprämie können Schwankungen der CO <sub>2</sub> -Minderungskosten abgebildet werden. Die Formel zur Dynamisierung der Klimaschutzprämie wird ebenfalls vertraglich definiert.
<b>Vertragslaufzeit</b>	Die Vertragslaufzeit definiert die gesamte Laufzeit eines <b>Klimaschutzvertrages</b> und wird in entsprechende <b>Abrechnungsperioden</b> aufgeteilt. Es kann gegebenenfalls Sinn machen, den Start der Abrechnungsperiode etwas zu flexibilisieren, um Verzögerungen bei der Erstellung und Inbetriebnahme einer <b>Klimaschutzanlage</b> abzubilden.
<b>Vertragsvolumen (t<sub>GS</sub>)</b>	Das Vertragsvolumen wird als maximales Produktionsvolumen an klimafreundlichem Grundstoff definiert, das durch den <b>Klimaschutzvertrag</b> abgesichert wird. In der Regel bezieht sich das Vertragsvolumen auf eine <b>Abrechnungsperiode</b> . Es kann aber auch auf die gesamte <b>Vertragslaufzeit</b> hochgerechnet werden.
<b>Abrechnungsvolumen (t<sub>GS</sub>)</b>	Das Abrechnungsvolumen an klimafreundlich produziertem Grundstoff wird am Ende einer <b>Abrechnungsperiode</b> festgestellt. Es entspricht dem effektiv klimafreundlich produzierten Grundstoff abzüglich einem eventuell als „grünes“ Produkt veräußerten Volumen. Das <b>Abrechnungsvolumen</b> darf das <b>Vertragsvolumen</b> nicht übersteigen.
<b>Abrechnungsperiode</b>	Die Abrechnungsperiode beträgt in der Regel ein Jahr, kann aber vertraglich auch abweichend festgelegt werden.
<b>Klimaschutzprämie (€/t CO<sub>2</sub>)</b>	Die Klimaschutzprämie kompensiert die <b>Mehrkosten</b> . Sie bezieht sich auf die damit erreichte <b>verifizierte CO<sub>2</sub>-Minderung</b> im Vergleich zur <b>Referenzanlage</b> und errechnet sich aus dem <b>Vertragspreis</b> unter der Anwendung von vertraglich definierten Formeln zur <b>Dynamisierung</b> und, im Falle eines <b>CCfDs</b> , unter Anrechnung des <b>CO<sub>2</sub>-Marktpreises</b> .
<b>Klimaschutzzahlung</b>	Durch die Multiplikation der für eine Abrechnungsperiode zu fördernder <b>verifizierter CO<sub>2</sub>-Minderung</b> mit der dynamisierten <b>Klimaschutzprämie</b> ergibt sich der für die Abrechnungsperiode auszahlende Förderbetrag – die Klimaschutzzahlung.
<b>Dynamisierung</b>	Über eine dynamische Anpassung der <b>Klimaschutzprämie</b> werden Effekte von variablen <b>Mehrkosten</b> , die durch Preisschwankungen der Betriebsmittel hervorgerufen werden, kompensiert. Über die <b>Dynamisierung</b> lässt sich auch die Wirkung eines <b>effektiven CO<sub>2</sub>-Preises</b> und einer Änderung der dafür verantwortlichen Regularien abbilden. Der <b>CCfD</b> ist ein Spezialfall der Dynamisierung, bei dem der <b>CO<sub>2</sub>-Marktpreis</b> direkt auf die <b>Klimaschutzprämie</b> angerechnet wird.

<b>Klimaumlage</b>	Die <i>Klimaumlage</i> bezeichnet ein System, bei dem die CO <sub>2</sub> -Kosten in Form einer <i>Klimaumlage</i> auf CO <sub>2</sub> -intensive Endprodukte erhoben werden. Je nach Ausgestaltung wird die <i>Klimaumlage</i> auf Zwischen- oder Endprodukte erhoben und mehr oder weniger pauschal berechnet.
<b>Carbon Capture and Storage (CCS)</b>	<i>Carbon Capture and Storage (CCS)</i> beinhaltet die Abscheidung, den Transport und die dauerhafte Speicherung der anfallenden CO <sub>2</sub> -Emissionen in geeigneten geologischen Lagerstätten.
<b>Carbon Capture and Utilization (CCU)</b>	<i>Carbon Capture and Utilisation (CCU)</i> umfasst die Abscheidung und Wiederverwendung von CO <sub>2</sub> in Produkten, in denen es langfristig gebunden bleibt.
<b>CCUS</b>	CCUS bezeichnet die Kombination von <b>CCS</b> und <b>CCU</b> auf der Basis ihrer konzeptionellen Ähnlichkeit.
<b>Bioenergy Carbon Capture and Storage (BECCS)</b>	Bioenergienutzung mit anschließender Abscheidung, Transport und Speicherung der dabei entstehenden CO <sub>2</sub> -Emissionen. Beim Anbau der dafür benötigten Biomasse wird der Atmosphäre CO <sub>2</sub> entzogen, welches über die energetische Nutzung in Kombination mit <b>CCS</b> geologisch gespeichert wird. Somit stellt <i>BECCS</i> eine klimapositive Strategie dar. Die Nutzung des biogenen CO <sub>2</sub> in langlebigen Produkten ist eine Alternative.
<b>CO<sub>2</sub>-armer Zement</b>	Zement, dessen CO <sub>2</sub> -Emissionen mithilfe von <b>Klimaschutztechnologien</b> wie Oxyfuel oder E-LEILAC abgeschieden und durch den Einsatz von <b>CCS</b> geologisch gespeichert werden. Bilanziell kann die Zementproduktion dadurch als CO <sub>2</sub> -arm bezeichnet werden.
<b>klimafreundlicher Zement</b>	Sowohl <b>CO<sub>2</sub>-armer</b> als auch <b>klimapositiver Zement</b> werden zusammenfassend als <i>klimafreundlicher Zement</i> bezeichnet.
<b>klimapositiver Zement</b>	Zement, der mithilfe von <b>klimapositiven</b> Technologien wie <b>BECCS</b> produziert wird und somit effektiv eine CO <sub>2</sub> -Senke schafft, solange die Menge des gespeicherten CO <sub>2</sub> die Menge des emittierten CO <sub>2</sub> überschreitet.
<b>Klinkerfaktor</b>	Als Klinkerfaktor wird der Anteil des Zementklinkers im Zement bezeichnet.
<b>grüne Leitmärkte</b>	Mit diesem Begriff werden Märkte beschrieben, die durch eine Kombination von politischem Handeln zum Erreichen der <b>Klimaneutralität</b> und der technischen und ökonomischen Entwicklung insgesamt ein hohes Wachstumspotenzial für innovative klimafreundliche Anlagen, Güter und Dienstleistungen bieten und sich langfristig als Standard etablieren können.
<b>Klimabonus</b>	Der Klimabonus bezeichnet den Mehrbetrag, der beim freien Verkauf eines klimafreundlichen Zementproduktes im Vergleich zu einem äquivalenten, konventionellen Zementprodukt erzielt wird. Da durch diesen Verkauf die Förderung durch den <b>Klimaschutzvertrag</b> entfällt, ist der Klimabonus in der Regel mindestens so hoch wie die vereinbarte <b>Klimaschutzprämie</b> .

<b>CBAM: Carbon Border Adjustment Mechanism</b>	Grenzausgleichsmechanismus, durch den Importe je nach ihrer spezifischen CO <sub>2</sub> -Intensität mit einer Abgabe in Höhe des CO <sub>2</sub> -Marktpreises belegt werden. Ein <i>CBAM</i> kann damit auch finanzielle Ressourcen für Klimaschutzinvestitionen generieren.
<b>Stranded Assets</b>	Frühzeitige Abschaltung noch nicht amortisierter oder noch funktionsfähiger konventioneller Produktionsanlagen, wenn deren Betrieb aus klimapolitischen Gründen nicht mehr rentabel oder vertretbar ist; Durch die frühzeitige Abschaltung entstehen sowohl unternehmerische als auch volkswirtschaftliche Kosten.
<b>klimaneutral</b>	Klimaneutral bedeutet, dass THG-Emissionen in allen Bereichen vollständig oder fast vollständig vermieden werden, sodass Restemissionen durch <b>klimapositive</b> Strategien und Technologien ausgeglichen werden können. Eine Industrieanlage ist dann mit dem Ziel der Klimaneutralität bis 2045 kompatibel, wenn sie (nahezu) klimaneutral betrieben werden kann oder sogar zu negativen Emissionen führt bzw. <b>klimapositiv</b> ist.
<b>klimapositiv</b>	Zur Erreichung von Klimaneutralität müssen verbleibende Restemissionen mit negativen Emissionen bzw. <b>klimapositiven</b> Strategien und Technologien kompensiert werden, bei denen CO <sub>2</sub> aus der Atmosphäre direkt oder indirekt entnommen und langfristig eingelagert wird.
<b>Wasserbetteffekt</b>	Innerhalb des EU-EHS bezeichnet der Wasserbetteffekt den Vorgang, in einem EU-Mitgliedsstaat nicht mehr benötigte Zertifikate anderen EU-Mitgliedsstaaten zur Verfügung zu stellen. Dies kann dazu führen, dass Gesamtemissionen nicht gesenkt, sondern lediglich zwischen Mitgliedsstaaten verschoben werden.

Agora Industrie, FutureCamp, Wuppertal Institut und Ecologic Institut (2022)





## 2 Hintergrund und Ziel

In Hinblick auf die strategische Rolle der Industrie für die Klimaneutralität unseres Landes haben Agora Energiewende und die Partner FutureCamp, Ecologic Institut und das Wuppertal Institut ein Projekt für die zügige Umsetzung von Klimaschutzverträgen als Anreiz und Absicherung von Klimaschutzinvestitionen in Deutschlands CO<sub>2</sub>-intensiver Industrie angestoßen. Hierbei sollen effiziente und umsetzbare Ausgestaltungsoptionen für Klimaschutzverträge erarbeitet werden, um damit kurzfristig Anreize und Planungssicherheit für die Transformation der Stahl-, Chemie- und Baustoffindustrie zu schaffen. In einem allgemeinen, auf das Instrument der Klimaschutzverträge fokussierten Papier werden generelle Ausgestaltungsmerkmale sowie branchenunabhängige Chancen und Risiken dargestellt (Agora Industrie, FutureCamp, Wuppertal Institut und Ecologic Institut 2022). Ergänzend sollen in dieser Hintergrundstudie spezifische Fragestellungen in Zusammenhang mit der Baustoffindustrie und dem Fokus auf Zement beleuchtet werden.

Bei steigender Bautätigkeit sind Strategien der Materialeffizienz und der Substitution zur Minderung der Nachfrage nach energie- und CO<sub>2</sub>-intensiven Baustoffen wie auch der Aufbau einer ressourceneffizienten Kreislaufwirtschaft zentrale Maßnahmen für die Minderung der Emissionen in der Bauwirtschaft. Im Interesse der ökonomischen und ökologischen Effizienz müssen diese Strategien bei der Definition von Politikinstrumenten im Mittelpunkt stehen. Trotz dieser Fokussierung auf Ressourceneffizienz ist zum jetzigen Zeitpunkt abzusehen, dass Zement und gebrannter Kalk auch weiterhin eine unverzichtbare Rolle als Grundstoffe spielen werden. Deshalb ist es für die Klimaneutralität unserer Wirtschaft zentral, auch Lösungen für die Minderung der in der Zement- und Kalkproduktion unvermeidbaren Prozessemissionen zu finden. Nach heutigem Stand der Technik kommen dafür das *Carbon Capture and Storage* (CCS) und das *Carbon*

*Capture and Utilization* (CCU) infrage. In beiden Fällen werden die CO<sub>2</sub>-Emissionen aus der Produktion zunächst abgeschieden und dann, im Falle des CCS, in geologischen Lagerstätten gespeichert oder, im Falle des CCU, in Produkten dauerhaft gebunden. Aufgrund der Verwandtschaft der Prozesse verwenden wir den Überbegriff CCUS.

Als Schlüsseltechnologien für den ersten Schritt der CO<sub>2</sub>-Abscheidung betrachten wir hier zwei Verfahren und ihre Anwendung für die Produktion von Zementklinker: Das Oxyfuel-Verfahren generiert einen reinen CO<sub>2</sub>-Strom durch die Reaktion der notwendigen Brennstoffe mit Sauerstoff und einer Kalzinierung unter Luftausschluss. Im Falle des E-LEILAC-Verfahrens werden Brennstoffe größtenteils durch die Elektrifizierung der Hochtemperaturwärme am Kalzinator ersetzt, was es ermöglicht, den reinen CO<sub>2</sub>-Strom aus dem Kalzinierungsprozess aufzufangen.

Im zweiten Schritt betrachten wir den Transport und die Einlagerung des aufgefangenen CO<sub>2</sub> in geologischen Lagerstätten.

Im Rahmen dieser Studie diskutieren wir diese Verfahren am Beispiel von Zement. Die Ergebnisse lassen sich aber auch auf konzeptionell ähnliche Anwendungen in der Kalkindustrie übertragen.<sup>1</sup>

Zudem können über die Modellierung des CCS auch Rückschlüsse auf die Umsetzung innovativer CCU-Verfahren gewonnen werden.

1 In der Kalkindustrie wird das LEILAC-Verfahren, aber auch das Calcium-Looping als Option für die Abscheidung von CO<sub>2</sub> aus dem Prozess diskutiert. Auch wenn diese Anwendungen hier nicht gesondert betrachtet werden, besteht eine konzeptionelle Äquivalenz zu den Verfahren in der Zementproduktion.

Aus technischer Perspektive sind Demonstrationsanlagen mit dem Oxyfuel- und E-LEILAC-Verfahren in Kombination mit CCUS schon umsetzbar und es existieren auch entsprechende Pilotanlagen und Projekte. Ziel muss es nun sein, erste kommerzielle Projekte aufzubauen, um diese Technologien möglichst noch vor 2030 für den großtechnischen Einsatz zu etablieren. Zudem müssen Erfahrungen mit dem Aufbau und Betrieb der Infrastruktur für den Transport und die Einlagerung und Verwendung von CO<sub>2</sub> gesammelt werden. Ein schneller Markthochlauf ist wichtig, um die technologische Entwicklung zu beschleunigen, die notwendige Infrastruktur aufzubauen und die regulatorischen Rahmenbedingungen zu entwickeln. Durch einen Aufbau erster Anlagen vor 2030 lassen sich somit Kosten reduzieren und der für die Klimaneutralität notwendige Einsatz nach 2030 strategisch vorbereiten. Dabei steht neben der Minderung von Prozessemissionen aus der Zementproduktion auch der Aufbau von klimapositiven Prozessen im Fokus. Mit diesem Ziel betrachten wir in dieser Studie den Betrieb einer Oxyfuel-Anlage mit Biomasse als Brennstoff. In Verbindung mit der geologischen Speicherung der dadurch entstehenden biogenen CO<sub>2</sub>-Emissionen ergibt sich das *Bioenergy with carbon capture and storage* (BECCS). Über diese Option lässt sich eine CO<sub>2</sub>-Senkenleistung erbringen, wie sie im Rahmen einer klimaneutralen Zukunft für die Kompensation von unvermeidbaren Emissionen aus anderen Aktivitäten nötig sein wird.<sup>2</sup>

Aus betriebswirtschaftlicher Perspektive sind die Investition und der Betrieb von Anlagen mit dem Oxyfuel- oder E-LEILAC-Verfahren in Verbindung mit dem CCUS im gegebenen regulatorischen und wettbewerblichen Rahmen noch nicht finanzierbar. Um dennoch anstehende Reinvestitionen für den Aufbau erster kommerzieller Anlagen für die CO<sub>2</sub>-arme Zementproduktion zu nutzen, müssen die

Investitionen und ihr Betrieb mit geeigneten Politikinstrumenten gefördert und abgesichert werden. Das Konzept der Klimaschutzverträge in Abstimmung mit einer Reform des EU-Emissionshandelssystems (EU-EHS) steht dabei als mögliche Lösung im Fokus.<sup>3</sup>

Für eine effiziente Konzeption von Klimaschutzverträgen ist es notwendig, die technischen und ökonomischen Aspekte der CO<sub>2</sub>-Abscheidung mit dem Oxyfuel- und E-LEILAC-Verfahren im Detail zu analysieren. Um diese Aspekte transparent darzustellen, wurde dieses Papier und ein Transformationskostenrechner erstellt. Im Zentrum der Studie steht die Berechnung der auf die CO<sub>2</sub>-Minderung bezogenen Transformationskosten, die sich bei der Umstellung von der konventionellen zur klimafreundlichen Zementproduktion ergeben. Diese Mehrkosten, ihre Varianz und Abhängigkeiten von relevanten Kostentreibern müssen verstanden werden, damit Klimaschutzverträge effektive Instrumente der Absicherung von Investitionen und des Betriebs von Anlagen zur CCUS-basierten Zementproduktion werden.

Die grundlegenden Konzepte und Ergebnisse dieser Studie wurden im Rahmen zweier Workshops mit der Zementindustrie und relevanten Interessensvertreterinnen und Interessensvertretern vorgestellt und diskutiert. Auf dieser Basis wurden dieses Papier und der Transformationskostenrechner erarbeitet.

---

2 Die Rolle von CO<sub>2</sub>-Senkenleistungen für die Klimaneutralität wurde eingehend in der Studie *Klimaneutrales Deutschland 2045* diskutiert (Prognos, Öko-Institut, Wuppertal-Institut 2021).

3 Die Rolle von Klimaschutzverträgen als Teil eines Zukunftsinvestitionsprogramms für Deutschland wird im Impulspapier *Öffentliche Finanzierung von Klima- und anderen Zukunftsinvestitionen* (Agora Energiewende und Forum New Economy 2021) eingehender beleuchtet.

### 3 Status und Transformation der Zementindustrie

Die Zementindustrie bildet mit 21 Unternehmen und 54 in allen Regionen Deutschlands ansässigen Zementwerken ein Fundament der deutschen Wirtschaft. Mit rund 8.100 Beschäftigten hat die Branche im Jahr 2019 rund 34,2 Millionen Tonnen Zement hergestellt und bedient mit ihren Produkten einen wachsenden Bedarf an Beton und Zement für den Bau von Wohnungen, gewerblichen und öffentlichen Gebäuden wie auch der generellen Infrastruktur. Mit dieser strategisch wichtigen Rolle konnte die Zementindustrie ihre Produktion in den letzten Jahren ausbauen (VDZ 2021) und wir erwarten auch für die Zeit bis 2045 eine wachsende Nachfrage nach Baustoffen. Die Produktion von Zement ist jedoch sehr energie- und CO<sub>2</sub>-intensiv. Mit direkten Emissionen von knapp 20 Millionen Tonnen an CO<sub>2</sub> im Mittel der letzten Jahre hat die Branche mittlerweile einen Anteil von knapp 3 der gesamtdeutschen Emissionen beziehungsweise 11 Prozent der Industrieemissionen. Im Vergleich zu 1990 hat die Branche ihren CO<sub>2</sub>-Ausstoß zwar um 25 Prozent reduziert. Jedoch stagnieren in den letzten zehn Jahren die Emissionen, da Maßnahmen der Energieeffizienz sowie der Ersatz von fossilen durch alternative Brennstoffe zum Großteil schon ausgeschöpft sind. Eine weitere Minderung der Emissionen ist vor allem durch die prozessbedingt unvermeidliche Entstehung von CO<sub>2</sub> bei der Kalzinierung des Kalksteins limitiert. Diese sogenannte Entsäuerung, die für die Produktion von Zementklinker als aktive Substanz im Zement notwendig ist, verursacht circa 65 Prozent der gesamten Emissionen. Die restlichen 35 Prozent entstehen durch die Verbrennung fossiler oder alternativer Brennstoffe zur Bereitstellung von Hochtemperatur-Prozesswärme. Die Steigerung der Energieeffizienz oder der Einsatz von erneuerbaren Energieträgern kann somit nur einen Teil der Gesamtemissionen weiter reduzieren. Auch kann der Klinkerfaktor im Zement nur in gewissen Grenzen reduziert werden. Um aber die bei der verbleibenden Klinkerproduktion entstehenden Prozessemissionen

zu mindern, muss man entweder auf den Einsatz des Produktes verzichten oder unvermeidbare Emissionen dem CCUS zuführen.

Die Zementindustrie in der EU unterliegt – im Gegensatz zur außereuropäischen Konkurrenz – der CO<sub>2</sub>-Bepreisung durch den EU-EHS. CO<sub>2</sub>-Kosten haben aufgrund der CO<sub>2</sub>-intensiven Herstellung im Prinzip einen hohen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit der Zementproduktion. Um jedoch Nachteile im internationalen Wettbewerb zu vermeiden, erhalten Anlagen im EU-EHS eine kostenfreie Zuteilung der zur Produktion benötigten Emissionsrechte (EUA). Daraus ergibt sich ein Anreiz für Maßnahmen der Effizienz und den Ersatz fossiler Brennstoffe. Als Konsequenz setzt die Industrie zunehmend alternative Brennstoffe ein<sup>4</sup> und hat den Klinkeranteil in ihren Produkten gesenkt.<sup>5</sup>

Im Rahmen der geltenden Regeln des EU-EHS entstehen so jedoch wenig Anreize, den Einsatz für Zement und Beton über Substitution und Materialeffizienz zu minimieren. Dieser Fehlanreiz ergibt sich aus der Vergabe der kostenfreien EUA-Zuteilungen, um die Zementindustrie vor dem Risiko des *Carbon Leakage* zu schützen. Als Nebeneffekt wird damit aber auch die Wirkung des CO<sub>2</sub>-Preises auf die Kosten des finalen Produktes kompensiert, was dazu führt, dass weniger CO<sub>2</sub>-intensive Baustoffe wie Holz entsprechend benachteiligt werden.

4 Im Laufe der letzten 30 Jahre wurde der Anteil an Alternativbrennstoffen auf knapp 70 Prozent gesteigert, um damit den Einsatz von Braun- und Steinkohle und deren Schadstoffemissionen zu mindern. Durch einen steigenden Anteil von biogenen Reststoffen lassen sich so auch fossile CO<sub>2</sub>-Emissionen mindern (VDZ 2020).

5 Der Klinkerfaktor konnte in den letzten Jahren auf ca. 71 Prozent reduziert werden. Die Industrie arbeitet daran, diesen Anteil weiter zu senken (VDZ 2020).

Zudem ist das EU-EHS in der bestehenden Form nicht in der Lage, die Mehrkosten für den Einsatz von CCUS-Technologien zur CO<sub>2</sub>-armen Zementproduktion abzusichern. Nach geltenden Regeln erfolgt die Vergabe kostenfreier Zuteilungen zwar gleichermaßen für konventionelle wie auch für CCUS-basierte Anlagen. In Abhängigkeit von der Entwicklung der CO<sub>2</sub>-Preise sind die Einkünfte aus einem Verkauf der durch das CCUS verfügbaren Zertifikate jedoch zu gering und unsicher, um die Mehrkosten für den Aufbau und Betrieb einer solchen Anlage zu decken. Darüber hinaus bieten die bestehenden Regeln keinen Anreiz für eine klimapositive Produktion, die sich durch die Verwendung von Biomasse in einer mit CCUS ausgerüsteten Anlage zur Klinkerproduktion ergeben würde.

Der Mangel an zuverlässigen Rahmenbedingungen für die Entwicklung und den Aufbau solcher Anlagen stellt ein Problem für die zukunftsfähige Ausrichtung der Industrie dar. So stehen in etwa 30 Prozent der deutschen Gesamtkapazität zur Klinkerproduktion noch vor 2030 zur Reinvestition an. Jede dieser Reinvestitionen bietet die Chance, die Anlage konsequent auf eine klimafreundliche Produktion auszurichten, oder das Risiko, sich über viele Jahre auf eine nicht mehr zukunftsfähige Produktion festzulegen<sup>6</sup>. Als Richtschnur muss dabei das Ziel der Klimaneutralität bis 2045 mit dem für den Industriesektor definierten Budget als Zwischenziel für 2030 dienen, wie es durch die Novellierung des Klimaschutzgesetzes definiert wurde (BMU 2021b).

### 3.1 Ein Transformationspfad zur Klimaneutralität bis 2045

Im Rahmen der Novelle des Klimaschutzgesetzes wurde eine CO<sub>2</sub>-Minderung von mindestens 65 Prozent bis 2030 definiert (BMU 2021b). Für die Indus-

trie wird in diesem Zeitraum eine Minderung von insgesamt 68 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> anvisiert. Dieses Ziel entspricht in etwa dem Szenario der Studie *Klimaneutrales Deutschland 2045*, in der die Beiträge der einzelnen Branchen modelliert wurden (Prognos, Öko-Institut, Wuppertal Institut 2021). Für die Zementbranche ist eine Minderung von insgesamt 17,3 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalente bis 2045 gegenüber dem Referenzjahr (2016) vorgesehen. Um dieses Ziel zu erreichen und die Stagnation der Emissionen zu überwinden, muss ein steigender Bedarf nach Baustoffen klimaneutral gedeckt werden. Ein solches Szenario wird durch Abbildung 3 visualisiert und im Folgenden kurz dargestellt.

Das hier vorgestellte Szenario<sup>7</sup> geht davon aus, dass Zement auch weiterhin ein überwiegend regional gehandeltes Produkt bleibt. Die Bautätigkeit nimmt dabei in Deutschland zukünftig weiter zu. Um dennoch Klimaneutralität zu erreichen, muss die Anwendung von Zementklinker über Substitution durch andere Baustoffe und den effizienten Einsatz von Klinker und Beton minimiert werden. Gleichzeitig muss der unvermeidbare Bedarf an Zementklinker durch eine CO<sub>2</sub>-arme oder klimapositive Produktion mithilfe von CCUS-Technologien und -Strategien gedeckt werden.

#### 3.1.1 Strategien der Materialeffizienz, Substitution und ressourceneffizienten Kreislaufwirtschaft

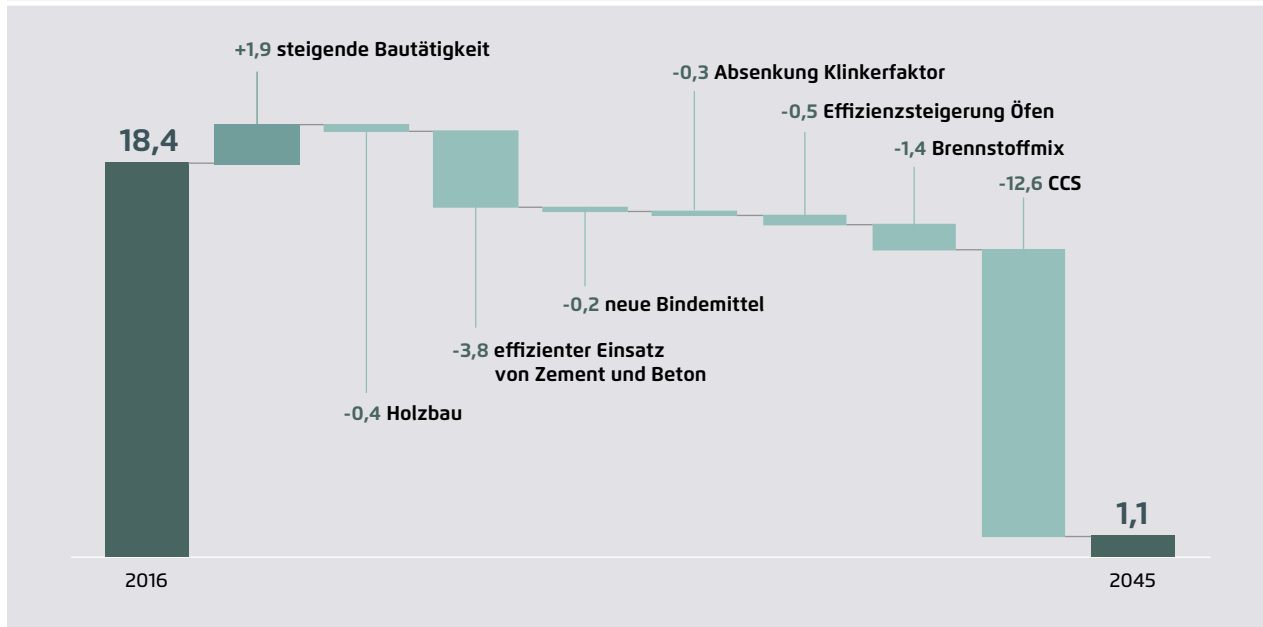
Eine erste Strategie, den Einsatz von Beton und Zement zu mindern, bietet die Substitution durch andere, weniger ressourcenintensive Baustoffe wie zum Beispiel Holz. Seine Verwendung zur Konstruktion von Gebäuden ersetzt dabei den Einsatz von CO<sub>2</sub>-intensivem Stahl und Zement und stellt durch seinen Kohlenstoffgehalt eine langfristige CO<sub>2</sub>-Senke dar.

6 Um dieses Risiko zu minimieren, sollten neue Anlagen und Standorte so konzipiert werden, dass sie leicht nachzurüsten sind.

7 Der Verein Deutscher Zementwerke hat ein komplementäres Szenario erarbeitet, das zur vergleichenden Analyse geeignet ist (VDZ 2020).

Minderungsbeiträge einzelner Strategien in der Zementindustrie (Mio. t. CO<sub>2</sub>-Äq.)

Abbildung 3



Prognos, Öko-Institut, Wuppertal Institut (2021)

Eine weitere Strategie ist der effiziente Einsatz von Zementklinker und Beton. Für eine weitere Reduktion des Klinkerfaktors ergibt sich jedoch die Herausforderung, dass das Angebot an Hüttensand aus der Stahlindustrie und Flugasche aus Kohlekraftwerken sinkt. Beides sind Rohstoffe, die es ermöglichen, den Einsatz von Klinker zu minimieren. Um diesen Effekt zu kompensieren und den Einsatz von Klinker dennoch zu senken, muss die Entwicklung innovativer Zemente<sup>8</sup> mit geringem Klinkerfaktor (CEM II/C- und CEM VI-Zemente) vorangetrieben werden. Dabei müssen, neben der technischen Entwicklung und dem Marketing, auch die notwendigen Normierungsverfahren durchgeführt werden.

8 LC3-Zement bietet äquivalente oder bessere Materialeigenschaften als konventioneller Zement bei einer deutlichen Reduktion des Klinkerfaktors, siehe: <https://lc3.ch/>. Eine andere Option ist Celitement, siehe <https://celitement.de/>.

Ein weiterer Baustein zur Dekarbonisierung des Sektors sind alternative Bindemittel, die sich in unterschiedlichen Phasen des Forschungs- und Entwicklungsprozesses befinden. Durch ihre Nutzung kann der Einsatz von Klinker reduziert werden.

Neben diesen Strategien zur Minderung der Verwendung des CO<sub>2</sub>-intensiven Klinkers stehen auch Strategien zum effizienten Einsatz von Beton im Fokus der Diskussion. Durch den Ersatz von Armierungsstahl durch Carbonfasern und durch die intelligente Geometrie von Bauteilen können signifikante Mengen an Beton eingespart werden. Darüber hinaus kann eine Anpassung von Baunormen und -standards in Kombination mit den angesprochenen technischen Entwicklungen zur Reduktion des spezifischen Bedarfes an Beton pro Quadratmeter Neubau oder Ersatzbau führen.

Zusätzliches Minderungspotenzial bietet das Schließen von Stoffkreisläufen und ein verstärktes Recycling von Baumaterialien, zum Beispiel über *Smart*

Crushing oder die Rekarbonisierung von Feinzement bzw. der Grobfraktion des Betonabbruchs. Außerdem können durch eine längere Lebensdauer der Gebäude und Infrastruktur infolge besserer Wartung der Bedarf an Zement und Beton effektiv reduziert werden. Weitere Bausteine zur Dekarbonisierung der Zementindustrie sind Effizienzsteigerungen der Öfen und der verstärkte Einsatz alternativer Brennstoffe.

### 3.1.2 Strategisches Potenzial des CCUS

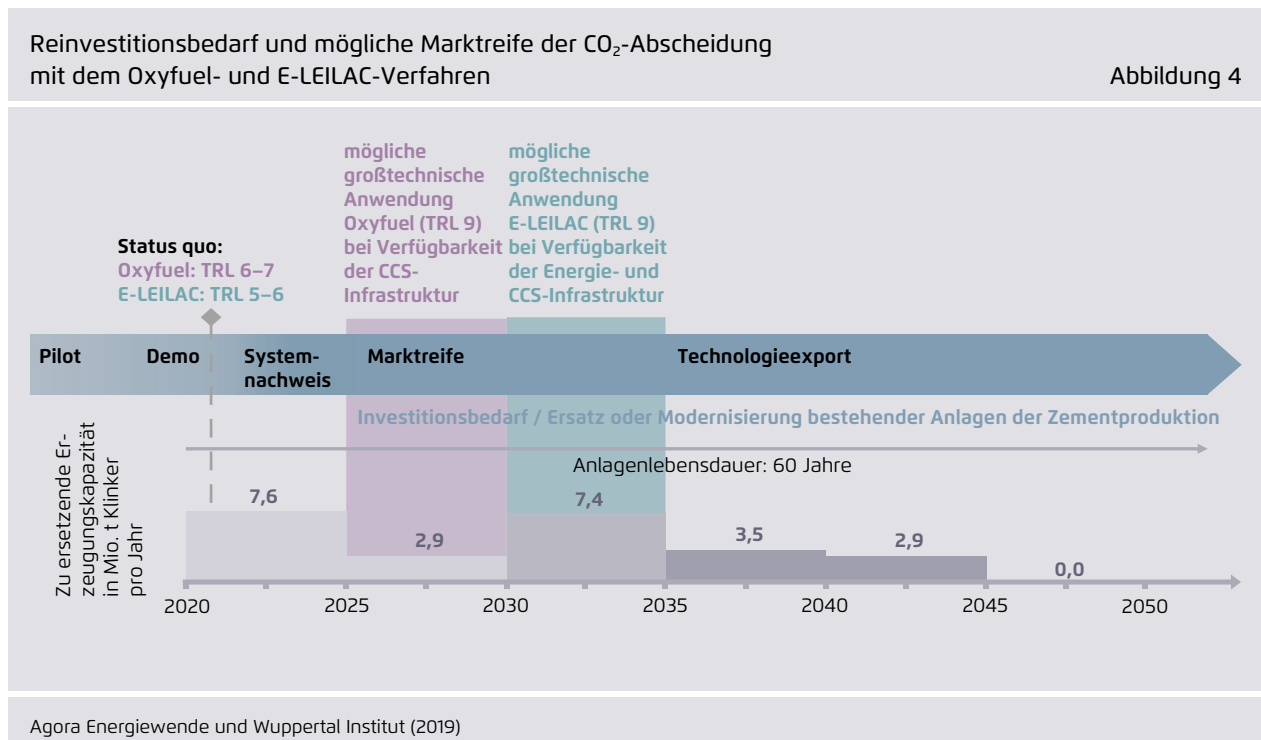
Wie durch die Abbildung 3 visualisiert wird, kann man nicht davon ausgehen, dass es mit den genannten Maßnahmen der ressourceneffizienten Kreislaufwirtschaft gelingen wird, Zement als Baustoff und Klinker als Grundstoff zu ersetzen. Durch diese Maßnahmen ergibt sich jedoch in Summe bis 2045 – trotz steigender Bautätigkeit – ein leichter Rückgang in der Zementproduktion sowie ein etwas stärkerer Rückgang bei der Produktion von Zementklinker.

Zementklinker bleibt im Szenario somit ein unverzichtbarer Grundstoff. Da seine Produktion mit

prozessbedingten Emissionen verbunden ist, erscheint der Einsatz von CCUS aus heutiger Sicht für die Klimaneutralität der Zementindustrie unumgänglich. Dafür ist es unerlässlich, die notwendigen Technologien schnell zur Marktreife zu bringen, die notwendige Infrastruktur aufzubauen und entsprechende Regularien zu definieren.

Im hier diskutierten Szenario geht man davon aus, dass der Aufbau der notwendigen Infrastruktur und die Entwicklung der Technologien noch vor 2030 anlaufen muss, um die vollständige Transformation der Zementindustrie nach 2030 vorzubereiten.

Wie in Abbildung 4 visualisiert, kann die Oxyfuel-Technologie zur CO<sub>2</sub>-Abscheidung zwischen 2025 und 2030 in industriellem Maßstab verfügbar sein. Dabei wird eine Abscheiderate von 90 Prozent und ab 2040 von 95 Prozent des CO<sub>2</sub> angenommen. Das Verfahren ist auch deshalb interessant, weil es mit dem Trend zum Einsatz von Alternativbrennstoffen in Synergie steht. Einerseits lassen sich so anderwei-



tig nicht mehr verwertbare Reststoffe nutzen, andererseits mit einem steigenden Anteil an Biomasse insgesamt sogar negative Emissionen erreichen.

Als Alternative steht auch das E-LEILAC-Verfahren zur Diskussion, da es ebenfalls eine günstige CO<sub>2</sub>-Abscheidung bei einem sehr reinen CO<sub>2</sub>-Strom ermöglicht. Zudem ist es ein vielversprechender Ansatz für die Teilelektrifizierung der Zementklinkerherstellung, was Brennstoffemissionen vermeidet. Dieses Verfahren ist vorteilhaft, wenn genügend günstiger Strom verfügbar ist, aber CO<sub>2</sub>-Speicherung und -Transport teuer sind. Momentan geht man davon aus, dass diese Technologie erst nach 2030 kommerziell verfügbar ist, auch weil die dafür benötigten großen Mengen an erneuerbarem Strom noch fehlen.

Um jedoch der strategischen Rolle erster CCUS-Projekte für die langfristige Klimaneutralität der Branche Rechnung zu tragen, müssen erste kommerzielle Projekte noch vor 2030 entwickelt werden, um damit eine schnelle Skalierung nach 2030 vorzubereiten. Des Weiteren ist es wichtig, dass Zementwerke, in die noch vor 2030 reinvestiert werden, so konzipiert sind, dass sie sich nachrüsten lassen, sobald der Standort an eine CO<sub>2</sub>-Infrastruktur angeschlossen wird. Reinvestitionen nach 2030 sollten dann konsequent in Öfen mit einer voll funktionsfähigen Anlage zur Abscheidung von CO<sub>2</sub> und einem soliden Konzept des CCUS erfolgen.

Die Tatsache, dass auch die Industrie sich für dieses Ziel einsetzt, wird durch die in Tabelle 2 aufgelisteten Projekte visualisiert.

Im folgenden Unterkapitel werden wir uns zunächst mit den technischen Aspekten der Abscheidung von CO<sub>2</sub> an Zementöfen und den Grundlagen des CCS beschäftigen. Auf dieser Basis werden wir dann die Rolle und Ausgestaltung von Klimaschutzverträgen zur Absicherung der notwendigen Investitionen diskutieren.

### 3.2 Kurzbeschreibung der Klimaschutztechnologien: Oxyfuel- und E-LEILAC-Verfahren

Das Oxyfuel-Verfahren ist ein Prozess, bei dem das Brennen des Zementklinkers mit einem Gemisch aus Sauerstoff und aufbereitetem CO<sub>2</sub> anstelle von Luft durchgeführt wird. Dies erleichtert die Abscheidung des CO<sub>2</sub> aus dem Abgasstrom und ermöglicht das Auffangen von 90 Prozent oder mehr der gesamten Emissionen.

Im E-LEILAC-Verfahren dient ein spezieller, indirekt beheizter Stahlreaktor als Kalzinator. Dadurch können die Prozessemissionen direkt als reiner CO<sub>2</sub>-Strom abgetrennt werden. So können bis zu 90 Prozent der prozessbedingten Emissionen aufgefangen werden. Um auch brennstoffbasierte Emissionen zu vermeiden, kann die Erzeugung der Hochtemperaturwärme am Kalzinator elektrifiziert werden. Bei zusätzlichem Einsatz treibhausgasneutraler Brennstoffe am Drehrohrofen sind auch mit dem E-LEILAC-Verfahren Gesamtinderungen der Emissionen von über 90 Prozent möglich.

Die Investitionskosten für E-LEILAC sind voraussichtlich deutlich niedriger als für das Oxyfuel-Verfahren. Voraussetzung für seinen Einsatz ist allerdings, dass günstiger Strom aus Erneuerbaren Energien in großen Mengen verfügbar ist. Ist Strom hingegen knapp und teuer, ist das weniger stromintensive Oxyfuel-Verfahren besser geeignet<sup>9</sup>. Im Hinblick auf die Notwendigkeit von klimapositiven Strategien für die Klimaneutralität bietet das Oxyfuel-Verfahren bei Einsatz von biogenen Brennstoffen zudem die Möglichkeit, eine CO<sub>2</sub>-Senke zu schaffen. Somit könnten damit nicht vermeidbare Emissionen zum Beispiel in der Landwirtschaft ausgeglichen werden.

9 Falls Elektrolyseure als Sauerstoffquelle in der Nähe sein sollten, kann auch der Strombedarf zur Luftzerlegung entfallen und es ergeben sich Synergien und OPEX-Vorteile.

Projekte und Pilotanlagen zur Einführung und Vermarktung von Projekten zur CO <sub>2</sub> -Abscheidung und Verwendung in Europa				
				Tabelle 2
Projekt, Produktionsort	Land	Unternehmen	Status Quo	Zeitraumen
Brevik CCS-Projekt, Brevik		HeidelbergCement	Das Projekt sieht den Bau einer großtechnischen Anlage zur Abscheidung und Speicherung von 0,4 Mio. CO <sub>2</sub> pro Jahr ab dem Jahr 2024 vor.	2024: kommerzielles CCS
ECRA-CCS-Projekt, verschiedene Produktionsorte		European Cement Research Academy (ECRA) und verschiedene Unternehmen	Das Projekt untersucht seit 2007 die wirtschaftliche und technische Machbarkeit der CO <sub>2</sub> -Abscheidung im Zementsektor. Derzeit wird ein Konzept für eine Demonstrationsanlage entwickelt (TRL 6–7).	2020–2023: Aufbau einer Demonstrationsanlage
catch4climate, Mergelstetten		Buzzi Unicem-Dyckerhoff, HeidelbergCement, SCHWENK Zement, Vicat	Geplant ist der Bau einer Demonstrationsanlage für Oxyfuel-Capture (TRL 6–7). Das abgeschiedene CO <sub>2</sub> soll zur Herstellung von „reFuels“ wie Kerosin verwendet werden.	2021–2014: Demonstrationsanlage
LEILAC II, Hannover		HeidelbergCement	Geplanter Bau einer CCS-Demonstrationsanlage zur Abscheidung von 0,1 Mio. CO <sub>2</sub> pro Jahr (TRL 6–7)	2025: Demonstrationsanlage
LEILAC I, Lixhe		HeidelbergCement	Die Pilotanlage hat ein Produktionsvolumen von 10 t Zementklinker/Stunde (TRL 4–5).	2019: Pilotanlage in Betrieb
Slite-CCS-Projekt, Slite (Insel Gotland)		HeidelbergCement	Die großtechnische Anlage soll ab 2030 bis zu 1,8 Mio. t CO <sub>2</sub> pro Jahr abscheiden und geologisch speichern.	2030: kommerzielles CCS-Werk
CCS-Projekt Greensand, Nini-West Lagerstätte		Wintershall Dea	Die Pilotanlage nützt geologische Speicherkapazitäten im Gebiet Nini-West in der dänischen Nordsee und soll ab 2022 bis zu 1 Mio. t CO <sub>2</sub> pro Jahr speichern und dann bis 2030 zu einer Kapazität von 8 Mio. t CO <sub>2</sub> pro Jahr ausgebaut werden.	2022: Pilotanlage Bei Erfolg: ab 2025 Kommerzialisierung

Agora Industrie, FutureCamp, Wuppertal Institut und Ecologic Institut (2022)

Oxyfuel und E-LEILAC weisen Vorteile gegenüber anderen, derzeit untersuchten Optionen zur CO<sub>2</sub>-Abscheidung auf.<sup>10</sup> Das Oxyfuel-Verfahren sticht

hervor, da es unter den Verfahren mit hohen Abscheidungsraten von 90 Prozent oder mehr voraussichtlich das Günstigste ist (vgl. Gardarsdottir et al. 2019).

10 Darüber hinaus gibt es auch die Möglichkeit, existierende Anlagen mit dem *post-combustion* CCS auszustatten, bei der das CO<sub>2</sub> mittels einer Aminwäsche aus dem

Abgasstrom abgeschieden wird. Diese Option wird in unserer Studie nicht konkret analysiert, stellt aber eine verwandte Option dar.



### 3.3 Infrastruktur und innovative Verfahren für das CCUS

Damit Zementwerke, die mit Oxyfuel- und E-LEILAC-Technologien ausgerüstet sind, auch klimafreundlich arbeiten können, muss das abgeschiedene CO<sub>2</sub> über eine entsprechende Infrastruktur – zum Beispiel Pipelines oder an flussnahen Standorten von Binnenschiffen – abtransportiert werden, um es in geeigneten geologischen Speichern (zum Beispiel leeren Öl- und Gasfelder in der Nordsee) zu lagern oder aber einer langfristigen Nutzung zuzuführen. Dafür muss der Aufbau der nötigen Infrastruktur und Regularien zügig angestoßen werden. Dabei muss es darum gehen, in enger Zusammenarbeit mit anderen Ländern Europas eine CCUS-Strategie und einen Rechtsrahmen zu erarbeiten, die es erlauben, langfristig unvermeidbare Restemissionen zu mindern und die für eine Klimaneutralität notwendigen klimapositiven Strategien zu entwickeln.

Mit diesem Ziel haben die Stiftung Klimaneutralität, Agora Energiewende und Agora Verkehrswende (2021) die Erarbeitung einer CCS-Strategie als eine der zentralen Empfehlungen für die aktuelle Legislaturperiode definiert. Darüber hinaus sind folgende Aspekte von Bedeutung:

#### 1) Aufbau eines regulatorischen Rahmens für die CCS-Infrastruktur:

Die London Convention und das London Protocol als internationale Abkommen zum Schutz der Meere vor Abfällen regeln die geologische Speicherung von CO<sub>2</sub> im Meeresboden. Im Oktober 2019 haben sich die Mitgliedsstaaten darauf geeinigt, dass CO<sub>2</sub>-Export mit dem Ziel der Speicherung unter gewissen Voraussetzungen erlaubt ist. Damit wurde das letzte bedeutende Hindernis im internationalen Recht zur CO<sub>2</sub>-Speicherung beseitigt (IEAGHG 2021).

Im *Fit-for-55-Package* der EU-Kommission wurde zudem klargestellt, dass für CO<sub>2</sub>, welches langfristig geologisch gespeichert wird, keine Emissionsabgabeverpflichtungen im Rahmen des EU-EHS gelten

sollen.<sup>11</sup> Somit ergibt sich für Anlagenbetreiber, die das CO<sub>2</sub> über eine CCS-Infrastruktur langfristig speichern, die Möglichkeit, die nicht benötigten Emissionszertifikate zu veräußern.

Um den zügigen Aufbau einer europäischen CCS-Infrastruktur anzustoßen, ist jedoch die Etablierung eines regulatorischen Rahmens auf europäischer Ebene notwendig. Es existieren derzeit noch keine Verträge zur Absicherung der langfristigen Risiken zwischen der EU und Ländern wie Großbritannien und Norwegen, die für die Speicherung des in der EU abgeschiedenen CO<sub>2</sub> infrage kommen. Zudem sollten CO<sub>2</sub>-Lagerstätten in die TEN-E-Richtlinie aufgenommen werden, um die Verknüpfung dieser Infrastruktur zwischen den EU-Ländern regulieren zu können (Stiftung Klimaneutralität, Agora Energiewende und Agora Verkehrswende 2021).

#### 2) CCS-Transportmodalitäten und Auswirkungen auf Kosten:

In unserer Studie gehen wir davon aus, dass das CO<sub>2</sub> in geeigneten geologischen Offshore-Speichern in Ländern wie Norwegen erfolgt. Aufgrund der Distanz haben die Transportmodalitäten einen signifikanten Einfluss auf die Gesamtkosten für den Transport und die Einlagerung des abgeschiedenen CO<sub>2</sub>. Auf der Basis einer Literaturanalyse haben wir für diese Studie die Kosten dafür eingegrenzt, um daraus geeignete Annahmen für unsere Analyse abzuleiten. Als untere Grenze haben wir dafür die Kosten für den Transport mit einer Pipeline auf 26 Euro pro Tonne CO<sub>2</sub> festgelegt, wobei diese Infrastruktur heute noch nicht existiert.

Als zentrale Annahme gehen wir von einem Transport per Schiff aus und setzen dafür 36 Euro pro Tonne CO<sub>2</sub> an. Als obere Grenze gehen wir von einem

11 Die Vorschläge zur Revision der EU-Verordnung 2003/87/EC zum Aufbau des EU-EHS stellen klar, dass Emissionen, die einem permanenten CCUS zugeführt werden, von der Verpflichtung zur Abgabe von Emissionszertifikaten befreit sein sollen (COM, 2021a).

multimodalen Transport mit Lastwagen, Eisenwagons und Schiff aus, was Kosten von circa 60 Euro pro Tonne CO<sub>2</sub> generiert.

### 3) Die Rolle von alternativen CCU-Verfahren

Während die CO<sub>2</sub>-Speicherung in geologischen Lagerstätten bereits in Demonstrationsanlagen erfolgt und für die kommerzielle Nutzung skaliert wird, gibt es auch vielversprechende Ansätze für eine wertstoffliche Verwendung oder die Mineralisierung von CO<sub>2</sub>. Ein Beispiel ist die Mineralisierung im Frischbeton oder auch Abbruchbeton<sup>12</sup>. Darüber hinaus gibt es eine breite Palette von Strategien, bei denen CO<sub>2</sub> als Ausgangsstoff für die Herstellung chemischer Produkte mit langer Lebensdauer verwendet wird, die damit ebenfalls ein wichtiges Potenzial für die Schaffung langfristiger Kohlenstoffsenken bieten können. Das *Fit-for-55-Package* erkennt die Bedeutung dieser Strategien und fordert, dass für CO<sub>2</sub>-Emissionen, die „dauerhaft chemisch in einem Produkt gebunden sind, sodass sie bei normalem Gebrauch nicht in die Atmosphäre gelangen“ (COM 2021a), keine Verpflichtungen zur Abgabe von EUA bestehen.

Dabei soll der EU-Kommission die Befugnis übertragen werden, die Kriterien für eine dauerhafte CO<sub>2</sub>-Bindung in Produkten zu definieren und gegebenenfalls geeignete Methoden für die Zertifizierung dieser Senkenleistung zu entwickeln.

### 4) Künftige Standortwahl für Zementwerke:

Die Standorte bestehender Zementwerke wurden oft im Hinblick auf die Nähe zu Absatzmärkten sowie einen einfachen Zugang zu den benötigten Rohstoffen für die Produktion des Zementklinkers gewählt. Der für eine klimaneutrale Produktion notwendige Anschluss an eine CO<sub>2</sub>-Transportinfrastruktur stellt

jedoch neue Anforderungen an die Standortwahl.<sup>13</sup> Aufgrund der hohen Kosten für den CO<sub>2</sub>-Transport kommen kurzfristig eher Anlagen infrage, die an logistisch vorteilhaften Standorten für einen Transport des CO<sub>2</sub> mit dem Schiff liegen. Um mittel- und langfristig auch Anlagen im Hinterland zu erschließen, muss jedoch ein geeignetes Pipelinennetz für den CO<sub>2</sub>-Transport aufgebaut werden. Gleichzeitig ist es wichtig, auch Technologien und Strategien für die langfristige Nutzung und eine permanente Bindung von CO<sub>2</sub> in Produkten voranzutreiben, um damit auch Anlagen, für die der Anschluss an eine Pipeline nicht möglich ist, einzubinden.

---

12 Verfahren zur Karbonatisierung im Bereich Frischbeton: *Carbon Cure* (<https://www.carboncure.com/>) und *Solidia* (<https://www.solidiatech.com/>); im Bereich Abbruchbeton: *Fastcarb* Projekt (<https://fastcarb.fr/en/home/>)

---

13 Auch der Zugang zu nachhaltiger Biomasse spielt für einen klimapositiven Betrieb eine Rolle.

## 4 Klimaschutzverträge zur Transformation der Zementindustrie

Wie bereits dargelegt, stellt CCUS für die Klimaneutralität der Zementindustrie als auch des Landes einen strategischen Ansatz dar – nicht zuletzt, weil es in Verbindung mit der Verwendung nachhaltiger Biomasse eine der wenigen Möglichkeiten bietet, signifikante CO<sub>2</sub>-Senkeneffekte zu generieren.

Aufgrund dieser strategischen Rolle des CCUS ist es dringend geboten, erste großtechnische Projekte zu etablieren, die notwendige Infrastruktur für den CO<sub>2</sub>-Transport aufzubauen und die notwendigen Regularien zu entwickeln.

Da der Aufbau von CCUS in der Zementindustrie zur Minderung der Prozessemissionen ohnehin notwendig ist, die Technologien dazu kurz vor der Marktreife stehen und die Industrie darüber hinaus Potenzial für einen klimapositiven Betrieb eröffnet, bietet sich die Branche an, als Pionier für den Aufbau einer CCUS-Strategie und Infrastruktur zu fungieren.

Die Zementindustrie entwickelt dafür schon erste Pilot- und Demonstrationsanlagen und strebt die großtechnische Skalierung an. Bei optimaler Entwicklung ist es realistisch, dass erste kommerzielle Anlagen schon im Zeitraum von 2025 bis 2030 realisiert werden können.

Aus betriebswirtschaftlicher Perspektive sind der Aufbau und Betrieb solcher Anlagen im heutigen regulatorischen und wettbewerblichen Rahmen jedoch noch riskant. Um dennoch erste Anlagen aufzubauen, müssen die notwendigen Investitionen und ihr Betrieb mit geeigneten Politikinstrumenten gefördert und abgesichert werden. Das Konzept der Klimaschutzverträge in Abstimmung mit einer Reform des EU-EHS steht dabei als mögliche Lösung im Fokus.

Um die effiziente Konzeption und Umsetzung von Klimaschutzverträgen zu unterstützen, werden im Rahmen dieser Studie die technischen und ökonomischen Aspekte der CO<sub>2</sub>-Abscheidung mithilfe des Oxyfuel- und E-LEILAC-Verfahrens im Detail analysiert. Im Zentrum steht die Berechnung der auf die CO<sub>2</sub>-Minderung bezogenen Transformationskosten<sup>14</sup>, die sich bei der Umstellung von der konventionellen zur klimafreundlichen Zementproduktion ergeben. Diese Mehrkosten, ihre Varianz und Abhängigkeiten von relevanten Kostentreibern werden analysiert, um damit die Konzeption von Klimaschutzverträgen als Instrument der Absicherung für Investitionen und den Betrieb der klimafreundlichen Zementproduktion zu unterstützen.

### 4.1 Abschätzung der CO<sub>2</sub>-Minderungskosten

Als Grundlage für die Berechnung und Diskussion möglicher Ausgestaltungsvarianten eines Klimaschutzvertrages werden nachfolgend die Mehrkosten und die CO<sub>2</sub>-Minderungskosten der Zementklinkerproduktion mit CCUS betrachtet. Als Referenz wird die Zementklinkererzeugung in einem klassischen Zementwerk mit einem modernen Drehrohfen und Kalzinator und einer Kapazität von 3.000 Tonnen Zementklinker pro Tag betrachtet. Im Referenzprozess gehen wir von einer vollständigen Freisetzung der prozess- und brennstoffbedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen aus.

Für die Produktion von klimafreundlichem Zementklinker mit CCUS werden für den ersten Schritt der CO<sub>2</sub>-Abscheidung zwei Klimaschutztechnologien

<sup>14</sup> Siehe auch Abbildung 2.

miteinander verglichen, welche in Abschnitt 3.2 vorgestellt wurden:

- 1) Oxyfuel-Verfahren, auch in Kombination mit Biomasse als Brennstoff
- 2) Elektrifiziertes LEILAC-Verfahren (E-LEILAC)

Für den zweiten Schritt gehen wir in dieser Studie davon aus, dass das abgeschiedene CO<sub>2</sub> über Pipeline oder Schiff für die Speicherung in geeigneten geologischen Lagerstätten transportiert wird. Die Kosten für diese geologischen CO<sub>2</sub>-Senken wurden auf der Basis von geeigneten Quellen definiert und je nach Annahme nach unten und oben eingegrenzt. Im Rahmen dieser generischen Kosten können auch andere technische CO<sub>2</sub>-Senken wie zum Beispiel die Mineralisierung in Baustoffen oder natürlichem Gestein oder die langfristige Verwendung von CO<sub>2</sub> in Produkten eingeordnet und gegebenenfalls durch entsprechende Klimaschutzverträge gefördert werden.

Um die Mehrkosten einer klimafreundlichen Zementerzeugung zu berechnen, wurde ein Transformationskostenrechner erarbeitet, der als Anhang dieser Publikation zur Verfügung steht. Die Resultate des Rechners werden in den folgenden Kapiteln dargestellt und diskutiert. Details zu den Annahmen und Funktionen des Transformationskostenrechners werden im Annex dokumentiert und erläutert.

## 4.2 Abschätzung der Mehrkosten einer CO<sub>2</sub>-armen Produktion

Mehrkosten für eine CO<sub>2</sub>-arme Produktion im Vergleich zum konventionellen Verfahren können durch höhere Investitionskosten, aber auch durch höhere Betriebskosten entstehen. Mehrkosten bei Investitionen werden am Anfang einer Investitionsentscheidung festgelegt und müssen dann in der Regel über viele Jahre amortisiert werden. Die Mehrkosten für den Aufbau eines Zementofens mit Oxyfuel- oder E-LEILAC-Technologie werden dafür aus zwei Perspektiven betrachtet.

- 1) Im Falle des *Retrofit* einer bestehenden Anlage ergeben sich die Mehrkosten aus den vollen Investitionskosten für das *Retrofit*.
- 2) Im Falle einer Neuinvestition (*Greenfield*) ergeben sich die Mehrkosten bei der Investition ( $\Delta$  CAPEX) aus dem Vergleich der Kosten für den Aufbau einer Referenzanlage.

Die jeweils anfallenden Mehrkosten bei der Investition werden dann über einen mittleren Abschreibungszeitraum und mit einem geeigneten Zinssatz annualisiert.<sup>15</sup>

Betriebskosten fallen jedes Jahr an. Ihr absoluter Wert und die Unterschiede beim Betrieb der Klimaschutz- und Referenzanlage hängen von der Entwicklung der Preise und Preisdifferenzen (Spreads) von verschiedenen Energieträgern, Rohstoffen und Betriebsmitteln ab.

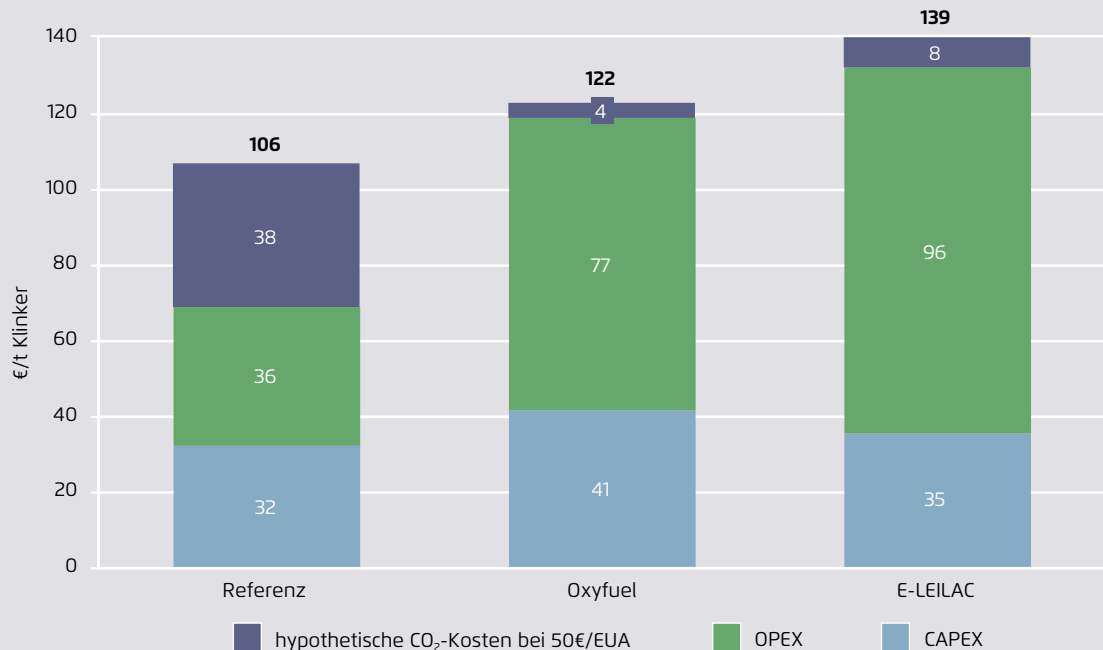
Um den Einfluss dieser Variablen für den Fall einer Neuinvestition (*Greenfield*) zu bestimmen und einzuordnen, werden in Abbildung 5 die annualisierten Kosten für Investitionen (CAPEX) sowie die

---

15 Als Standardannahme in unserem Rechner verwenden wir 10 Jahre und einen Zinssatz von 8 Prozent. Diese Werte können im Transformationskostenrechner angepasst werden.

Kostenblöcke für die Erzeugung einer Tonne Zementklinker für die betrachteten Verfahren (*Greenfield*; kostenfreie Zuteilungen nicht berücksichtigt)

Abbildung 5



Agora Industrie, FutureCamp, Wuppertal Institut und Ecologic Institut (2022)

Betriebskosten (OPEX) für die Produktion einer Tonne Zementklinker über die betrachteten Verfahren dargestellt. Die Betriebskosten sind ohne Details der spezifischen Komponenten dargestellt. Zusätzlich sind CO<sub>2</sub>-Kosten als separate Position unter Annahme eines fiktiven Preises von 50 Euro/EUA dargestellt. In der Darstellung dieses Kostenblocks bleiben die Auswirkungen einer kostenfreien Zuteilung im ersten Schritt unberücksichtigt.

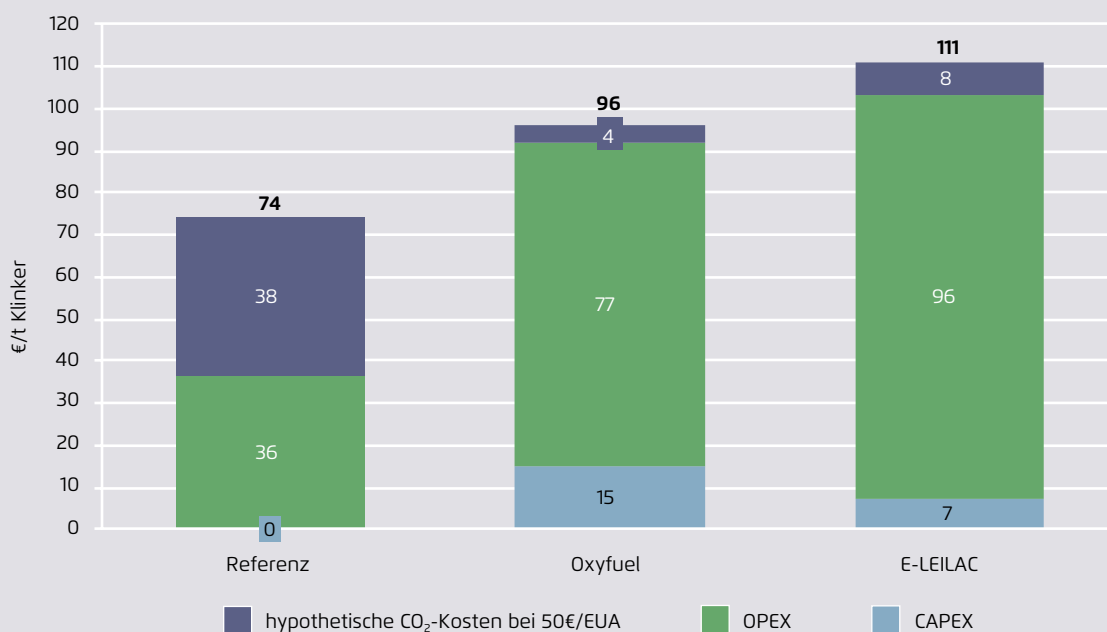
Bezüglich der annualisierten Investitionskosten ergeben sich unter der Annahme, dass eine Neuinvestition für den Aufbau einer Klimaschutzanlage mit CCUS-Infrastruktur anstatt einer Referenzanlage mit äquivalenter Kapazität getätigt wird (*Greenfield*), Mehrkosten von 9 Euro pro Tonne Zementklinker für das Oxyfuel-Verfahren beziehungsweise 3 pro Tonne Zementklinker für das E-LEILAC-Verfahren. Die

Gesamtkosten der beiden CCUS-Varianten liegen auch unter Berücksichtigung der hypothetischen CO<sub>2</sub>-Kosten von 50 Euro/EUA über den Kosten der Referenzanlage.

Im Vergleich dazu visualisiert Abbildung 6 die Kosten unter der Annahme, dass die CO<sub>2</sub>-Abscheidung in ein bestehendes Zementwerk integriert wird (*Retrofit*), ohne dass eine Investition bei der Referenzanlage erforderlich wäre. In diesem Fall ergibt sich bei den annualisierten Kapitalkosten ein Anstieg um etwa 15 Euro pro Tonne Zementklinker für die Variante Oxyfuel sowie ein Anstieg in Höhe von etwa 7 Euro pro Tonne für die Variante E-LEILAC. Die Auswirkungen einer kostenfreien Zuteilung bleiben weiterhin unberücksichtigt. Die relevantesten Unterschiede zwischen den beiden Varianten zeigen sich bei den Betriebskosten.

Kostenblöcke für die Erzeugung einer Tonne Zementklinker für die betrachteten Verfahren (*Retrofit*; kostenfreie Zuteilungen nicht berücksichtigt)

Abbildung 6



Agora Industrie, FutureCamp, Wuppertal Institut und Ecologic Institut (2022)

In Abbildung 7 erfolgt eine Aufschlüsselung der relevanten Kostenblöcke bei den Betriebskosten. Hinsichtlich der allgemeinen Betriebskosten ergeben sich leichte Unterschiede zwischen den Technologien. Die Kosten für Rohmehl bleiben unverändert. Bei den Brennstoffkosten ergibt sich durch den standardisierten Brennstoffmix kein Unterschied zwischen Oxyfuel- und Referenzanlage.<sup>16</sup> In der Variante E-LEILAC sinken die Brennstoffkosten um 2 Euro pro Tonne Zementklinker, da ein Teil der Brennstoffe durch Strom substituiert wird. Die wesentlichen Mehrkosten ergeben sich für Strom sowie für Transport und Speicherung des CO<sub>2</sub>.

Der erhöhte Strombedarf, der sich für das Oxyfuel-Verfahren hauptsächlich aus der CO<sub>2</sub>-Reinigung und

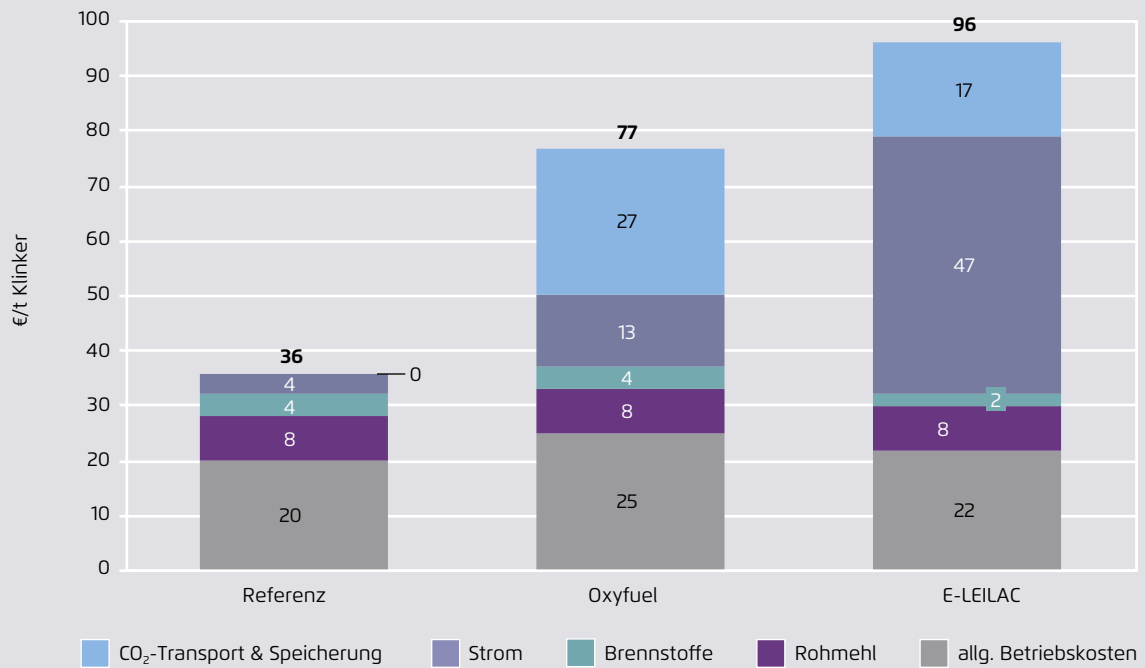
-Kompression sowie dem Betrieb der Luftzerlegungsanlage für die Sauerstoffproduktion ergibt, führt zu betrieblichen Mehrkosten in Höhe von 9 Euro pro Tonne Zementklinker. In der Variante E-LEILAC steigen die Mehrkosten für Strom durch die Elektrifizierung der Hochtemperaturwärme um 43 Euro pro Tonne Zementklinker. Die Kosten für den CO<sub>2</sub>-Transport und die geologische Speicherung liegen für das Oxyfuel-Verfahren bei 27 Euro pro Tonne Zementklinker. Für das E-LEILAC-Verfahren liegen diese wegen der insgesamt geringeren abzuscheidenden CO<sub>2</sub>-Mengen bei 17 Euro pro Tonne Zementklinker. Dabei gehen wir von Kosten von 36 Euro pro Tonne CO<sub>2</sub> für einen Transport mit dem Schiff aus.

Grundlage für die Definition von Klimaschutzverträgen bilden die CO<sub>2</sub>-Minderungskosten im Vergleich zur Referenztechnologie. Diese ergeben sich aus dem Quotienten der Mehrkosten der Produktion einer

<sup>16</sup> Dieser Brennstoffmix enthält übliche Alternativbrennstoffe und damit bereits einen biogenen Anteil.

Aufschlüsselung relevanter OPEX-Kostenblöcke nach Routen  
(Retrofit; CO<sub>2</sub>-Kosten nicht berücksichtigt)

Abbildung 7



Agora Industrie, FutureCamp, Wuppertal Institut und Ecologic Institut (2022)

CO<sub>2</sub>-Emissionen und relative CO<sub>2</sub>-Minderungen nach Verfahren (Retrofit)

Tabelle 3

	Referenz (t CO <sub>2</sub> /t Klinker)	Oxyfuel (t CO <sub>2</sub> /t Klinker)	E-LEILAC (t CO <sub>2</sub> /t Klinker)
<b>CO<sub>2</sub>-Produktion pro Tonne Klinker</b>			
Fossiles CO <sub>2</sub> aus Entsäuerung Kalkstein	0,536	0,536	0,536
Fossiles CO <sub>2</sub> aus konventionellem Brennstoffmix	0,229	0,229	0,090
Biogenes CO <sub>2</sub> aus konventionellem Brennstoffmix	0,062	0,062	0,014
<b>CO<sub>2</sub>-Abscheidung (konventioneller Brennstoffmix)</b>			
Abgeschiedenes fossiles CO <sub>2</sub>	0	0,689	0,471
Abgeschiedenes biogenes CO <sub>2</sub>	0	0,056	0
<b>CO<sub>2</sub>-Emissionen</b>			
Emittiertes fossiles CO <sub>2</sub>	0,765	0,077	0,155
Emittiertes biogenes CO <sub>2</sub>	0,062	0,006	0,014
<b>Netto emittiertes fossiles CO<sub>2</sub> abzüglich CO<sub>2</sub>-Senke</b>	<b>0,765</b>	<b>0,021</b>	<b>0,155</b>

Agora Industrie, FutureCamp, Wuppertal Institut und Ecologic Institut (2022)

Tonne Grundstoff mit der Klimaschutztechnologie im Vergleich zur Referenzanlage und der dadurch erreichten CO<sub>2</sub>-Minderung. Für die folgenden Berechnungen gehen wir dabei von der konservativen Annahme eines *Retrofit* aus, da sich daraus höhere Mehrkosten bei den Investitionen ergeben.

Die zu erwartenden Minderungskosten definieren den Vertragspreis, der als Grundlage zur Berechnung der Klimaschutzprämie dient und dessen Zahlung die Mehrkosten einer Produktion mit der Klimaschutztechnologie kompensieren muss. Für das Oxyfuel-Verfahren liegt der notwendige Vertragspreis unter den getroffenen Annahmen bei 80 Euro pro Tonne CO<sub>2</sub>, für das E-LEILAC-Verfahren bei 109 Euro pro Tonne CO<sub>2</sub>.

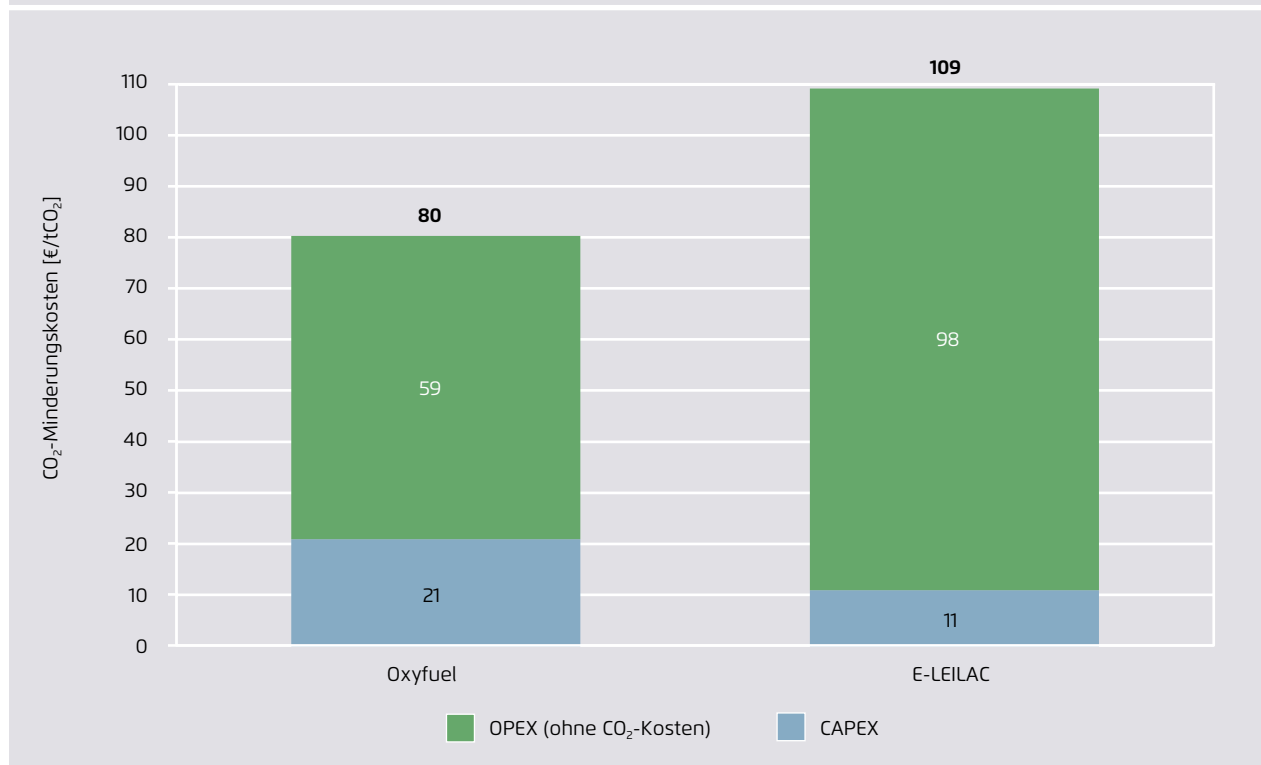
Die CO<sub>2</sub>-Emissionen und -Minderungen, die sich aus den jeweiligen Verfahren und ihrem Vergleich

ergeben, sind in Tabelle 3 zusammengefasst. Abbildung 8 bietet darüber hinaus einen Vergleich der CO<sub>2</sub>-Minderungskosten der Zementklinkerproduktion mit dem Oxyfuel- und E-LEILAC-Verfahren. Die Zahlen errechnen sich aus den jeweiligen Mehrkosten der Produktion im Vergleich zur klassischen Zementklinkerproduktion und den sich daraus ergebenden CO<sub>2</sub>-Minderungen, wie sie in Tabelle 3 aufgeführt werden.

Neben den Investitionskosten für das *Retrofit* eines Zementwerks mit integriertem Oxyfuel- und E-LEILAC-Verfahren sind die Betriebskosten für die Wettbewerbsfähigkeit der Anlage entscheidend. Um den wirtschaftlichen Betrieb einer Anlage sicherzustellen, ist es sinnvoll, diese Mehrkosten über einen Klimaschutzvertrag abzusichern. Für eine geeignete Ausgestaltung eines solchen Vertrages wurden der Einfluss und die Variabilität von verschiedenen

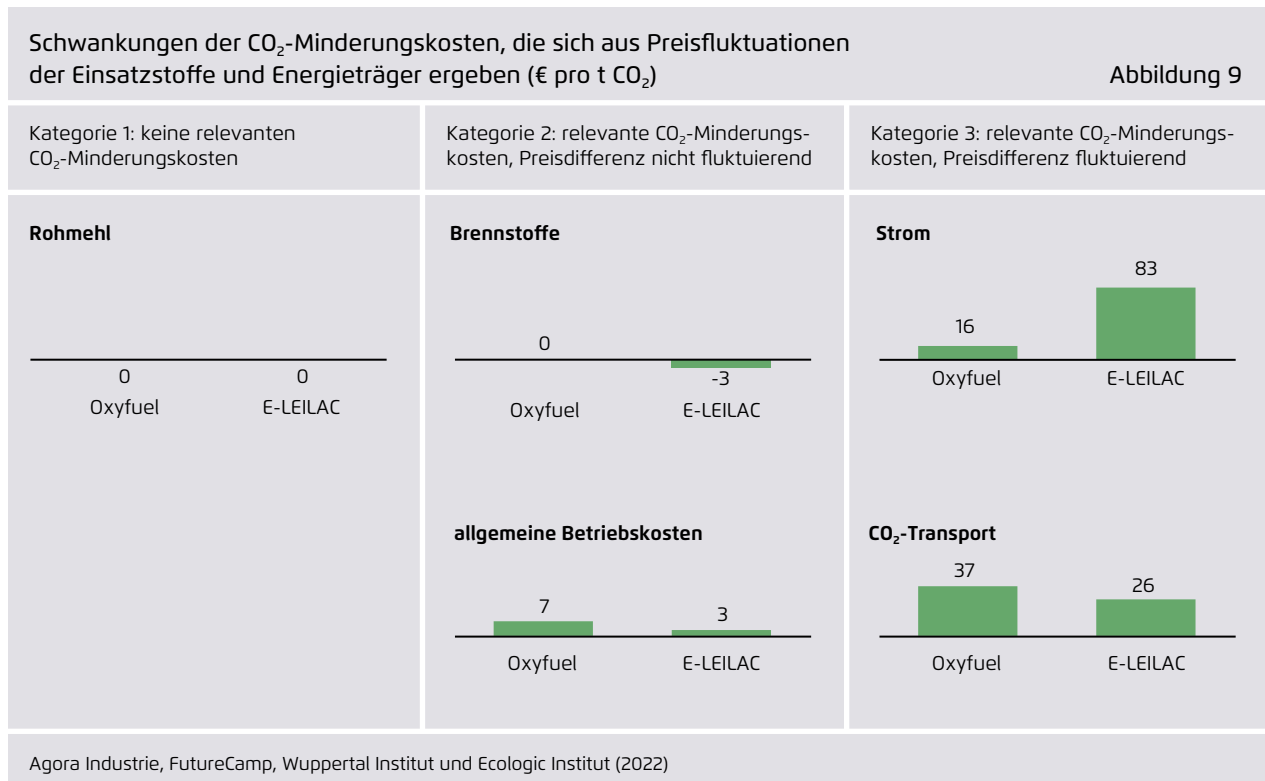
Abschätzung der CO<sub>2</sub>-Minderungskosten gegenüber der Referenzanlage (*Retrofit*)

Abbildung 8



Agora Industrie, FutureCamp, Wuppertal Institut und Ecologic Institut (2022)





Betriebskostenkomponenten auf die CO<sub>2</sub>-Minderungskosten analysiert und die Ergebnisse in Abbildung 9 zusammengefasst. Generell wird zwischen drei Kategorien unterschieden:

**1) Keine relevanten Mehrkosten beim Umstieg von der konventionellen auf eine klimafreundliche Produktion:**

Diese Kostenblöcke sind für die CO<sub>2</sub>-Minderungskosten und damit den Klimaschutzvertrag unbedeutend.

**2) Relevante, aber statische Mehrkosten:**

Diese Kostenblöcke sind für die Definition des Vertragspreises relevant, können aber gut bestimmt und fixiert werden.

**3) Relevante variable Mehrkosten durch Preisschwankungen der Einsatzstoffe:**

Diese Kostenblöcke sind für die Definition des Vertragspreises relevant, können aber nur schwer prognostiziert werden.

Für die Gruppe 3) kann es somit sinnvoll sein, im Rahmen des Klimaschutzvertrages eine Preisindizierung vorzunehmen, um die Risiken einer unerwarteten Über- oder Unterförderung zu vermeiden. Die Notwendigkeit einer solchen Dynamisierung werden wir auf der Basis spezifischer Sensitivitätsbetrachtungen weiter analysieren.

### 4.3 Sensitivitätsbetrachtungen bezüglich fluktuierender Preise

Die in der Kategorie 3 aufgeführten Kostenblöcke unterliegen insbesondere im Bereich der Energieträgerpreise und beim CO<sub>2</sub>-Transport einer relevanten Fluktuation. In den folgenden Sensitivitätsdarstellungen wird visualisiert, wie sich die Schwankung einer spezifischen Kostenkomponente auf die gesamten betrieblichen CO<sub>2</sub>-Minderungskosten auswirkt. So wird ersichtlich, welchen Einfluss die Komponente besitzt.

### 4.3.1 Sensitivität des Strompreises

Wie durch Abbildung 10 visualisiert, hat der Strompreis Einfluss auf die Betriebskosten – insbesondere für das E-LEILAC-Verfahren. Unter der Annahme eines niedrigen Preises von 40 Euro pro Megawattstunde sinken die betrieblichen Minderungskosten im Falle der Oxyfuel-Variante nur gering, jedoch deutlich im Falle der E-LEILAC-Variante. Dabei bleiben die Kosten für E-LEILAC weiterhin signifikant höher. Erst bei einem Strompreis unter 13 Euro pro Megawattstunde wäre E-LEILAC die kostengünstigere Variante.

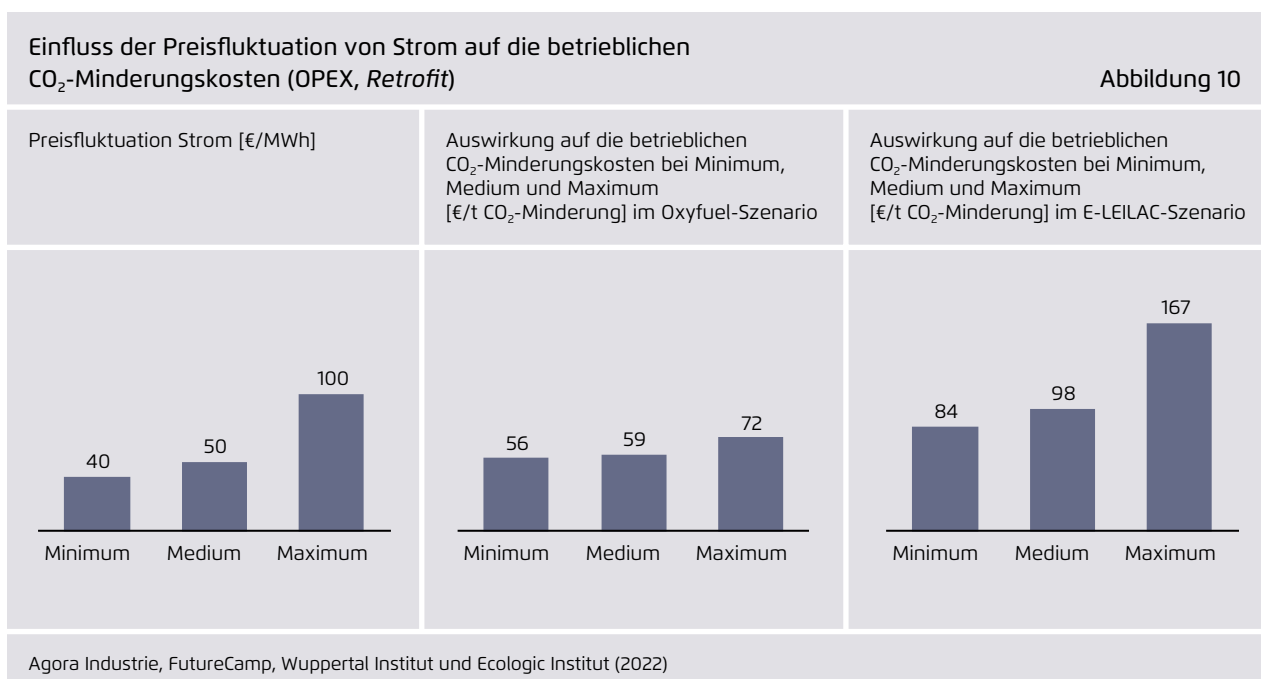
### 4.3.2 Sensitivität der Kosten für CO<sub>2</sub>-Transport und Speicherung

Die Kosten für den CO<sub>2</sub>-Transport und die geologische Einlagerung haben maßgeblichen Einfluss auf die betrieblichen CO<sub>2</sub>-Minderungskosten von CCUS-Anlagen. Die zu erwartenden Preise hängen dabei maßgeblich von der Infrastruktur für den Transport von CO<sub>2</sub> zu den geologischen Lagerstätten sowie der Entfernung zwischen einem Zementwerk und den Lagerstätten ab. Als untere Grenze nehmen wir Kosten von 26 Euro pro Tonne CO<sub>2</sub> für den Transport

mit einer Pipeline an. Für den Transport per Schiff plus Binnentransport bis zum Hafen nehmen wir 36 Euro pro Tonne CO<sub>2</sub> an. Als obere Grenze für den Fall, dass ein Binnentransport über größere Entfernung mit der Bahn erfolgen muss, nehmen wir Kosten von 60 Euro pro Tonne CO<sub>2</sub> an. Wie zu erwarten ist, haben diese Kosten einen großen Einfluss auf die betrieblichen Minderungskosten beider Varianten, wobei die E-LEILAC-Variante aufgrund der niedrigeren CO<sub>2</sub>-Mengen etwas weniger beeinflusst wird.

### 4.3.3 Variation Brennstoffmix

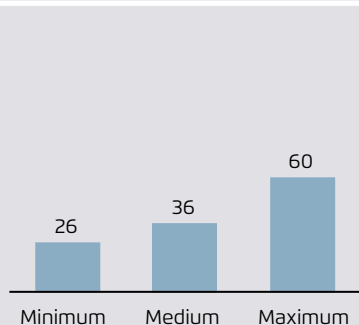
Bislang haben wir die Analyse der CO<sub>2</sub>-Minderungskosten mit der Annahme durchgeführt, dass ein identischer Standardbrennstoffmix sowohl in der Referenzanlage als auch in den Oxyfuel- und E-LEILAC-Varianten verwendet wird. Im Falle von E-LEILAC wird ein Großteil des Brennstoffbedarfes durch die Elektrifizierung am Kalzinator ersetzt und spielt somit eine untergeordnete Rolle. Für die Oxyfuel-Variante stellt sich jedoch die Frage, wie sich die Mehrkosten durch die Wahl verschiedener Brennstoffe beeinflussen lassen.



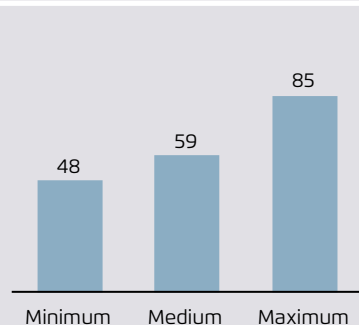
**Einfluss der Preisfluktuation des CO<sub>2</sub>-Transports und -Speicherung auf die betrieblichen CO<sub>2</sub>-Minderungskosten (OPEX, Retrofit)**

Abbildung 11

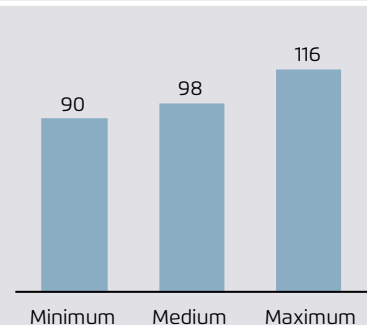
Sensitivität Preis CO<sub>2</sub>-Transport und -Speicherung [€/t CO<sub>2</sub>]



Auswirkung auf die betrieblichen CO<sub>2</sub>-Minderungskosten bei Minimum, Medium und Maximum [€/t CO<sub>2</sub>-Minderung] im Oxyfuel-Szenario



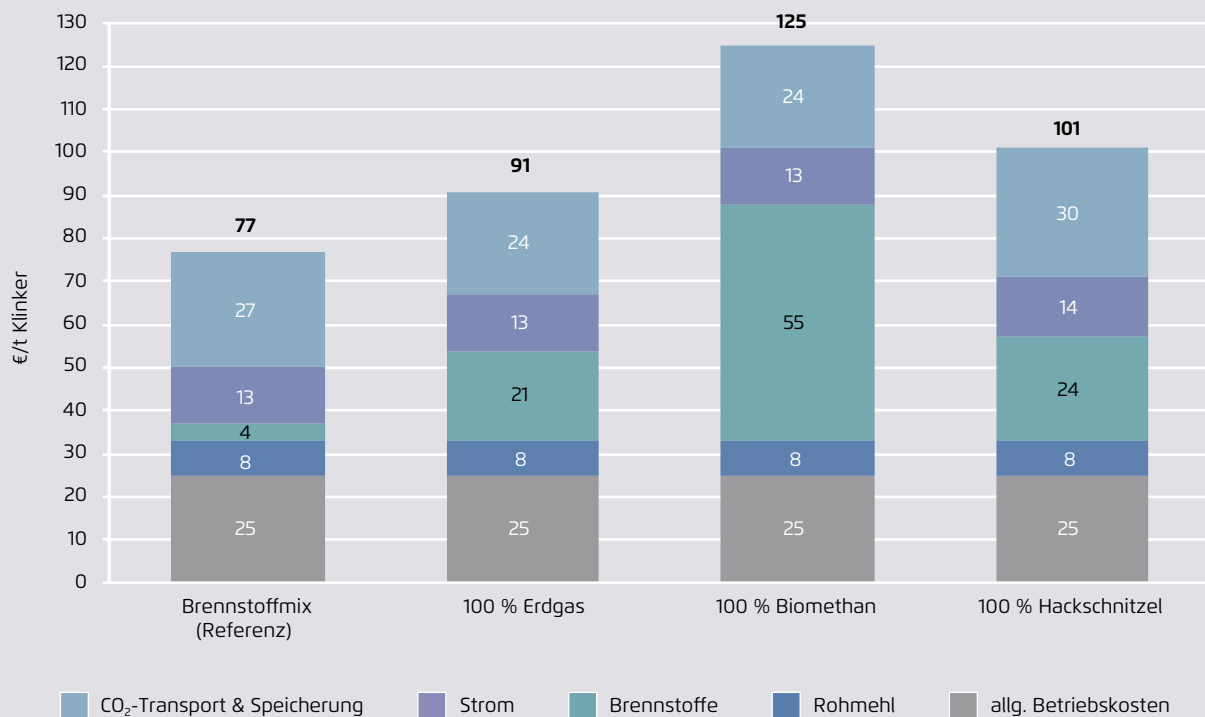
Auswirkung auf die betrieblichen CO<sub>2</sub>-Minderungskosten bei Minimum, Medium und Maximum [€/t CO<sub>2</sub>-Minderung] im E-LEILAC-Szenario



Agora Industrie, FutureCamp, Wuppertal Institut und Ecologic Institut (2022)

**Betriebskosten für verschiedene Brennstoffe pro Tonne Zementklinker für das Oxyfuel-Verfahren**

Abbildung 12



Agora Industrie, FutureCamp, Wuppertal Institut und Ecologic Institut (2022)

Beispielsweise würde ein Wechsel zu Erdgas aufgrund des niedrigeren Emissionsfaktors zu geringeren Emissionen führen als bei üblichen Festbrennstoffen, was die Kosten für CO<sub>2</sub>-Transport und -Lagerung reduzieren kann. Auch für verschiedene biogene Brennstoffe stellt sich die Frage, welcher Mix im Hinblick auf abzuscheidende CO<sub>2</sub>-Mengen im Verhältnis zu den Brennstoffpreisen vorteilhaft ist.

Im Ergebnis zeigt sich, dass die Brennstoffkosten stark variieren (siehe Abbildung 12). Ein Betrieb mit Erdgas ist deutlich teurer als mit dem Standardbrennstoffmix und für Biomethan steigen die Kosten signifikant. Die Kosten für Biomasse sind ebenfalls deutlich höher und vergleichbar mit den Kosten für einen Betrieb mit Erdgas.

Im Gegensatz dazu wirkt sich die Wahl der Brennstoffe nur leicht auf die Kosten für CO<sub>2</sub>-Transport und -Speicherung aus. Für Erdgas und Biomethan fallen die Kosten im Vergleich zum Standardbrennstoffmix zwar um etwa 3 Euro pro Tonne Zementklinker, doch diese Kostenminderung kann die Mehrkosten beim Brennstoff nicht kompensieren. Im Falle der Verwendung von Hackschnitzeln ergeben sich neben höheren Brennstoffkosten auch höhere Kosten für CO<sub>2</sub>-Transport und -Speicherung. Das erklärt sich dadurch, dass der biogene Brennstoff zwar klimaneutral ist, aber im Vergleich zum Standardbrennstoffmix höhere Mengen an (biogenem) CO<sub>2</sub> freisetzt. Dadurch steigen die Mengen an CO<sub>2</sub>, die

transportiert und geologisch gespeichert werden müssen. Nun ergibt sich die Frage, wie sich die Verwendung von biogenen Brennstoffen auf die CO<sub>2</sub>-Minderungskosten auswirkt, wenn die daraus entstehende CO<sub>2</sub>-Senkenleistung betrachtet wird.

#### 4.3.4 Einfluss der CO<sub>2</sub>-Senkenleistung auf die CO<sub>2</sub>-Minderungskosten

Durch den Einsatz von biogenen Brennstoffen in Verbindung mit CCS resultiert neben den CO<sub>2</sub>-Minderungen auch eine CO<sub>2</sub>-Senkenleistung, die in Abbildung 13 für Biomethan und Hackschnitzel im Vergleich zum Standardbrennstoffmix analysiert wird. Die höchsten Einsparungen resultieren bei der Variante mit Hackschnitzeln, da hier eine entsprechend große Menge biogenes CO<sub>2</sub> eingelagert wird. Auf der Basis dieser Werte wurden die CO<sub>2</sub>-Minderungskosten errechnet und sind in der Abbildung 13 visualisiert. Der Vergleich zeigt, dass die spezifischen CO<sub>2</sub>-Minderungskosten in der Variante mit 100 Prozent Hackschnitzel am niedrigsten sind. Die höheren Brennstoffkosten für Hackschnitzel werden durch die insgesamt höhere CO<sub>2</sub>-Minderung, die sich aus der geologischen Speicherung von biogenem CO<sub>2</sub> ergibt, überkompensiert. Voraussetzung für die Umsetzung dieser Variante ist jedoch, dass dieser CO<sub>2</sub>-Senkeneffekt entsprechend anerkannt wird. Dieses Thema wird in Kapitel 6.3 analysiert.

CO<sub>2</sub>-Minderung verschiedener Brennstoffzusammensetzungen in der Variante Oxyfuel gegenüber der Referenzanlage (*Retrofit*)

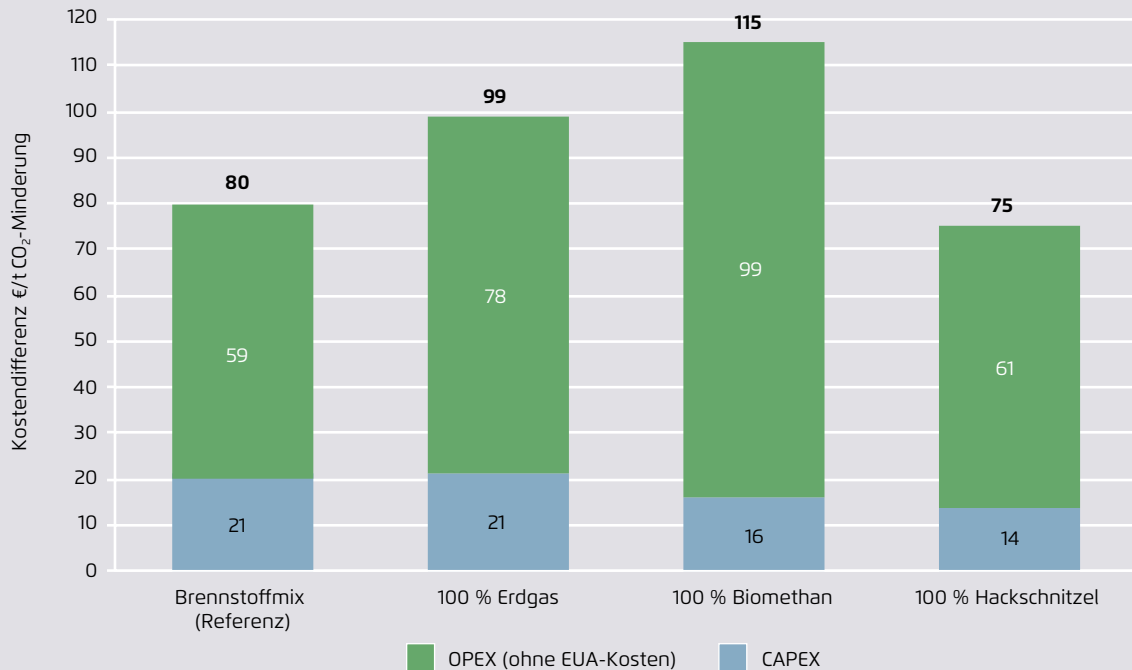
Tabelle 4

CO <sub>2</sub> -Minderung (t CO <sub>2</sub> pro t Klinker)	Brennstoffmix (Referenz)	100 % Erdgas	100 % Biomethan	100 % Hackschnitzel
CO <sub>2</sub> -Minderung fossiles CO <sub>2</sub>	0,69	0,69	0,71	0,71
Abscheidung biogenes CO <sub>2</sub> (BECCS)	0,06	0,00	0,18	0,34
CO <sub>2</sub> -Minderung gesamt (inkl. BECCS)	0,74	0,69	0,89	1,05

Agora Industrie, FutureCamp, Wuppertal Institut und Ecologic Institut (2022)

CO<sub>2</sub>-Minderungskosten verschiedener Brennstoffzusammensetzungen in der Variante Oxyfuel gegenüber der Referenzanlage unter Einbezug des CO<sub>2</sub>-Senkeneffektes

Abbildung 13



Agora Industrie, FutureCamp, Wuppertal Institut und Ecologic Institut (2022)

#### 4.4 Dynamisierung von Klimaschutzverträgen für fluktuierende Mehrkosten

Um mit den hier dargestellten Fluktuationen der Mehrkosten für Strom, dem Transport und der Speicherung von CO<sub>2</sub> sowie dem Brennstoffmix umzugehen, müssen die Zahlungen eines Klimaschutzvertrages unter Umständen entsprechend dynamisiert werden. Dies kann über die Definition von geeigneten Formeln und Preisindizes erfolgen, die in Abstimmung mit dem Vertragspreis durch den Klimaschutzvertrag definiert werden. Auf der Basis des vereinbarten Vertragspreises und der definierten Formeln zur Dynamisierung kann dann jeweils am Ende einer Abrechnungsperiode eine entsprechende Klimaschutzprämie zur Zahlung errechnet werden.

Neben den Anpassungen, die sich aus der Dynamisierung der genannten Betriebskosten ergeben, muss

auch der CO<sub>2</sub>-Marktpreis im Rahmen eines CCfDs auf die Klimaschutzprämie angerechnet werden. Um darüber hinaus die Zahlung eines Klimaschutzvertrages zu bestimmen, muss auch die erreichte CO<sub>2</sub>-Minderung am Ende einer Abrechnungsperiode entsprechend verifiziert werden. Diese Themen werden im Laufe des Kapitels 5 noch eingehender diskutiert.



## 5 Aspekte der Ausgestaltung und Optionen für Klimaschutzverträge

Als Grundlage für die Definition genereller Empfehlungen für die Umsetzung von Klimaschutzverträgen für die Industrietransformation werden in diesem Kapitel spezifische Aspekte der Zementbranche diskutiert. Dabei stehen Fragen der Wechselwirkung mit dem EU-EHS, der Nutzung und Regulierung von BECCS, des Aufbaus einer CCS-Infrastruktur und grüner Leitmärkte und die darauf abgestimmte Dynamisierung der Förderung durch Klimaschutzverträge im Fokus. In der Studie *Klimaschutzverträge für die Industrietransformation: Kurzfristige Schritte auf dem Pfad zur Klimaneutralität der deutschen Grundstoffindustrie* (Agora Industrie, FutureCamp, Wuppertal und Ecologic Institut 2022) werden die übergreifenden Ausgestaltungsaspekte von Klimaschutzverträgen eingehender diskutiert.

### 5.1 Wechselwirkungen der Klimaschutzverträge mit dem EU-EHS

Das System der kostenfreien Zuteilungen von Emissionsrechten wurde im Rahmen des EU-EHS etabliert, um relevante Industrieaktivitäten vor dem Risiko des *Carbon Leakage* zu schützen. Über die kostenfreien Zuteilungen von Emissionsrechten wird der effektive CO<sub>2</sub>-Preis für diese Aktivitäten gesenkt und damit ihre Wettbewerbsfähigkeit im Vergleich zur Produktion in Ländern ohne CO<sub>2</sub>-Preis gestützt. Unter den bestehenden Regularien ist zu erwarten, dass die Vergabe von kostenfreien Zuteilungen an Referenzanlagen in einem äquivalenten Volumen auch den hier diskutierten Klimaschutzanlagen zusteht. Dadurch ergibt sich ein Überschuss an kostenfreien Zertifikaten für den Betrieb der Klimaschutzanlagen, die dem Volumen an verifizierbaren CO<sub>2</sub>-Minderungen entspricht. Über deren Verkauf kann somit ein Teil der Mehrkosten einer CO<sub>2</sub>-armen Produktion kompensiert werden. Somit mindert der

CO<sub>2</sub>-Marktpreis direkt die Mehrkosten einer klimafreundlichen Produktion und muss zur Bestimmung der Klimaschutzprämie angerechnet werden.

Obwohl diese Regelung zur Vergabe von kostenfreien Zuteilungen für den Aufbau der hier diskutierten Klimaschutztechnologien förderlich ist, ergeben sich drei Probleme:

- 1) Nachteile für ressourceneffiziente Strategien:** Da bei äquivalenten kostenfreien Zuteilungen sowohl die Referenztechnologie als auch die klimafreundliche Primärproduktion subventioniert werden und die CO<sub>2</sub>-Kosten bei der Vermarktung von Zement und Beton nicht zum Tragen kommen, sind andere, CO<sub>2</sub>-effizientere Baustoffe oder Strategien der Materialeffizienz benachteiligt.
- 2) Ein nicht nachhaltig hohes Niveau an kostenfreien Zuteilungen:** Die Vergabe von kostenfreien Zuteilungen für Referenz- und Klimaschutzanlagen ist im Rahmen eines sinkenden Gesamtcaps im EU-EHS langfristig nicht nachhaltig. Zudem führt der Verkauf der freiwerdenden Zertifikate durch die so geförderten Klimaschutzanlagen zu einem Überangebot, das an anderer Stelle kompensiert werden muss, um einen Wasserbetteffekt zu vermeiden.
- 3) CO<sub>2</sub>-Senkenleistungen werden unter den vorherrschenden Regeln im EU-EHS nicht gefördert:** Es gibt noch keine Kriterien und Anreize für die Verifizierung und Kompensation von CO<sub>2</sub>-Senkenleistungen, die sich aus der Verwendung nachhaltiger Biomasse in Verbindung mit dem CCS ergeben.

Im Rahmen der von der EU-Kommission vorgestellten Reformvorschläge des *Fit-for-55*-Paketes werden diese Probleme identifiziert und konzeptuell ange-

gangen. Um CO<sub>2</sub>-Senkenleistungen anzureizen, sollen entsprechende CO<sub>2</sub>-Senkenzertifikate (*carbon removal certificates*) entwickelt werden. Der Vorschlag zur Reform des EU-EHS (COM 2021a) sieht weiterhin vor, dass die Regeln zur kostenfreien Zuteilung so angepasst werden, dass innovative Strategien innerhalb und außerhalb des EU-EHS gleichgestellt werden. Dafür sollen Benchmarks für kostenfreie Zuteilungen technologieunabhängig gestaltet werden und somit für Referenz- und Klimaschutzanlagen in einem äquivalenten Volumen vergeben werden, wie es im Falle der Zementklinkerproduktion mit und ohne CCUS auch schon praktiziert wird. Gleichzeitig soll das Volumen an kostenfreien Zuteilungen schneller abschmelzen als bisher vorgesehen, was dazu führen würde, dass der CO<sub>2</sub>-Preis die Referenzkosten einer CO<sub>2</sub>-intensiven Produktion anhebt. Um die daraus entstehenden Nachteile im internationalen Wettbewerb zu kompensieren, soll ein Grenzausgleichsmechanismus (CBAM) eingeführt werden, der auch die Kosten von importierten CO<sub>2</sub>-intensiven Alternativen anhebt. Das würde in der Kombination zu einem Abbau der kostenfreien Zuteilungen und zu einer zunehmend kohärenten Bepreisung der Emissionen aus der Produktion CO<sub>2</sub>-intensiver Grundstoffe führen.

Mit dieser Perspektive zur EU-EHS-Reform werden wir hier die Rolle von Klimaschutzverträgen auf der Basis der existierenden EU-EHS-Regularien diskutieren, um daraus Empfehlungen für ihre Rolle im Rahmen der angestrebten Reform abzuleiten.

Unter den geltenden Regeln für die kostenfreie Zuteilung von Emissionszertifikaten gelten für die Produktion von Zementklinker schon produktspezifische und technologieunabhängige Benchmarks, die in Tabelle 5 zusammengefasst sind.

Die Herstellung von Weißzementklinker hat in Bezug auf die Zuteilungsmenge in Deutschland keine Relevanz.<sup>17</sup> Aus diesem Grund erfolgen alle Berechnungen in dieser Studie auf Basis des Produktbenchmarks für Grauzementklinker. Auf Basis des aktuellen Entwurfs der EU-Kommission hinsichtlich der zu erwartenden Verschärfungen des Benchmarks wird eine jährliche Absenkung von circa 0,64 Prozent angenommen (COM 2021b). Für den Zeitraum 2026–2030 führt das zu einem prognostizierten Benchmark in Höhe von 0,667 EUA pro Tonne Zementklinker. Dieser Wert wurde als Grundlage für die hier angeführten Berechnungen herangezogen.

Da es sich um einen produktspezifischen Benchmark handelt, ist dessen Anwendung auch für Anlagen gegeben, die mit der Oxyfuel- oder E-LEILAC-Technologie für das CCS ausgerüstet sind. Auch eine anteilige Elektrifizierung des Prozesses führt nach aktuellen Regeln zu keiner Kürzung bei der kostenfreien Zuteilung, da bei den Benchmarks für Zementklinker die Austauschbarkeit von

17 Siehe Deutsche Emissionshandelsstelle (DEHSt) 2014: *Ergebnisse der kostenlosen Zuteilung von Emissionsberechtigungen an Bestandsanlagen für die 3. Handelsperiode 2013–2020*

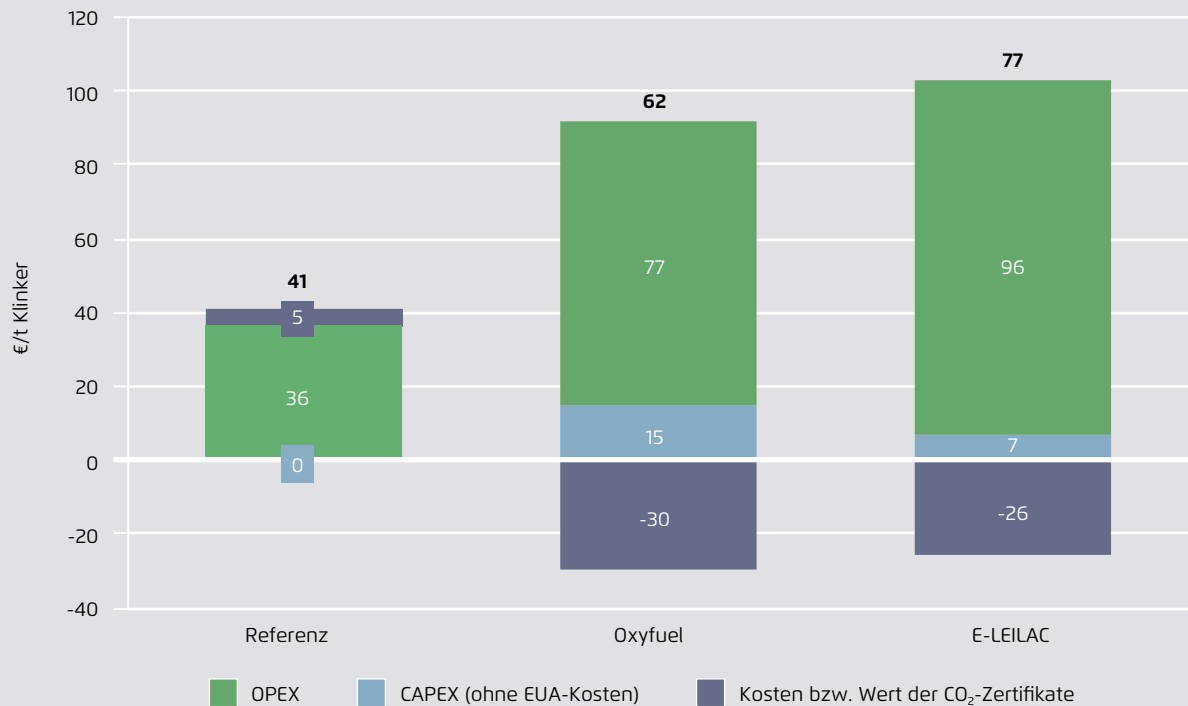
Produktbezogene Benchmarks des europäischen Emissionshandels im Zementsektor			Tabelle 5
	Emissionswerte 2013–2020	Emissionswerte 2021–2025	Prognose Emissionswerte 2026–2030
Grauzementklinker	0,766 EUA/t	0,692 EUA/t	0,667 EUA/t
Weißzementklinker	0,987 EUA/t	0,957 EUA/t	0,957 EUA/t

Agora Industrie, FutureCamp, Wuppertal Institut und Ecologic Institut (2022)



Kostenblöcke für die Erzeugung einer Tonne Klinker für die betrachteten Verfahren unter Berücksichtigung der kostenfreien Zuteilung (*Retrofit*)

Abbildung 14



Agora Industrie, FutureCamp, Wuppertal Institut und Ecologic Institut (2022)

Strom / Brennstoff unberücksichtigt bleibt (COM 2021a). Allerdings ist davon auszugehen, dass umgerüstete Werke dazu beitragen, dass bei zukünftigen Anpassungen der gültigen Benchmarks deutliche Verschärfungen zu erwarten sind, was aber im Rahmen der angestrebten EU-EHS-Reform ohnehin angestrebt wird.

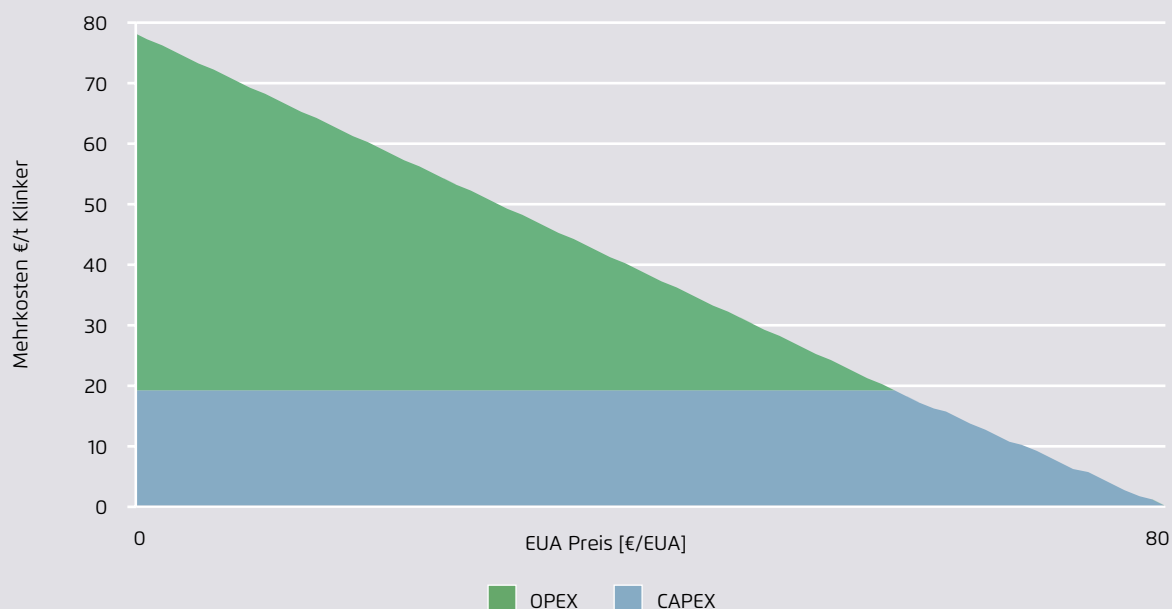
Wie schon definiert, gehen wir für eine Modellierung der Kosten für die Produktion von Zementklinker mit der Referenz- und der jeweiligen Klimaschutztechnologie von äquivalenten kostenfreien Zuteilungen auf der Basis des prognostizierten Produktbenchmarks für 2026–2030 aus. Abbildung 14 visualisiert die Ergebnisse für die Annahme, dass Oxyfuel- und E-LEILAC-Anlagen als *Retrofit* einer existierenden Anlage installiert wurden, was zu entsprechend höheren Kapitalkosten führt. Für die Annahme eines EUA-

Preises in Höhe von 50 Euro/EUA zeigt die Abbildung, dass für die Referenzanlage unter Berücksichtigung der kostenfreien Zuteilung noch effektive CO<sub>2</sub>-Kosten in Höhe von circa 5 Euro pro Tonne Klinker verbleiben. In der Variante Oxyfuel können jedoch Zertifikate im Wert von 30 Euro pro Tonne Klinker verkauft werden. Im Falle von E-LEILAC sind es noch 26 Euro pro Tonne Klinker. Diese Einnahmen tragen somit zur partiellen Deckung der Mehrkosten bei.

Beim angenommenen CO<sub>2</sub>-Preis von 50 Euro verbleiben für die Produktion mit beiden Klimaschutztechnologien Mehrkosten. Im Falle des Oxyfuel-Verfahrens ist die Produktion einer Tonne Klinker noch um 21 Euro teurer als mit der Referenzanlage. Im Falle der E-LEILAC-Anlage betragen die Mehrkosten unter den getroffenen Annahmen 36 Euro pro Tonne Klinker.

Modellierung der Mehrkosten der Klinkerproduktion einer Oxyfuel-Anlage (*Retrofit*) als Funktion des EUA-Preises

Abbildung 15



Agora Industrie, FutureCamp, Wuppertal Institut und Ecologic Institut (2022)

Der Emissionshandel in der heutigen Ausgestaltung kann die Mehrkosten der hier diskutierten Klimaschutztechnologien bei hohen CO<sub>2</sub>-Preisen im Prinzip kompensieren. Unter den getroffenen Annahmen und für günstige Standorte kann ein EUA-Preis über 80 Euro pro Tonne CO<sub>2</sub> die betrieblichen Mehrkosten und die annualisierten Investitionskosten einer Oxyfuel-Anlage kompensieren (siehe auch Abbildung 15). Für E-LEILAC liegen die Kosten unter den getroffenen Annahmen bei 109 Euro pro Tonne CO<sub>2</sub>. Wie eingangs schon diskutiert, liegen die Mehrkosten bei einer Neuinvestitionen (*Greenfield*) etwas niedriger. In diesem Fall kann ein EUA-Preis von 71 Euro pro Tonne CO<sub>2</sub> die betrieblichen Mehrkosten und die annualisierten Mehrkosten für die Investition einer Oxyfuel-Anlage kompensieren. Für E-LEILAC wäre in dieser Perspektive ein EUA-Preis von 102 Euro pro Tonne CO<sub>2</sub> nötig.

Zu guter Letzt könnte man auch davon ausgehen, dass die Investitionskosten für das *Retrofit*, bezie-

ungsweise die Mehrkosten für die Ausstattung einer Neuinvestition mit der Oxyfuel- oder E-LEILAC-Technologie direkt bezuschusst werden.<sup>18</sup> In diesem Fall kämen nur betriebliche Mehrkosten zum Tragen. Die daraus entstehenden betrieblichen CO<sub>2</sub>-Minderungskosten einer Oxyfuel-Anlage lassen sich durch einen EUA-Preis von 59 Euro pro Tonne CO<sub>2</sub> kompensieren. Im Falle der E-LEILAC-Technologie wäre ein EUA-Preis von 98 Euro nötig, um betriebliche Mehrkosten zu decken.

Auf der Basis der hier diskutierten Perspektiven zeigt sich, dass die Anwendung von CCUS zur Minderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen in der Produktion von Zementklinker mit Minderungskosten von 71 bis 109 Euro relativ kostengünstig ist, und sich im Rahmen der existierenden Regularien und CO<sub>2</sub>-Preise im EU-EHS

<sup>18</sup> Im Rahmen des Transformationskostenrechners ist es möglich, die Auswirkungen eines anteiligen Investitionskostenzuschusses zu modellieren.

im Prinzip abbilden lässt.<sup>19</sup> Um diese Investitionen kurzfristig auch umzusetzen, müssen zusätzliche Politikinstrumente zur Absicherung der CO<sub>2</sub>-Marktpreise und damit der Mehrkosten bei der Investition und dem Betrieb dieser Anlagen etabliert werden. Klimaschutzverträge stellen dafür ein geeignetes Instrument dar, müssen aber mit der angestrebten Reform des EU-EHS und eventuell verfügbaren Instrumenten zur Kapitalkostenförderung abgestimmt werden.

Im weiteren Verlauf dieser Studie werden wir diese Aspekte weiter ausleuchten. Um den Rahmen der Diskussion nicht zu sprengen, konzentrieren wir uns dabei auf das Oxyfuel-Verfahren als *Retrofit* zu bestehenden Anlagen. Oxyfuel bietet gegenüber dem E-LEILAC-Verfahren den Vorteil,<sup>20</sup> dass ein Einsatz von BECCS erfolgen kann, was es uns erlaubt, auch die Möglichkeit einer klimapositiven Zementklinkerproduktion zu diskutieren.

Um die Auswirkungen der herrschenden Regeln für kostenfreie Zuteilungen auf den Aufbau und Betrieb des Oxyfuel-Verfahrens zu analysieren, werden der Zusammenhang von Mehrkosten bei der Produktion, die impliziten CO<sub>2</sub>-Minderungskosten und der Effekt des EUA-Preises in Abbildung 15 grafisch dargestellt.

Die Unterschiede bei den CAPEX-Kosten sind unabhängig vom CO<sub>2</sub>-Preis. Die OPEX-Kosten zeigen jedoch einen linearen Zusammenhang mit dem EUA-Preis. Sofern sowohl die Mehrkosten bei CAPEX als auch OPEX Bestandteil eines Klimaschutzvertrags werden, liegt der Schwellenwert zu

negativen Differenzkosten in Bezug auf den CO<sub>2</sub>-Marktpreis bei 80 Euro/EUA.

Dieser Vertragspreis wäre in diesem Fall identisch mit den CO<sub>2</sub>-Minderungskosten, die sich aus dem Vergleich der Produktionskosten von Referenz- und Oxyfuel-Anlage ergeben. Sofern sich der Klimaschutzvertrag ausschließlich auf die Betriebskosten beschränkt, reduziert sich der Vertragspreis auf 59 Euro/EUA. Auf der Basis dieser Ausgangssituation haben wir drei Szenarien für die Ausgestaltung von Klimaschutzverträgen in Bezug auf das EU-EHS identifiziert, die im Folgenden dargestellt werden.

### 5.1.1 CCfD im Falle von äquivalenten kostenfreien Zuteilungen

Im Gegensatz zu anderen Branchen wie zum Beispiel der Stahlbranche (Agora Energiewende, Future-Camp, Wuppertal Institut und Ecologic Institut 2021) werden in der Zementindustrie die hier diskutierten Referenz- und Klimaschutztechnologien mit einem äquivalenten Volumen an kostenfreien Zuteilungen bedacht. Dies führt im Falle von CCUS in der Produktion von Zementklinker zu einem Überschuss an Zertifikaten. Über deren Verkauf entstehen Einnahmen, die die Mehrkosten einer CO<sub>2</sub>-armen Produktion teilweise oder ganz kompensieren. Diese Einnahmen müssen auf den im Klimaschutzvertrag definierten Vertragspreis angerechnet werden, um damit die zu zahlende Klimaschutzprämie zu berechnen. Diese Variante wird durch Abbildung 16 visualisiert. Im vorliegenden Fall kompensieren die kostenfreien Zuteilungen einen Teil der Mehrkosten einer CO<sub>2</sub>-armen Produktion. Somit ergibt sich ein Differenzkostenvertrag (CCfD), bei dem sich der CO<sub>2</sub>-Marktpreis direkt auf die Berechnung der Klimaschutzprämie auswirkt. Da wir uns in dieser Perspektive auf die Kompensation der Mehrkosten für die Investition und den Betrieb der Anlage<sup>21</sup> über Klimaschutzver-

19 Die Preise im EU-EHS sind seit November 2021 stark gestiegen und liegen teilweise deutlich über 80 € pro Tonne CO<sub>2</sub>. Die weitere Marktentwicklung bleibt jedoch unklar und birgt weiterhin ein relevantes Preisrisiko.

20 Im Prinzip kann auch eine LEILAC-Anlage mit BECCS ausgestattet werden. Das würde allerdings die Kombination mit einer Oxyfuel-Anlage oder einer Aminwäsche für das *Post-combustion*-CCS erfordern. Diese Konfiguration wird in dieser Studie nicht betrachtet.

21 Die Mehrkosten bei Investitionen und beim Betrieb von Klimaschutzanlagen sind ökonomisch unterschiedlich zu bewerten. Es kann somit sinnvoll sein, höhere

träge fokussieren, müssten diese einen Vertragspreis in der Größenordnung von 80 Euro pro Tonne CO<sub>2</sub> bieten, um den Aufbau und Betrieb einer Oxyfuel-Anlage abzusichern. Wie im Rahmen der Sensitivitätsanalysen in Kapitel 4 dargelegt, kann dabei eine Dynamisierung des Vertragspreises über die Indizierung der Mehrkosten, die sich aus den Preisen für Brennstoffmix und Strom wie auch den Transport und die Speicherung von CO<sub>2</sub> ergeben, sinnvoll sein. Dabei ist es wichtig, den Umgang mit möglichen Schwankungen der Betriebskosten vorab korrekt vertraglich festzulegen.

Vor allem für den Transport und die Speicherung, oder aber Verwendung, von CO<sub>2</sub> kann es dabei sinnvoll

Investitionen über direkte Zuschüsse zu fördern und Klimaschutzverträge auf die Förderung der betrieblichen Mehrkosten zu fokussieren. Im Falle der vorliegenden CCUS-Technologien sind die Mehrkosten bei der Investition zur Nachrüstung oder zum Aufbau einer neuen Anlage jedoch gering und können damit auch innerhalb des Klimaschutzvertrages finanziert werden.

sein, sich auf geeignete Verträge für den Einkauf dieser Dienstleistung zu beziehen.<sup>22</sup>

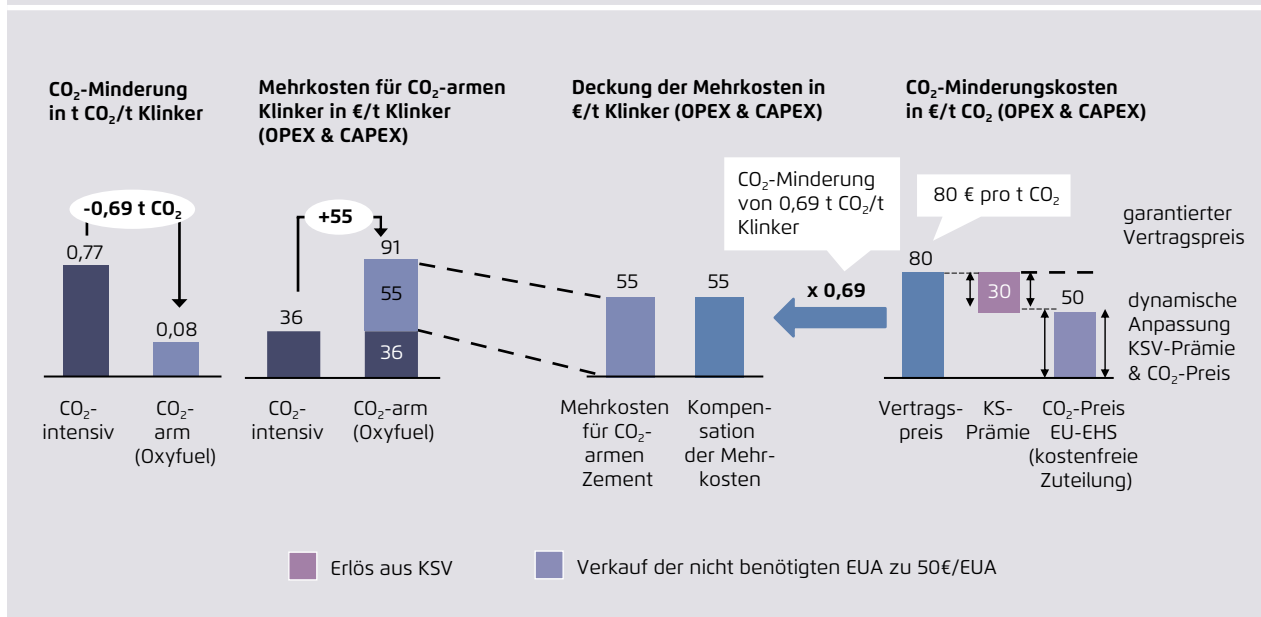
Wenn nur die Differenzkosten über den Klimaschutzvertrag kompensiert werden und die kostenfreien Zuteilungen für den Anlagenbetreiber erhalten bleiben, korreliert der Finanzierungsbedarf sehr stark mit dem EUA-Preis. Ab einem nachhaltigen EUA-Preis von 80 Euro/EUA wäre die Oxyfuel-Variante unter den getroffenen Annahmen durch die Einnahmen aus dem Verkauf der kostenfreien Zertifikate im Vergleich zur Referenztechnologie ökonomisch attraktiver und würde sich am Markt durchsetzen.

Werden kostenfreie Zuteilungen, wie hier illustriert, jedoch weiterhin als *Carbon-Leakage*-Instrument und damit auch als strukturelles Finanzierungsele-

22 Es ist zu erwarten, dass die Anbieter dieser Dienstleistung ebenfalls Interesse an einem langfristigen Vertrag haben, um ihre Investitionen abzusichern. Dieser Vertrag kann auch als Referenz für die Definition des Klimaschutzvertrages und seinen Vertragspreis dienen.

CCfD zur Förderung betrieblicher Mehrkosten (OPEX) des Oxyfuel-Verfahrens im Falle einer äquivalenten Zuteilung (*Retrofit*)

Abbildung 16



Agora Industrie, FutureCamp, Wuppertal Institut und Ecologic Institut (2022)

ment für Klimaschutzanlagen definiert, so steht dies im Konflikt mit dem Ziel, kostenfreie Zuteilungen im EU-EHS abzubauen.<sup>23</sup>

Ein weiteres Problem bei der Vergabe von kostenfreien Zuteilungen für CO<sub>2</sub>-intensive Prozesse, aber auch der Förderung einer CO<sub>2</sub>-armen Primärproduktion besteht darin, dass daraus Wettbewerbsnachteile für Strategien der ressourceneffizienten Kreislaufwirtschaft erwachsen. Um diese Marktverzerrungen auszuräumen, müssen Klimaschutzverträge in Synergie mit einer geeigneten Reform des EU-EHS und der Instrumente zur Vermeidung des *Carbon Leakage* implementiert werden. Eine Möglichkeit dafür ist, die Praxis der kostenfreien Zuteilungen beizubehalten, dann aber mit einer geeigneten Klimaumlage auf die Verwendung von CO<sub>2</sub>-intensiven Grundstoffen, wie zum Beispiel Zementklinker, sicherzustellen, dass der Marktpreis des Produktes durch den CO<sub>2</sub>-Preis ansteigt. Zudem müssen geeignete Kriterien und Anreize für eine grüne Vermarktung der Produkte etabliert werden. Diese Aspekte werden in Kapitel 7 vertiefend diskutiert.

Alternativ könnte der KSV auch so gestaltet sein, dass die kostenfreie Zuteilung abgetreten werden muss. In diesem Fall muss unabhängig vom EUA-Preis die volle Prämie über den KSV abgedeckt werden. Diese Option hat den Vorteil, dass die durch die Klimaschutzinvestitionen freiwerdenden Zertifikate dem Markt entzogen werden und, dass damit der Wasserbetteffekt vermieden wird.<sup>24</sup>

Die hier vorgestellte Ausgestaltungsvariante ist nochmals in der Abbildung 17 als Szenario 1) dargestellt. Da es der vorherrschenden Praxis entspricht,

stellt dieses Szenario auch den Ausgangspunkt für die Diskussion der Reform des EU-EHS und der Einführung eines CBAM dar, welche wir im Folgenden diskutieren werden.

### 5.1.2 Einführung eines CBAM und Wegfall der kostenfreien Zuteilungen

Dieses Szenario beleuchtet die Auswirkungen der Einführung einer graduellen Minderung des Volumens der kostenfreien Zuteilungen in Abstimmung mit der Einführung eines Grenzausgleichsmechanismus (*Carbon Border Adjustment Mechanism, CBAM*), wie er von der EU-Kommission im Rahmen des *Fit-for-55-Packages* vorgeschlagen wurde.

Der derzeitige Vorschlag der EU-Kommission sieht eine graduelle Einführung des CBAM ab Januar 2026 vor. Eine Übergangszeit von drei Jahren ab dem Jahr 2023 soll es Unternehmen ermöglichen, sich an die neuen Anforderungen anzupassen und die notwendigen Regularien zu implementieren. Zunächst soll der CBAM auf ein limitiertes Portfolio an Produkten angewendet werden. Dieses umfasst neben Stahl, Aluminium und Düngemitteln auch Zement und Klinker. Ab 2026 würde nach diesem Vorschlag der CBAM schrittweise um 10 Prozent pro Jahr in Bezug auf die spezifischen Emissionen der Produkte eingeführt, und zwar umgekehrt proportional zum Auslaufen der jeweils kostenfreien Zuteilungen. Das heißt, dass die Sektoren im Jahr 2030 effektiv 50 Prozent und im Jahr 2035 100 Prozent der Emissionskosten zahlen müssen, was jeweils durch die Szenarien 2) und 3) in der Abbildung 17 visualisiert wird.

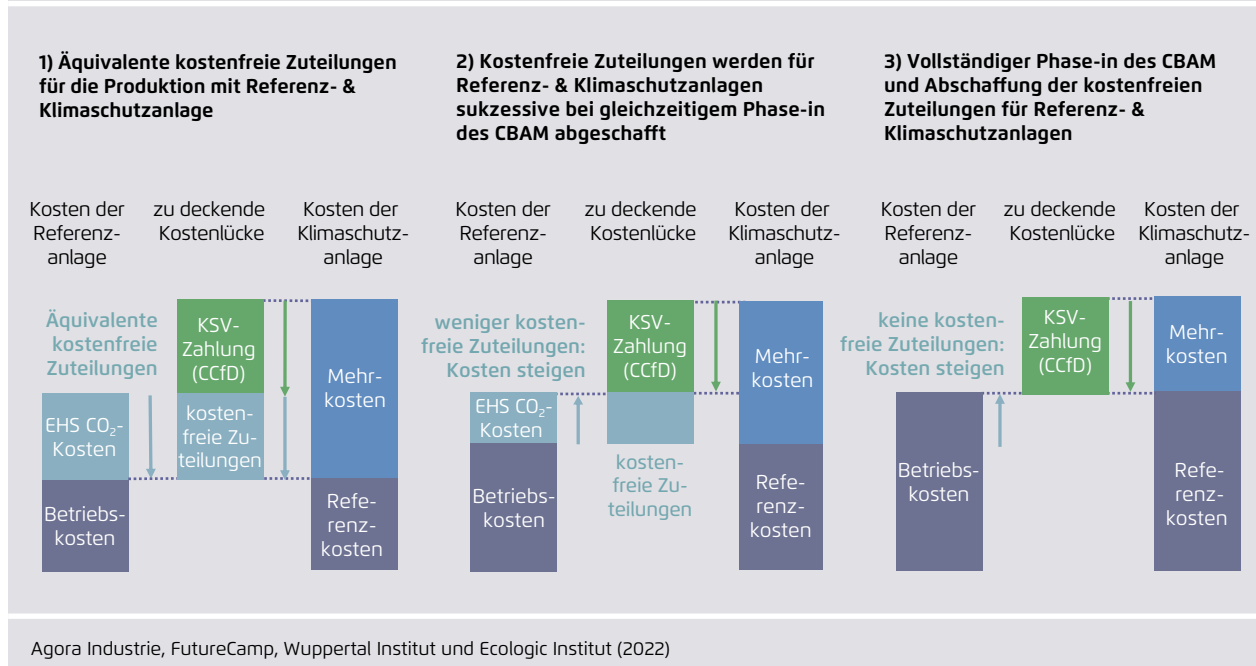
Da im Fall der Zementbranche äquivalente kostenfreie Zuteilungen für Referenz- als auch die Klimaschutztechnologie vergeben werden, verringern sich diese Zuteilungen auch in äquivalenter Form bei gleichzeitigem *Phase-In* des CBAM. Das bedeutet, dass bei sukzessiver Verringerung der kostenfreien Zuteilungen die Referenzkosten der Produktion mit der konventionellen Technologie steigen. Gleichzeitig sinkt aber auch das Volumen der kostenfreien Zutei-

23 Im Rahmen der Definition des *Cross-Sectoral-Correction-Faktors* wurde festgelegt, dass der Anteil der kostenfreien Zuteilung für die Industrie einen Anteil von -43 Prozent am EU-EHS-Gesamtcap nicht übersteigen darf.

24 Unter Umständen kommt es jedoch zu Wechselwirkungen mit der *Market Stability Reserve (MSR)* des EU-EHS.

Szenarien zur Ausgestaltung von Klimaschutzverträgen als Funktion verschiedener Regeln für kostenfreie Zuteilungen

Abbildung 17



lungen, welches von Klimaschutzanlagen zur Deckung ihrer Mehrkosten veräußert werden kann. Bei einem adäquaten Design muss man davon ausgehen, dass sich diese Effekte in der Summe kompensieren. Somit ergibt sich äquivalent zum Szenario 1 im Prinzip ein CCfD, bei dem der CO<sub>2</sub>-Preis direkt auf die Referenzkosten und die Einnahmen der Klimaschutzanlage einwirkt. Auch im Rahmen einer jährlichen Abrechnung kann somit der CO<sub>2</sub>-Preis im Prinzip direkt auf den Vertragspreis angerechnet werden, um damit die Klimaschutzprämie zu bestimmen.

Jedoch ist auch bei einer Einführung des CBAM und der damit verbundenen Abschaffung der kostenfreien Zuteilungen nicht garantiert, dass dadurch ein CO<sub>2</sub>-Preis in einer Höhe entsteht, der die vollen Mehrkosten der Produktion mit dem Oxyfuel-Verfahren nachhaltig kompensieren kann. Daher bleiben Klimaschutzverträge auch im Rahmen der angestrebten Einführung eines CBAM ein unerlässliches Instrument, um die Transformation der Zementbranche abzusichern. Dabei ist es wichtig, dass

Klimaschutzverträge zügig implementiert werden, um die notwendigen Investitionen unabhängig von der komplexen politischen Diskussion zur Definition eines CBAM anzuschieben.

Die Flexibilität der Klimaschutzverträge in Bezug auf unvorhersehbare regulatorische Entwicklungen bei der Reform des EU-EHS und den Auswirkungen auf den CO<sub>2</sub>-Marktpreis sowie der Einführung des CBAM muss dabei ein zentrales Merkmal ihrer Ausgestaltung sein.

Darüber hinaus spielt auch die Möglichkeit ihrer Dynamisierung in Bezug auf die Entwicklung des CO<sub>2</sub>-Preises wie auch der Kosten von Betriebsmitteln eine zentrale Rolle.

### 5.1.3 Überblick der Szenarien zur Umsetzung von Klimaschutzverträgen

Um einerseits das Ziel einer zügigen Umsetzung von Klimaschutzverträgen durch Mitgliedstaaten, andererseits aber auch ihre Kompatibilität mit

zukünftigen Entwicklungen der EU-Klimapolitik in Bezug auf EU-EHS-Reform und CBAM sicherzustellen, stehen die vorgestellten Szenarien als Optionen zur Diskussion (vgl. Abbildung 17).

Szenario 1) erlaubt die kurzfristige Umsetzung von Klimaschutzverträgen für die CO<sub>2</sub>-arme Zementklinkerproduktion im Rahmen der geltenden Zuteilungsregeln. Dabei werden die Mehrkosten der CO<sub>2</sub>-armen Produktion durch eine Kombination von kostenfreien Zuteilungen und einer Klimaschutzprämie getragen, die in der Summe den Vertragspreis ergeben. Da der CO<sub>2</sub>-Marktpreis in diesem Szenario direkt den Wert der von einer Klimaschutzanlage veräußerbaren kostenfreien Zuteilungen bestimmt, handelt es sich hier im Prinzip um einen Differenzkostenvertrag.<sup>25</sup>

Szenario 2) illustriert einen Zwischenschritt für die von der EU-Kommission angestrebte Einführung eines CBAM bei gleichzeitiger Absenkung der kostenfreien Zuteilungen. Da sich der Prozess in einem Zeitraum von zehn Jahren zwischen 2026 und 2035 abspielen soll, müssen die Referenzkosten und der Wert der kostenfreien Zuteilungen für jedes Jahr entsprechend berechnet werden. Die Grafik für das Szenario 2) in der Abbildung 17 steht somit exemplarisch für die Situation im Jahre 2030.

Szenario 3) stellt schließlich den Endpunkt dieser Entwicklung dar. In einer Situation, in der es keine kostenfreien Zuteilungen mehr gibt, beeinflusst der CO<sub>2</sub>-Marktpreis direkt die Referenzkosten. Nun ergibt sich für den CCfD wiederum die Ausgestaltung

als klassischer CCfD in direkter Abhängigkeit vom CO<sub>2</sub>-Marktpreis.

In dieser Situation ist nun auch sichergestellt, dass eine CO<sub>2</sub>-intensive Produktion in der Referenzanlage den CO<sub>2</sub>-Marktpreis komplett internalisiert. Der Preis für Zementklinker würde sich dadurch bei einem angenommenen EUA-Preis von 50 Euro pro Tonne CO<sub>2</sub> in etwa verdoppeln, bei 100 Euro verdreifachen. Der höhere Preis für diesen CO<sub>2</sub>-intensiven Rohstoff wäre ein idealer Anreiz für Strategien der Substitution durch klimafreundliche Baustoffe wie auch Strategien der ressourceneffizienten Kreislaufwirtschaft.

Solange der CO<sub>2</sub>-Marktpreis unterhalb der CO<sub>2</sub>-Minderungskosten der hier diskutierten Klimaschutztechnologien liegt oder wieder darunterfallen kann, ist es wichtig, diese Kosten durch einen Klimaschutzvertrag abzusichern, aber gleichzeitig auch eine Nachfrage und Zahlungswilligkeit für CO<sub>2</sub>-armen Zement im Rahmen von grünen Leitmärkten zu generieren.

## 5.2 Klimaschutzverträge zum Aufbau grüner Leitmärkte

Die Transformation der Zementklinkerproduktion ist ein notwendiger und dringender Schritt, um öffentlichen und privaten Verbrauchern den Aufbau und Kauf von klimafreundlichen Infrastrukturinvestitionen und Immobilien zu ermöglichen. Die Entwicklung einer steigenden Nachfrage nach klimafreundlichen Zementprodukten birgt die Chance, diese als internationalen Standard zu definieren und damit den Einstieg in die Transformation der globalen Zementbranche zur Klimaneutralität anzureizen.

Die Transformation der Zementbranche ist jedoch mit Herausforderungen verbunden, die allein auf der Basis einer beginnenden und unsicheren Nachfrage nach klimafreundlichem Zement kaum zu bewältigen sind. Neben den schon angeführten Transformationskosten muss dabei auch die geringe Marktmacht und regionale Struktur der Zementbranche betrachtet

25 Wir gehen dabei aber nicht davon aus, dass es im Rahmen eines solchen Vertrages zur Rückzahlung kommt, falls der CO<sub>2</sub>-Marktpreis den Vertragspreis übersteigt. In diesem Fall wäre eine Produktion mit der Klimaschutztechnologie günstiger als mit einer Referenzanlage. Dadurch verlieren die Referenzkosten als Grundlage zur Berechnung des Vertragspreises ihre preissetzende Funktion und der Marktpreis für CO<sub>2</sub>-armen Zement sinkt mit der zunehmenden Wettbewerbsfähigkeit dieser Technologie und den daraus erwachsenden marktgetriebenen Investitionen. Dieser Aspekt wird in Kapitel 7 diskutiert.

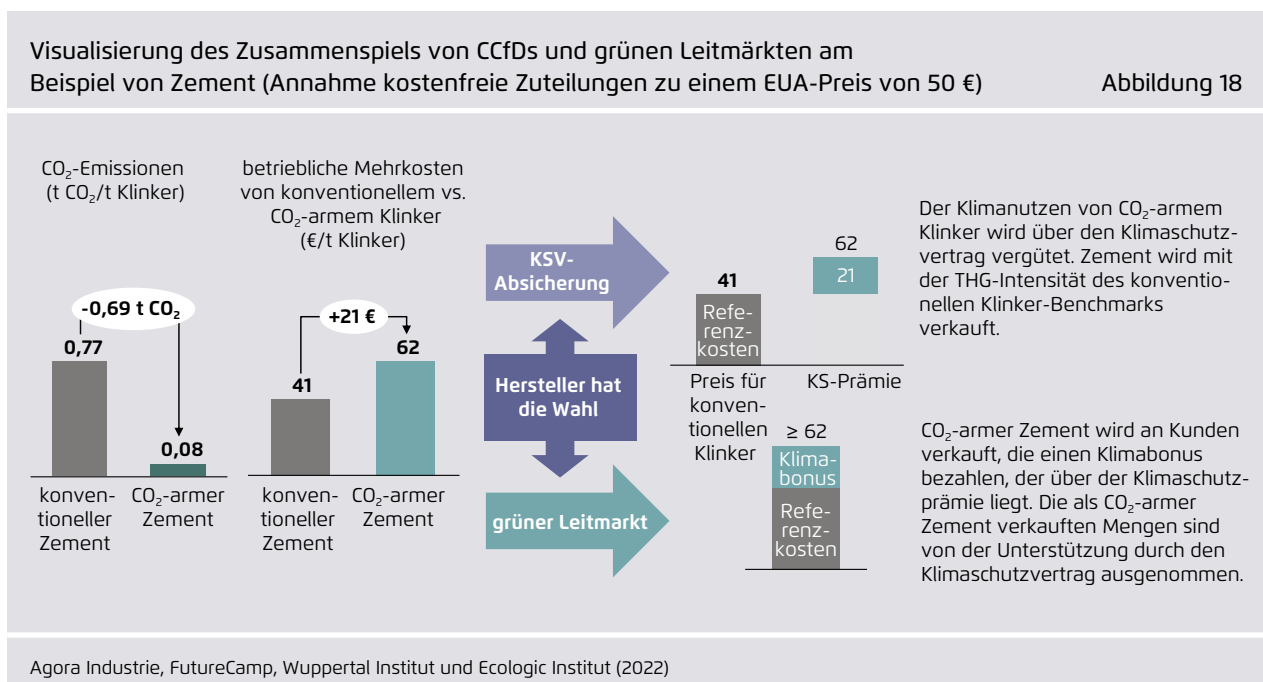
werden. Zementprodukte stellen einen Grundstoff mit geringer Produktdifferenzierung dar, der von zahlreichen, in der Regel kleinen und mittleren Unternehmen regional eingekauft und verarbeitet wird. Dieser Mangel an Differenzierung an der Basis regionaler Wertschöpfungsketten erschwert es, höhere Preise für klimafreundliche Produktalternativen über ein oft sehr diversifiziertes Kundenportfolio zu rechtfertigen.

Klimaschutzverträge, mit denen die Mehrkosten einer klimafreundlichen Produktion abgesichert werden, sind ein ideales Instrument, um ein erstes Angebot an klimafreundlichen Zementprodukten zu schaffen. Mit diesem Angebot und in Kooperation mit progressiven Unternehmen der Bauindustrie ergibt sich für Zementproduzenten die Möglichkeit, die entsprechende Nachfrage und Zahlungsbereitschaft zu entwickeln. Zudem bieten Klimaschutzverträge eine erste Referenz für die Definition von klimafreundlichen Zementprodukten, damit diese auch gezielt als Mehrwert für die Vermarktung von Immobilien sowie beim Bau von klimafreundlicher Infrastruktur genutzt werden können.

Um Sicherheit für transformative und zukunftsfähige Investitionen zu bieten und gleichzeitig die Nachfrage nach klimafreundlichem Zement zu fördern, müssen Klimaschutzverträge entsprechend konzipiert werden. Unternehmen benötigen die Sicherheit, dass die Mehrkosten einer klimafreundlichen Produktion gedeckt werden, solange diese nicht vom Markt getragen werden. Gleichzeitig benötigen sie die Freiheit, ihre Produkte dann als „klimafreundlich“ zu vermarkten, wenn eine entsprechende Nachfrage und Zahlungsbereitschaft vorhanden sind.

Um beiden Bedingungen gerecht zu werden und die Grundlage für den Aufbau nachhaltiger grüner Leitmärkte zu legen, können Klimaschutzverträge als Absicherungsinstrument konzipiert werden, wie es in der Abbildung 18 dargestellt ist.

Um das hier visualisierte Konzept umzusetzen, werden Klimaschutzverträge als Verkaufsoption ohne feste Lieferverpflichtung gestaltet, was Zementherstellern die freie Wahl der Vermarktungsmethode zusichert. In dieser Form sichern Klimaschutzverträge die Wettbewerbsfähigkeit von Klimaschutzin-





vestitionen ab und bieten den Unternehmen gleichzeitig einen Anreiz, ihre CO<sub>2</sub>-armen Zementprodukte mit einem Klimabonus<sup>26</sup> zu verkaufen, der mindestens gleichwertig mit der angebotenen Zahlung des Klimaschutzvertrags ist oder über diese hinausgeht und die Mehrkosten der CO<sub>2</sub>-armen Produktion somit ausgleicht oder gar zu höheren Margen führt.

Um diese Ausgestaltung von Klimaschutzverträgen im Detail zu definieren, muss eine Reihe von Aspekten beachtet werden:

### 1) Eine klare Definition der klimafreundlichen Eigenschaft:

Um sicherzustellen, dass CO<sub>2</sub>-armer Zement sich als werthaltiges Produkt etabliert, muss sein Klimanutzen klar definiert und vermarktet werden. Die Qualität von Zement in Bezug auf das Klima lässt sich durch den Vergleich seiner produktionsspezifischen Emissionen mit dem Benchmark der Referenztechnologie quantifizieren. Aus dieser Definition wird klar, dass es verschiedene Kategorien geben muss, welche die Produkte einer CCUS-basierten Zementklinkerproduktion mit anderen Strategien, wie zum Beispiel der Verwendung von alternativen Bindern zur Produktion von Zement und Beton, vergleichbar machen.

Momentan gibt es verschiedene Initiativen, um diese grüne Eigenschaft zu definieren<sup>27</sup>. Darüber hinaus würde die Definition im Rahmen von Klimaschutzverträgen eine wichtige Referenz für die Entwicklung dieser Konzepte darstellen.

### 2) Eine klare Anrechnung der CO<sub>2</sub>-Minderung:

Für eine nachhaltige Entwicklung der Nachfrage nach CO<sub>2</sub>-armen Zementprodukten muss diese Eigenschaft mit den entsprechenden Mehrkosten auf der Basis von verifizierbaren Daten an den Kunden übertragen werden. Mit diesen Kosten und Daten kann die Bauindustrie ihre Lieferkette managen und die daraus entstehenden CO<sub>2</sub>-Emissionen verifizieren und im Resultat der Bauwerke deklarieren.

Durch einen Klimaschutzvertrag geförderter Zement sollte somit nicht ohne Weiteres als klimafreundliches Produkt vermarktet werden. Solange die Mehrkosten einer klimaneutralen Produktion im Vergleich zur Referenztechnologie über Zahlungen des Klimaschutzvertrages abgegolten werden, muss das daraus entstehende Produkt auch mit der CO<sub>2</sub>-Intensität der Referenztechnologie vermarktet werden. Die Argumente für diese Konzeption wurden im Rahmen der Projektworkshops eingehend diskutiert und werden hier kurz zusammengefasst:

- Der Verkauf von klimafreundlichem Zement, dessen Produktion durch einen Klimaschutzvertrag gefördert wurde, würde zu einem Überangebot ohne zusätzliche Kosten führen. Damit wird die Chance auf die Entwicklung einer Zahlungsbereitschaft, mit der die Mehrkosten einer CO<sub>2</sub>-armen Produktion gedeckt werden können, untergraben.
- Eine doppelte Anrechnung und etwaige Entlohnung der „grünen Eigenschaft“ ist auch aus der Perspektive des EU-Beihilferechts problematisch. Geltendes Recht untersagt die Vermarktung der grünen Eigenschaft und der impliziten CO<sub>2</sub>-Minderung, wenn diese bereits vom Staat oder einer anderen Gesellschaftsgruppe finanziert wurde.
- Durch die momentan noch geltenden Regularien zur kostenfreien Zuteilung von EUA für die CCUS-basierte Zementklinkerproduktion wird die CO<sub>2</sub>-Minderung subventioniert und der klimafreundliche Zement kommt anfänglich zu einem Preis unterhalb der effektiven Mehrkosten an den Markt. Diese Subvention wirkt marktverzerrend, da alternative Strategien der Materialeffizienz und

26 Der Klimabonus bezeichnet den Mehrbetrag, der beim freien Verkauf eines klimafreundlichen Zementprodukts im Vergleich zum konventionellen Produkt erzielt wird.

27 Erste Zertifizierungen zielen auf generelle Kriterien der Nachhaltigkeit in der Zementproduktion, z. B. das *Concrete Sustainability Council* ([www.csc-zertifizierung.de](http://www.csc-zertifizierung.de)). Darüber hinaus gibt es Methoden die Nachhaltigkeit von Gebäuden zu evaluieren, z. B. *The Leadership in Energy and Environmental Design* (LEED) ([www.usgbc.org/leed](http://www.usgbc.org/leed))

Substitution diskriminiert werden. Im Rahmen der geplanten EU-EHS-Reform soll diese Marktverzerrung ausgeräumt werden.

→ Durch eine klare Bepreisung der grünen Eigenschaft über die Absicherung durch den Klimaschutzvertrag erhalten Zementhersteller die Marktmacht, geeignete Preiszuschläge durchzusetzen. Zudem erhalten Bauunternehmen die Gewissheit, dass ihre Bemühungen klimafreundliche Bauwerke mit Mehrwert zu vermarkten, nicht durch subventionierte Alternativen beschädigt werden.

### **3) Verifizierung und Anpassung der Klimaschutzzahlung:**

Auf der Basis der Prinzipien zur Anrechnung und Vermarktung der klimafreundlichen Eigenschaft müssen im Rahmen des Klimaschutzvertrages klare Kriterien definiert werden. Es muss verifizierbar sein, wie der durch den Klimaschutzvertrag geförderte Klinker verkauft wurde. Chargen, die explizit als CO<sub>2</sub>-arm vermarktet wurden, müssen dabei im Rahmen der Abrechnung einer Vertragsperiode vom geförderten Volumen abgezogen werden. Damit sinkt die Zahlung des Klimaschutzvertrages entsprechend und die klimafreundliche Eigenschaft des CO<sub>2</sub>-armen Klinkers wird über die Lieferkette für Zement und Beton an den Kunden weitergereicht.

Zementklinker, für den kein entsprechender Klimabonus erzielt werden kann, muss hingegen nachweislich als konventioneller Klinker verkauft werden. Zur Definition seiner spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen dient dafür der Benchmark, der zur Berechnung des im Klimaschutzvertrag definierten Vertragspreises verwendet wurde.

### **4) Förderung der Nachfrage nach klimafreundlichem Zement:**

Komplementär zur Absicherung der Klimaschutzverträge und dem damit etablierten Angebot an CO<sub>2</sub>-armem Zement muss auch die Nachfrage nach klimafreundlichen Baustoffen gefördert werden. Eine entsprechende Anpassung der Regularien für die öffentliche Beschaffung stellt einen ersten signifi-

kanten Hebel dar. Dabei ist es wichtig, dass die Kriterien und Definitionen für klimafreundlichen Zement in der öffentlichen Beschaffung mit denen des Klimaschutzvertrages abgestimmt werden. Darüber hinaus kann auch die private Nachfrage gefördert werden, indem entsprechende Instrumente für das Monitoring und die Berichterstattung der CO<sub>2</sub>-Emissionen in der Bauwirtschaft etabliert werden, um den Konsumentinnen und Konsumenten damit Transparenz und Entscheidungsmacht zu garantieren. Dabei ist es wichtig, dass klare und überzeugende Produktlabels entwickelt werden, mit denen die komplexen Aspekte der Klimabilanz von Gebäuden wissenschaftlich konsistent, aber einfach und überzeugend kommuniziert werden.

Schließlich muss die Diskussion nach einer Definition von Kriterien und Standards für CO<sub>2</sub>-arme Zementprodukte auch auf internationaler Ebene geführt werden, damit ein transparentes und globales *level playing field* für den Wettbewerb um die Produktion und den Absatz von klimafreundlichen Produkten und Strategien angereizt wird.

Die verschiedenen Aspekte der Entwicklung von grünen Leitmärkten wurden in der Studie *Tomorrow's markets today* (CISL und Agora Energiewende 2021) aufgearbeitet. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass Klimaschutzverträge ein ideales Instrument darstellen, um die Mehrkosten für den Aufbau und Betrieb von Klimaschutzanlagen in der Industrie abzusichern. Damit geben sie der Grundstoffindustrie und ihren Abnehmern die Chance, klimafreundlichen Zement als differenziertes Produkt zu vermarkten und eine breite Produktpalette zu bewerben, die von Wohn- und Gewerbeimmobilien über öffentliche Gebäude bis hin zu Infrastrukturinvestitionen reicht. Wichtig ist es, dabei hervorzuheben, dass sich diese Konzepte nicht auf Europa beschränken, sondern dass sich für europäische Unternehmen die Chance ergibt, diese Konzepte und Technologien auch in anderen Ländern zu etablieren und damit die Entwicklung von globalen Standards für klimaneutrale Zementprodukte und Produktionsanlagen zu schaffen.

### 5.3 Umgang mit CO<sub>2</sub>-Senken

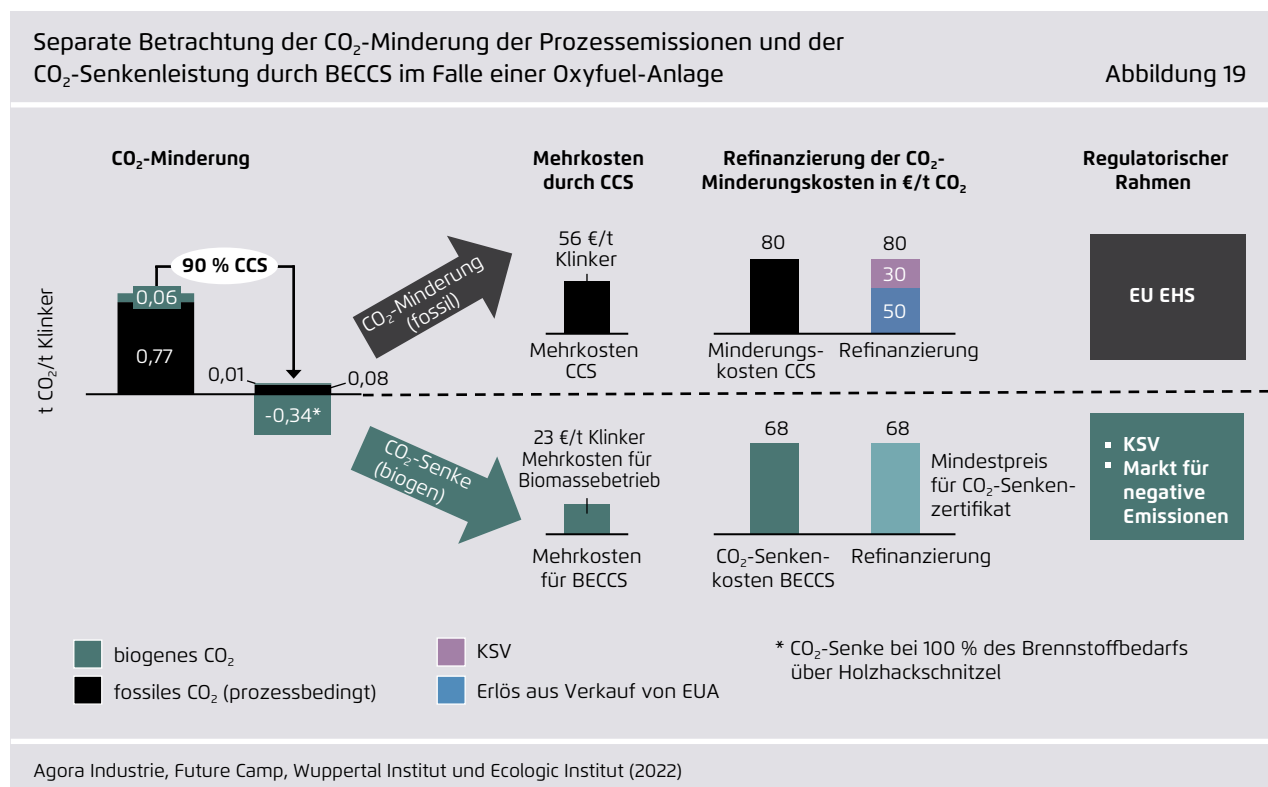
Eine Besonderheit der Oxyfuel-Technologie besteht darin, dass beim Einsatz von nachhaltiger Biomasse als Brennstoff eine Abscheidung von CO<sub>2</sub> mit biogenem Ursprung erfolgt. In diesem Fall übernimmt die Anlage inklusive nachgelagerter Transportkette und Speicherung die Funktion einer CO<sub>2</sub>-Senke. Das bedeutet, das CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre entfernt und eingelagert wird. Bereits bei der in der Referenz hinterlegten Brennstoffzusammensetzung kann dieser Effekt aufgrund des biogenen Kohlenstoffanteils der Sekundärbrennstoffe beobachtet werden. In diesem Fall findet eine Abscheidung und Einlagerung bezogen auf den biogenen Anteil in Höhe von 0,06 Tonnen CO<sub>2</sub> pro Tonne Klinker statt. Sofern man ausschließlich biogene Brennstoffe einsetzt, steigt dieser Anteil im Fall von Biomethan auf 0,18 Tonnen CO<sub>2</sub> pro Tonne Klinker, im Fall von Holzhackschnitzeln<sup>28</sup> auf 0,34 Tonnen CO<sub>2</sub> pro Tonne Klinker. Sobald die eingelagerte Menge an biogenem CO<sub>2</sub> die

verbliebenen fossilen Restemissionen übersteigt, erfüllt die Anlage die Funktion einer CO<sub>2</sub>-Senke.

Im Rahmen des EU-EHS gibt es aktuell keine Möglichkeit, eine solche Konstellation abzubilden. Die geforderten Emissionsberichte ermöglichen weder die Angabe negativer Emission noch den Erhalt entsprechender Zertifikate oder Gutschriften.

Im Rahmen des *Fit-for-55-Packages* hat die EU-Kommission jedoch die Absicht definiert, dass über die Definition von CO<sub>2</sub>-Senkenzertifikaten (*Carbon Removal Units*) Anreize für den Aufbau und Betrieb solcher Anlagen zu schaffen. Dieses Konzept wurde

28 Technisch gesehen würde ein Betrieb mit 100 Prozent Holzhackschnitzeln im Oxyfuel-Verfahren gewisse Anpassungen erfordern, damit an der Primärfeuerung des Drehrohrofens ein Mindestheizwert erreicht wird. Optionen dafür wären die kombinierte Verwendung von Biogas oder eine Aufbereitung der Hackschnitzel zu Pyrolysegas und Pflanzenkohle.



bereits im *Impact Assessment* der EU-Kommission vom September 2020 (COM 2020) diskutiert. Daraus ergab sich die Empfehlung an die EU, einen eigenen Zertifizierungsstandard für Senken zu entwickeln. Über einen solchen Ansatz der Zertifizierung wäre es möglich, CO<sub>2</sub>-Senkenzertifikate für technische Prozesse wie das hier diskutierte BECCS in der Zementklinkerherstellung zu generieren und über ihren Verkauf die daraus erwachsenden Kosten zu decken. Wie im *Impact Assessment* schon erwähnt, könnten solche Senkenzertifikate zur Erfüllung von Abgabeverpflichtungen in der *Effort-Sharing*-Regulation (für Staaten) oder dem EU-EHS (für Anlagenbetreiber) eingesetzt werden. Im letzteren Fall würde das zu einem Vergütungsniveau der Senkenleistung führen, welches dem EUA-Preis entspricht. Als Alternative dazu könnte auch ein unabhängiger internationaler Markt für Senkenzertifikate im Rahmen des Pariser Abkommens entwickelt werden, an dem sich Staaten, aber auch privatwirtschaftliche Akteure<sup>29</sup> beteiligen.

Da es noch nicht abzusehen ist, wann und in welcher Form solche Standards zur Verfügung stehen werden, gehen wir in dieser Studie davon aus, dass der Klimaschutzvertrag die CO<sub>2</sub>-Senkenleistung entsprechend quantifiziert und vergütet. Um den Betreibern eine solide Investitionsgrundlage für einen BECCS-Betrieb ihrer Anlage zu geben, muss dafür der Klimaschutzvertrag entsprechend definiert werden.

In der Abbildung 19 werden für die Berechnung der Mehrkosten durch BECCS nur die durch die Biomasseverwendung entstehenden Mehrkosten betrachtet. Daraus ergeben sich entsprechend geringe Kosten für die CO<sub>2</sub>-Senkenleistung, denn Mehrkosten für Sauerstoff, Strom und den allgemeinen Betrieb wurden schon über die CO<sub>2</sub>-Minderung finanziert.

29 Es ist grundsätzlich möglich, CO<sub>2</sub>-Senkenleistungen in Form von Zertifikaten auch an privatwirtschaftliche Kunden zu vermarkten, die sich dem Ziel der Klimaneutralität verschrieben haben und ihre Emissionen freiwillig kompensieren möchten. Es gibt bereits solche Aktivitäten im unregulierten Markt.

Als Alternative könnte man auch einen größeren Teil der Mehrkosten auf die Senkenleistung abwälzen und somit einen maßgeblichen Teil der Gesamtkosten der Maßnahme über einen Markt für negative Emissionen finanzieren. Für die Modellierung der Szenarien in Kapitel 6 gehen wir davon aus, dass CO<sub>2</sub>-Senken und CO<sub>2</sub>-Minderungen demselben CO<sub>2</sub>-Marktpreis unterliegen.

## 5.4 Zusammenfassende Diskussion zur Dynamisierung von Klimaschutzverträgen

Wie in vorhergehenden Kapiteln dargestellt, ist es schwierig, die effektiven Mehrkosten einer CO<sub>2</sub>-armen Produktion über Jahre hinaus festzulegen. Das liegt zunächst an den Schwankungen der betrieblichen Kosten. Darüber hinaus spielt nicht nur der CO<sub>2</sub>-Marktpreis, sondern auch die Entwicklung der Regularien zur Vergabe von kostenfreien Zuteilungen eine Rolle. Die Definition eines geeigneten Vertragspreises hat somit zwar eine grundlegende Funktion für das Auswahlverfahren und die vertragliche Definition einer Projektförderung. Die effektive Förderung muss aber auf der Basis von geeigneten Formeln und Preisindizes dynamisch abgerechnet werden.

Dieses Ziel kann durch die Definition von geeigneten Vorauszahlungen, Abrechnungsperioden und -prozessen erreicht werden. Dabei können zunächst regelmäßige Vorauszahlungen auf der Basis des Vertragspreises definiert werden. Zum Ende der Abrechnungsperiode werden dann die effektiv erreichten CO<sub>2</sub>-Minderungen verifiziert und die tatsächlichen CO<sub>2</sub>-Minderungskosten über eine dynamische Klimaschutzprämie für die Abrechnung bestimmt. Über eine geeignete Anpassung der effektiven Zahlungen des Klimaschutzvertrages lassen sich so Risiken für Unternehmen und die Gefahr einer Überförderung vermeiden.

Darüber hinaus ergibt sich aus der Forderung, dass Klinker für Zementprodukte, die als klimafreundlich

vermarktet werden, von einer Förderung ausgenommen werden, die Notwendigkeit, dass das so veräußerte Produktvolumen entsprechend abgezogen wird.

Eine geeignete Ausgestaltung von Klimaschutzverträgen muss sowohl dynamische betriebliche Mehrkosten, die ungewisse Evolution der Regularien zu kostenfreien Zuteilungen und dem CBAM als auch die freie Vermarktung von CO<sub>2</sub>-armem Zement berücksichtigen. Darüber hinaus ergibt sich für Anlagen mit der Möglichkeit, mit BECCS zu arbeiten, die Notwendigkeit, die daraus erwachsende CO<sub>2</sub>-Senkenleistung zu verifizieren und abzurechnen. Um diesen Anforderungen zu entsprechen, werden hier entsprechende Konzepte vorgestellt.

#### **5.4.1 Dynamisierung und Abrechnung betrieblicher Mehrkosten:**

Der Vertragspreis muss als grundlegende Variable des Klimaschutzvertrages auf der Basis einer transparenten Berechnung der mittleren CO<sub>2</sub>-Minderungskosten definiert werden. Der Vertragspreis dient als Grundlage zur Berechnung der Klimaschutzprämie, deren Zahlung die Mehrkosten einer Produktion mit der Klimaschutztechnologie kompensieren muss.

Da diese Mehrkosten schwanken, muss der Vertragspreis über geeignete und vertraglich definierte Formeln und Preisindizes in eine effektiv zu entrichtende Klimaschutzprämie umgerechnet werden. Im Falle des Oxyfuel- oder E-LEILAC-Verfahrens sind in diesem Zusammenhang der variable Preis für Stromkosten, den Brennstoffmix und den Transport und die Speicherung des CO<sub>2</sub> relevant. Für die Dynamisierung dieser Kosten können entweder öffentliche Preisindizes oder projektspezifische vertragliche Vereinbarungen herangezogen werden. Vertragliche Vereinbarungen sind überdies relevant, wenn der Aufbau und langfristige Betrieb einer Oxyfuel- oder E-LEILAC-Anlage auch eine Absicherung zum Aufbau der entsprechenden Infrastruktur erfordert. Gerade beim Transport und der Speicherung von CO<sub>2</sub> kann eine langfristige vertragliche Bindung wichtig sein, um

damit die Investition und den Betrieb der CCS-Infrastruktur abzusichern.

#### **5.4.2 Dynamisierung und Anrechnung des CO<sub>2</sub>-Preises:**

Der Einfluss des CO<sub>2</sub>-Preises auf die betrieblichen Mehrkosten hängt, wie in Abbildung 17 visualisiert, maßgeblich von den Regularien zur kostenfreien Zuteilung von Emissionsrechten ab. Für die präsentierten Szenarien ergeben sich spezifische Anforderungen:

##### **1) Äquivalente kostenfreie Zuteilungen auf der Basis der Emissionen der Referenzanlage:**

In diesem Fall wirkt der CO<sub>2</sub>-Preis nicht direkt auf die betrieblichen Kosten der Referenz- und Klimaschutzanlage ein. Für die CO<sub>2</sub>-arme Produktion kommt es zu einem Überschuss an kostenfreien Zuteilungen. Diese können zur anteiligen Deckung der Mehrkosten veräußert werden. Der daraus entstehende Beitrag muss in geeigneter Form bestimmt werden, damit er im Rahmen der Dynamisierung direkt zur Bestimmung der Klimaschutzprämie abgezogen werden kann. Es ergibt sich somit ein Differenzkostenvertrag (CCfD), bei dem der CO<sub>2</sub>-Marktpreis direkt vom Vertragspreis subtrahiert werden kann, um so in Kombination mit der in 5.5.1 schon definierten Dynamisierung die Klimaschutzprämie zu berechnen.

##### **2) Graduelle Abschaffung der kostenfreien Zuteilungen und Ersatz durch das CBAM:**

Mit dem graduellen Abbau der kostenfreien Zuteilungen über mehrere Jahre steigen die Produktionskosten der Referenzanlage. Gleichzeitig sinken für die CO<sub>2</sub>-arme Produktion die Einnahmen aus dem Verkauf der sinkenden kostenfreien Zuteilungen. Durch die jährliche Anpassung ergibt sich für den Klimaschutzvertrag die Notwendigkeit einer entsprechenden Abrechnung, auch wenn sich die Effekte der sinkenden Zuteilungen bei Referenz- und Klimaschutzanlage im Prinzip kompensieren. In der Konsequenz senkt ein steigender CO<sub>2</sub>-Marktpreis somit die Mehrkosten der CO<sub>2</sub>-armen Produktion und kann im Rahmen der Dynamisierung direkt zur Bestimmung der Klimaschutzprämie abgezogen werden.

### 5.4.3 Anrechnung von frei vermarkteten Mengen an CO<sub>2</sub>-armem Zement:

Um klimafreundlichen Zementklinker eindeutig der Förderung durch den Klimaschutzvertrag oder aber dem Verkauf als klimafreundliches Zementprodukt am Markt zuzuordnen, ist es notwendig, die als klimafreundlicher Klinker vermarktete Produktmenge zu quantifizieren und in geeigneter Form von der Förderung auszunehmen. Zur Umsetzung dieser Anforderung müssen eine Reihe von Kriterien zur Definition, Vermarktung und Abrechnung von konventionellem und klimafreundlichem Zement im Klimaschutzvertrag definiert werden. Grundsätzlich kann ein Unternehmen das gesamte oder jeweils einen Teil des mit der Klimaschutzanlage produzierten Produktvolumens als konventionell oder klimafreundlich vermarkten. Bei einer Vermarktung als konventionelles Produkt muss der Zement mit dem Hinweis, auf den im Klimaschutzvertrag definierten, spezifischen Emissionsbenchmark der Referenztechnologie vermarktet werden.

### 5.4.4 Ankauf der CO<sub>2</sub>-Senkenleistung:

Mit dem Ziel, erste BECCS-basierte Projekte anzureizen, können Klimaschutzverträge so gestaltet werden, dass CO<sub>2</sub>-Senkenleistungen spezifisch verifiziert und abgerechnet werden. Da es momentan noch keine etablierten Kriterien und Standards für die Quantifizierung und Verifizierung von BECCS-basierten CO<sub>2</sub>-Senken gibt, müssten die Grundlagen dafür im Rahmen des Klimaschutzvertrages definiert werden. In Bezug auf Kosten, Zuverlässigkeit und Verifizierung von CO<sub>2</sub>-Abscheidung, -Transport und -Speicherung ergeben sich dabei keine relevanten Unterschiede zum CCS. Es gibt jedoch auch spezifische Aspekte, die in geeigneter Form definiert werden müssen:

#### 1) Kriterien zur Nachhaltigkeit der Biomasse:

Um sicherzustellen, dass sich durch die Biomasseverwendung der Anlage keine aus ökonomisch und ökologischer Sicht unerwünschten Konsequenzen für Angebot und Nachfrage nach Biomasse ergeben,

müssen geeignete Kriterien für die Biomasseverwendung definiert werden<sup>30</sup>.

#### 2) Spezifische Definition und Abrechnung eines Vertragspreises für CO<sub>2</sub>-Senken:

Aus ökonomischer Perspektive unterscheiden sich die Kosten für CO<sub>2</sub>-Senken stark von den CO<sub>2</sub>-Minderungen. So bekommt ein Zementwerk für seine negativen Emissionen keine kostenfreien Zuteilungen. Somit müssen die vollen Mehrkosten für die Realisierung der CO<sub>2</sub>-Senkenleistung über den Klimaschutzvertrag getragen werden. Die Mehrkosten dafür beschränken sich allerdings auf zusätzliche Kosten für den Einkauf von biogenen Brennstoffen und ein gesteigertes Volumen für den Transport und die Speicherung des CO<sub>2</sub>.

30 Hierbei sind die Kriterien, die auf europäischer Ebene im Rahmen der *Renewable Energy Directive* (RED) erarbeitet werden, zu berücksichtigen.

## 6 Szenarien zur Berechnung der Transformationskosten der Zementbranche

Wie im Laufe dieser Studie dargestellt, sind Klimaschutzverträge ein geeignetes Instrument, um die Mehrkosten für Investitionen und Betrieb einer CO<sub>2</sub>-armen Zementproduktion abzusichern. Außerdem sind Klimaschutzverträge rasch umsetzbar, was auch dadurch begünstigt wird, dass die deutsche Bundesregierung im April 2021 schon ein Pilotprogramm und entsprechende Eckpunkte für ihre Anwendung in der Stahl- und Chemieindustrie definiert hat (BMU 2021c). Zudem sollen im Rahmen eines Sofortprogrammes die Mittel zur Finanzierung von Klimaschutzprogrammen ausgeweitet werden (BMU 2021b). Erste Verträge sollen schon 2022 abgeschlossen werden.<sup>31</sup>

31 Das Pilotprogramm ist in der heutigen Form zwar auf Projekte zur Verwendung von erneuerbarem Wasserstoff fokussiert, doch die daraus erwachsenden Erfahrungen und der große politische Fokus auf einen Ausbau des Programms deuten darauf hin, dass sich das Instrument auch zur Förderung von CCUS-basierten Klimaschutzanlagen in der Zementbranche erweitern lässt.

Des Weiteren lassen sich Klimaschutzverträge so gestalten, dass sie mit künftigen Entwicklungen der Regeln zur Vergabe von kostenfreien Zuteilungen, des CO<sub>2</sub>-Marktpreises und der Nachfrage nach klimafreundlichen Zementprodukten kompatibel bleiben.

Mit dem Ziel, diese Aspekte für den in Kapitel 3 beschriebenen Transformationspfad zu beleuchten, werden im Folgenden Annahmen für verschiedene Szenarien für die Transformation der Zementbranche definiert, um ihren Einfluss auf den Finanzierungsbedarf für Klimaschutzverträge darzustellen und zu diskutieren.

Ein weiterer Fokus dieses Kapitels liegt auf der Diskussion der Rolle von Klimaschutzverträgen für die Förderung einer CO<sub>2</sub>-Infrastruktur und der Rolle von CO<sub>2</sub>-Senkenzertifikaten für den Aufbau klimapositiver Produktionsstrategien.

Szenarien für die Projektion der Transformationskosten in der Zementbranche

Tabelle 6

### Annahme für die Projektion der Transformationskosten

Aufbau von Oxyfuel-Kapazitäten von 3 Millionen Tonnen bis 2030. Linearer Hochlauf durch die Inbetriebnahme von 0,5 Millionen Tonnen p. a. an Oxyfuel-Kapazitäten über sechs Jahre von 2025 bis 2030.

Ausgabe von Klimaschutzverträgen mit einer Laufzeit von 10 Jahren zur Absicherung der betrieblichen Mehrkosten sowie zur Förderung der annualisierten Investitionskosten mit einem Zinssatz von 8 Prozent und einer Abschreibungsdauer von 10 Jahren.

Der zusätzliche Finanzbedarf beim Neubau (*Greenfield*) von Oxyfuel-Anlagen gegenüber konventionellen Anlagen liegt bei 59 €/t Zement-Jahreskapazität. Der Finanzbedarf bei Umrüstung (*Retrofit*) liegt bei 104 €/t Zement-Jahreskapazität. 50 Prozent der betrachteten Kapazitäten werden umgerüstet (*Retrofit*), während 50 Prozent vollständig neu gebaut werden (*Greenfield*).

Agora Industrie, FutureCamp, Wuppertal Institut und Ecologic Institut (2022)

## 6.1 Generelle Annahmen für die Projektion der Transformationskosten

Um die Transformationskosten sinnvoll abzuschätzen, müssen für den dargestellten Transformationspfad zunächst generelle Annahmen definiert werden. Wir fokussieren uns dabei auf den Aufbau von Oxyfuel-Anlagen, da diese Technologie schon vor 2030 einsetzbar und günstiger ist sowie die Chance auf einen klimapositiven Betrieb mit Biomasse bietet.

Darüber hinaus müssen Annahmen für die zukünftige Entwicklung des CO<sub>2</sub>-Marktpreises und zur Entwicklung grüner Leitmärkte definiert werden. Eine große Bedeutung kommt außerdem den Kosten für den CO<sub>2</sub>-Transport zu, welche einerseits stark von Standortfaktoren und andererseits von staatlichen Maßnahmen zum Aufbau einer CO<sub>2</sub>-Infrastruktur abhängen.

Zu den generellen Annahmen gehört eine Inbetriebnahme von Oxyfuel-Kapazitäten von je 0,5 Millionen Tonnen pro Jahr über 6 Jahre ab 2025. Damit können bis zum Jahr 2030 insgesamt 3 Millionen Tonnen an Oxyfuel-Kapazitäten in Betrieb genommen werden. Ab dem Jahr 2030 wird somit eine CO<sub>2</sub>-Minderung von 2,2 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> pro Jahr ermöglicht.

Die zusätzlichen Investitionskosten gegenüber einer konventionellen Anlage werden annualisiert und den betrieblichen Mehrkosten hinzugerechnet. Unter der Annahme, dass 50 Prozent der betrachteten Anlagen im Rahmen der Transformation umgerüstet werden, ergeben sich Investitionen von 156 Millionen Euro für das *Retrofit* von 1,5 Millionen Tonnen an existierenden Klinkerproduktionskapazitäten.

Für 50 Prozent der Kapazität nehmen wir den Aufbau neuer Zementklinkeröfen mit einer Klinkerproduktionskapazität von ebenfalls 1,5 Millionen Tonnen an. Dafür fallen insgesamt 435 Millionen Euro Investitionskosten an. Die Mehrinvestitionen im Vergleich zum Aufbau einer konventionellen Anlage belaufen sich auf einen geringeren Betrag von circa 90 Millionen Euro.

Die gesamten Mehrinvestitionen zum Aufbau einer CCUS-basierten Zementklinkerproduktion im Vergleich zum Referenzszenario summieren sich somit auf insgesamt etwa 250 Millionen Euro. Aufgrund der relativ geringen Investitionskosten nehmen wir für unsere Berechnungen an, dass die Mehrkosten bei Investitionen annualisiert und auf die Produktion umgelegt werden. Dafür gehen wir von einer Abschreibungsdauer von 10 Jahren und einem Zinssatz von 8 Prozent aus. Daraus ergeben sich Investitionskosten von durchschnittlich 11,40 Euro pro Tonne klimafreundlich produziertem Zement. Auf der Basis der beschriebenen und in Tabelle 6 zusammengefassten Annahmen werden in Abschnitt 6.2 die Transformationskosten anhand von drei Szenarien für den Betrieb mit konventionellen Brennstoffen untersucht.

In Abschnitt 6.3 werden die Transformationskosten anhand von zwei Szenarien für den Betrieb mit Biomasse untersucht.

## 6.2 Szenarien und Ergebnisse für die Transformationskosten beim Betrieb mit konventionellen Brennstoffen

Auf der Basis der generellen Annahmen wird zunächst ein Referenzszenario a) mit konventionellem Brennstoffmix definiert. Auf dieser Basis wird im Szenario b) der Effekt einer steigenden marktgetriebenen Nachfrage nach klimafreundlichem Zement modelliert. Das Szenario c) untersucht, wie der Aufbau einer CO<sub>2</sub>-Infrastruktur die Transformationskosten entlasten kann. Die Annahmen für die drei Szenarien sind in Tabelle 7, die Ergebnisse der Modellierung in Tabelle 8 zusammengestellt.

### a) Referenzszenario:

Mithilfe des Referenzszenarios definieren wir die realistisch anzusetzenden Transformationskosten ohne den Effekt weiterer Politikmaßnahmen. Wir gehen in diesem Szenario davon aus, dass keine gesonderte Infrastruktur für den CO<sub>2</sub>-Abtransport



Generelle Annahmen für die Projektion der Transformationskosten			Tabelle 7
Annahme zu Szenarien	Entwicklung des CO <sub>2</sub> -Marktpreises	Marktgetriebene Nachfrage nach klimafreundlichem Zement	Annahmen zur Entwicklung der CO <sub>2</sub> -Infrastruktur
Referenz a)	59 €/EUA im Jahr 2025, linearer Anstieg auf 90 €/EUA im Jahr 2040	keine	CO <sub>2</sub> -Abtransport per Schiff und geologische Lagerung zu Kosten von 36 €/t CO <sub>2</sub>
Szenario b)	wie Referenzszenario	Anstieg von 0 % der Produktion im Jahr 2026 auf 80 % im Jahr 2032	wie Referenzszenario
Szenario c)	wie Referenzszenario	keine	CO <sub>2</sub> -Abtransport per Pipeline und geologische Lagerung zu Kosten von 26 €/t CO <sub>2</sub>

Agora Industrie, FutureCamp, Wuppertal Institut und Ecologic Institut (2022)

Transformationskosten und Finanzierungsbedarf je Legislaturperiode (LP) für verschiedene Szenarien				Tabelle 8
Szenario	Beschreibung der Annahmen	Bedarf an Finanzierungszusagen in Millionen €		
		LP20	LP21	gesamt
Referenz a)	CO <sub>2</sub> -Preisanstieg von 59 €/EUA im Jahr 2025 auf 90 €/EUA 2040. Kosten für CO <sub>2</sub> -Abtransport in Höhe von 36 €/t CO <sub>2</sub>	42	32	74
Szenario b)	wie Referenz, doch mit der Annahme einer marktgetriebenen Nachfrage für klimafreundlichen Zement	38	24	61
Szenario c)	wie Referenz, doch mit geringeren Kosten für CO <sub>2</sub> -Abtransport und Lagerung in Höhe von 26 €/t CO <sub>2</sub>	5	0	5

Agora Industrie, FutureCamp, Wuppertal Institut und Ecologic Institut (2022)

aufgebaut wird. Somit ist das CCUS nur für Anlagen mit einer logistisch günstigen Lage möglich. Der Transport des CO<sub>2</sub> erfolgt per Schiff und damit zu hohen Kosten von 36 Euro pro Tonne CO<sub>2</sub>. Abbil-

dung 20 visualisiert die Ergebnisse dieses Szenarios. Durch den in den generellen Annahmen definierten CO<sub>2</sub>-Preisfad von 59 Euro/EUA im Jahr 2025 auf 90 Euro/EUA im Jahr 2040 verringern sich die

Mehrkosten für die CCUS-basierte Produktion kontinuierlich, sodass ab dem Jahr 2033 keine weiteren Klimaschutzzahlungen mehr geleistet werden müssen.<sup>32</sup>

Somit zeigt sich, dass Klimaschutzverträge in der Lage sind, Investitionen frühzeitig anzustoßen und sie dann bei einem steigenden CO<sub>2</sub>-Marktpreis in das Marktregime zu entlassen. Um die vorübergehenden Mehrkosten zu decken, fallen in diesem Szenario für den Zeitraum 2025 bis 2032 Kosten von 74 Millionen Euro an. In etwa zwei Drittel der Finanzierungszusagen müssten in der nächsten Legislaturperiode getroffen werden, doch effektive Zahlungen fallen erst in späteren Legislaturperioden an.

32 Seit November 2021 liegen die CO<sub>2</sub>-Preise im EU-EHS deutlich über diesen Annahmen. Sollten sich diese hohen Preise halten, müssen die Ergebnisse unserer Modellierungen entsprechend eingeordnet werden.

**b) Szenario der marktgetriebenen Nachfrage:**

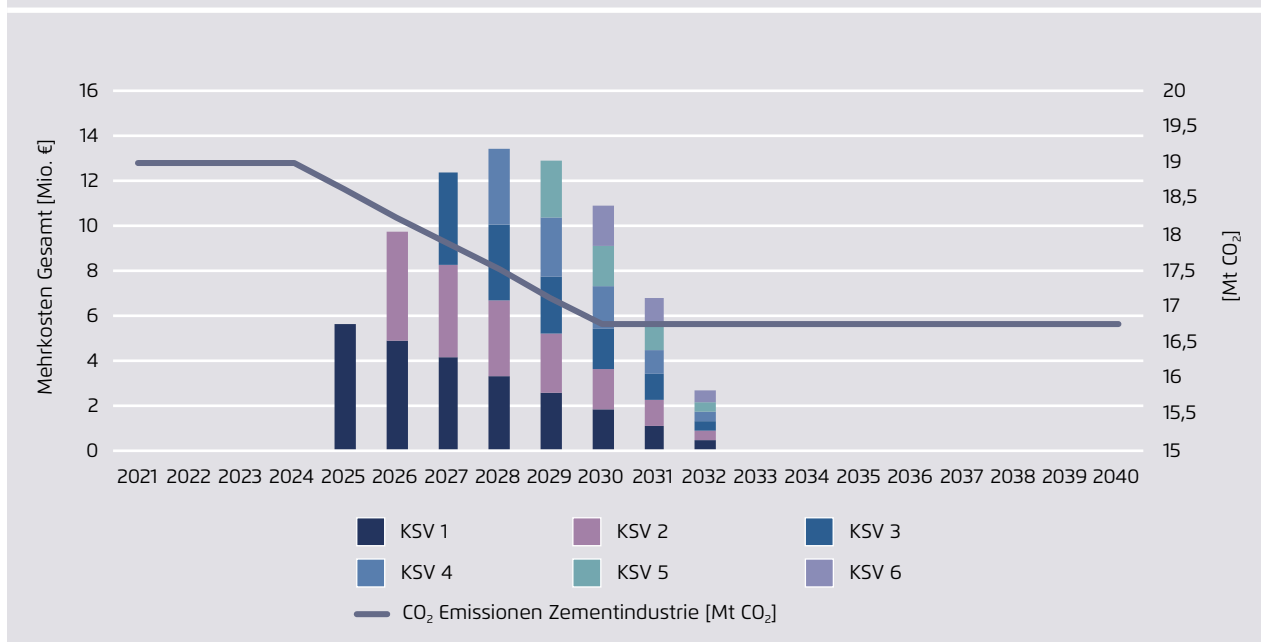
Mit sinkenden Mehrkosten gegenüber konventionell produziertem Zement ist zudem davon auszugehen, dass ein Teil der CCUS-basierten Produktion als klimafreundlicher Zement abgesetzt werden kann. Im Szenario b) nehmen wir an, dass die Nachfrage und die Zahlungsbereitschaft dafür von 0 Prozent der CCUS-basierten Jahresproduktion im Jahr 2028 auf 80 Prozent im Jahr 2032 steigen. Mit dieser Annahme mindert sich der Aufwand zur Finanzierung der Klimaschutzverträge auf 61 Millionen Euro. Nach 2032 ist CCUS-basierter Zement günstiger als konventioneller Zement und verdrängt diesen vom Markt.

**c) Potenzial einer CO<sub>2</sub>-Infrastruktur**

Die Kosten für den Abtransport und die geologische Lagerung des CO<sub>2</sub> stellen einen Großteil der Mehrkosten einer CCUS-basierten Zementklinkerproduktion dar. Während der Transport per Schiff nur für günstig gelegene Zementwerke zu Kosten von 36 Euro pro Tonne CO<sub>2</sub> möglich ist, könnte die Entwicklung einer

Projektion der Transformationskosten für das Referenzszenario mit konventionellem Brennstoffmix bei einer moderaten CO<sub>2</sub>-Preisentwicklung

Abbildung 20



Agora Industrie, FutureCamp, Wuppertal Institut und Ecologic Institut (2022)

CO<sub>2</sub>-Infrastruktur Kosten senken und auch weniger günstig gelegenen Standorten die Transformation ermöglichen. Unter der Annahme geringerer Kosten von 26 Euro pro Tonne CO<sub>2</sub>, wie sie beim Aufbau einer geeigneten Pipelineinfrastruktur realistisch wären, mindern sich die Mehrkosten für die CCUS-basierte Zementproduktion bereits im Jahr 2028 auf null. Das insgesamt benötigte Finanzierungsvolumen ist mit 5 Millionen Euro vernachlässigbar. Dabei ist zu beachten, dass der Aufbau der dafür notwendigen Pipelines in diesem Zeitrahmen nicht realistisch ist. Dennoch zeigt das Ergebnis, dass der staatlich gesteuerte Ausbau einer CO<sub>2</sub>-Infrastruktur für die Transformation der CCUS-basierten Zementklinkerproduktion entscheidend ist – vor allem, wenn es darum geht, die regionale Struktur der Zementindustrie weitgehend zu erhalten.

### 6.3 Szenarien und Ergebnisse für eine Projektion der Transformationskosten unter Verwendung von Biomasse

In Abschnitt 6.2 haben wir die Transformationskosten für den Aufbau von Anlagen zur CCUS-basierten Zementklinkerproduktion mit einer Jahreskapazität von insgesamt 3 Millionen Tonnen analysiert, um damit eine CO<sub>2</sub>-Minderung von insgesamt 2,2 Millionen Tonnen pro Jahr ab dem Jahr 2030 zu erreichen. Dafür müssen Investitionen von insgesamt 250 Millionen Euro mobilisiert werden. Auf der Basis unserer Annahmen für einen moderaten Anstieg der CO<sub>2</sub>-Preise und einer geeigneten Konzeption von Klimaschutzverträgen belaufen sich die zu finanzierenden Transformationskosten jedoch auf nur etwa 74 Millionen Euro. Diese lassen sich durch Politikmaßnahmen zur Förderung von grünen Leitmärkten und zum Aufbau einer CCS-Transportinfrastruktur zudem weiter senken.

Auf dieser Basis analysieren wir nun, wie sich der Betrieb dieser Anlagen zur CCUS-basierten Zementklinkerproduktion mit Biomasse auswirkt.

Die Nutzung von Biomasse als Brennstoff in Kombination mit CCS-Technologien (*Bio Energy and Carbon Capture and Storage*, BECCS) ermöglicht einen CO<sub>2</sub>-Senkeneffekt, der über die Minderung der Prozess- und Brennstoffemissionen hinausgeht.

Für den hypothetischen Fall, dass 100 Prozent des Brennstoffbedarfs durch Holzhackschnitzel gedeckt werden, ergibt sich durch die Nutzung der oben definierten Kapazität zur CCUS-basierten Zementklinkerproduktion von 3 Millionen Tonnen pro Jahr die Möglichkeit, einen zusätzlichen CO<sub>2</sub>-Senkeneffekt von einer Million Tonnen CO<sub>2</sub> pro Jahr zu erzielen.

Damit könnte der Klimanutzen der geförderten Anlagen auf insgesamt 3,2 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> pro Jahr ab dem Jahr 2030 gesteigert werden.

In unserem Referenzszenario a) werden die Transformationskosten unter Annahme heutiger Biomassepreise und der geltenden EU-EHS-Regularien untersucht. Da es im Rahmen des EU-EHS derzeit keine kostenfreien Zuteilungen oder Gutschriften für CO<sub>2</sub>-Senken gibt, müssen die vollen Kosten für einen BECCS-Betrieb über den Klimaschutzvertrag abgegolten werden.

In Szenario b) werden die Transformationskosten unter der Annahme untersucht, dass CO<sub>2</sub>-Senken zum CO<sub>2</sub>-Marktpreis vergütet werden, weil sie entweder innerhalb oder außerhalb des EU-EHS an privatwirtschaftliche Marktteilnehmer verkauft werden können.

#### a) Referenzszenario

Im Rahmen des Referenzszenarios berechnen wir die zu erwartenden Transformationskosten für den klimapositiven Betrieb der Anlagen unter der Annahme eines konstanten Biomassepreises und nehmen an, dass die zusätzlichen Kosten über den Klimaschutzvertrag abgegolten werden. Damit erwirbt der Staat die Rechte an der erbrachten CO<sub>2</sub>-Senkenleistung und könnte diese gegebenenfalls im Rahmen seiner Verpflichtungen innerhalb

der EU *Effort Sharing* Regulation oder im Pariser Abkommen nutzen und sich damit auch auf die Erreichung der Klimaneutralität 2045 vorbereiten. Die Ergebnisse des Referenzszenarios sind in Abbildung 21 zusammengefasst.

Durch die höheren Brennstoffpreise bei der Nutzung von Holzhackschnitzeln gegenüber dem konventionellen Brennstoffmix ergibt sich insgesamt ein höherer Finanzierungsbedarf für die Klimaschutzverträge in Höhe von bis zu 677 Millionen Euro. Die deutlich höheren Kosten sind darauf zurückzuführen, dass für CO<sub>2</sub>-Senkenleistungen keine kostenfreien Zuteilungen oder Gutschriften durch das EU-EHS erfolgen. Somit müssen die vollen Kosten über den Klimaschutzvertrag abgegolten werden. Der Staat sichert sich im Gegenzug jedoch auch die Rechte an einer CO<sub>2</sub>-Senkenleistung von bis zu 10 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> über die akkumulierte Laufzeit der Verträge.

Um eine weitere Diskussion dieses Ergebnisses zu unterstützen, erscheint es sinnvoll, die getroffenen Annahmen in einigen Punkten kritisch zu hinterfragen:

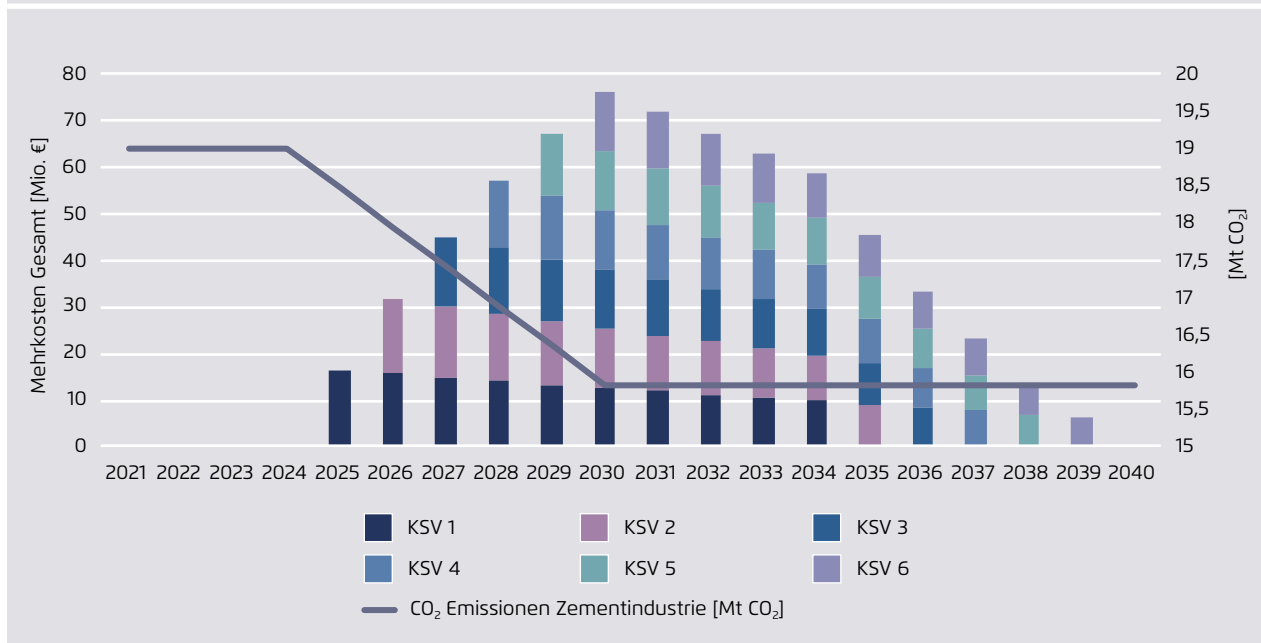
→ **Einschränkungen des Potenzials der**

**CO<sub>2</sub>-Senkenleistung:** Das technische Potenzial für eine CO<sub>2</sub>-Senkenleistung von einer Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> ist in der Praxis vor allem kurzfristig nicht realistisch zu erreichen. Aufgrund technischer Anforderungen an den Brennstoffmix und regional limitierter Verfügbarkeit an biogenen Brennstoffen wird sich dieses Potenzial nur graduell erschließen lassen.

→ **Einschränkungen bei Kosten und Verfügbarkeit der Biomasse:** Bei der globalen und regionalen Verfügbarkeit und den Kosten für biogene Brennstoffe ist mit großen Verschiebungen zu rechnen. Zum einen ist es das Ziel, die energetische Verwendung von Biomasse ohne CCS zu mindern. Zum anderen wird die zunehmend stoffliche Nutzung

Projektion der Transformationskosten für das Referenzszenario bei Nutzung von Holzhackschnitzeln für den BECCS-Betrieb

Abbildung 21



Agora Industrie, FutureCamp, Wuppertal Institut und Ecologic Institut (2022)

von Biomasse mit höherer Wertschöpfung in vielen Branchen angestrebt. Es ist somit damit zu rechnen, dass Preise für Holzschnitzel langfristig ansteigen und damit keinen nachhaltigen Brennstoff für die Zementproduktion darstellen. Im Gegenzug dazu kann man aber davon ausgehen, dass eine steigende stoffliche Nutzung von Biomasse im Sinne der Nutzungshierarchie für die ökonomische und ökologische Verwendung von Biomasse langfristig auch dazu führt, dass das Volumen an biogenen Reststoffen ansteigen wird. Beispiele dafür sind biogene Kunststoffe und Verpackungsmaterialien, wie auch Abbruch- und Abfallmaterialien aus einem gesteigerten Holz- und Biomasseinsatz im Bau. Die CCUS-basierte Zementindustrie stellt für den Aufbau einer klimapositiven Nutzungshierarchie einen idealen Anker dar, da sie die entstehenden vielfältigen Reststoffe effizient für einen BECCS-Betrieb verwenden kann. Das hier dargestellte Szenario für eine Förderung beim Aufbau und Betrieb einer BECCS-basierten Zementklinkerproduktion durch Klimaschutzverträge eröffnet somit interessante Synergien mit dem Ziel, eine biomassebasierte und klimapositive Kreislaufwirtschaft zu etablieren.

Da im Rahmen der derzeit geltenden Regelungen im EU-EHS kein Anreiz dafür gegeben ist, macht es Sinn, den Aufbau dieser Strategien zunächst über Klima-

schutzverträge zu fördern. So können erste Erfahrungen für die Definition von Kriterien zum Einsatz von Biomasse, wie auch zur Quantifizierung und Verifizierung der resultierenden CO<sub>2</sub>-Senkenleistungen gesammelt werden, um damit die von der EU angestrebte, regulatorische Definition von CO<sub>2</sub>-Senkenzertifikaten vorzubereiten. Die mögliche Rolle von CO<sub>2</sub>-Senkenzertifikaten für die Finanzierung einer BECCS-basierten Zementklinkerproduktion diskutieren wir im nächsten Szenario.

#### b) Gutschrift für CO<sub>2</sub>-Senken

In Anbetracht der für die Klimaneutralität benötigten Senkenleistung ist die Einführung von Gutschriften oder Zertifikaten für CO<sub>2</sub>-Senkenleistungen in absehbarer Zeit denkbar. In diesem Fall müssten die Erlöse aus dem Verkauf der CO<sub>2</sub>-Senkenzertifikate auf den Klimaschutzvertrag angerechnet werden. Für unser Szenario nehmen wir an, dass CO<sub>2</sub>-Senkenzertifikate zum jeweiligen CO<sub>2</sub>-Marktpreis abgesetzt werden können.

Beim Wechsel einer Referenzanlage mit einem konventionellen Brennstoffmix zum Oxyfuel-Verfahren mit Holzhackschnitzeln als Brennstoff können somit die durch die CO<sub>2</sub>-Minderung freiwerdenden Emissionszertifikate (EUA) und zusätzlich generierte CO<sub>2</sub>-Senkenzertifikate zum jeweiligen CO<sub>2</sub>-Marktpreis verkauft werden. Durch diese Kombination und

Betriebliche Transformationskosten und Finanzierungsbedarf für verschiedenen Szenarien unter Verwendung von Holzhackschnitzeln als Brennstoff

Tabelle 9

Szenario	Beschreibung der Annahmen	Bedarf an Finanzierungszusagen in Millionen €		
		LP20	LP21	gesamt
Referenz a)	Keine Gutschrift für CO <sub>2</sub> -Senken	255	422	677
Szenario b)	Gutschrift für CO <sub>2</sub> -Senken in Höhe des CO <sub>2</sub> -Marktpreises	38	19	57

Agora Industrie, FutureCamp, Wuppertal Institut und Ecologic Institut (2022)

unter der Annahme von moderat steigenden CO<sub>2</sub>-Preisen sinkt damit der Finanzierungsbedarf für Klimaschutzverträge auf 57 Millionen Euro.<sup>33</sup>

In Anbetracht eines wachsenden Bedarfs an CO<sub>2</sub>-Senken ist es denkbar, dass CO<sub>2</sub>-Senkenzertifikate auch zu höheren Preisen als dem CO<sub>2</sub>-Marktpreis verkauft werden könnten. Über deren Verkauf, gegebenenfalls auch an privatwirtschaftliche Akteure außerhalb Deutschlands, könnten somit nicht ein höherer Teil der Transformationskosten finanziert, sondern gegebenenfalls noch eine Marge generiert werden. Die Ergebnisse der Modellierung der Transformationskosten unter der Verwendung von Biomasse als Brennstoff sind in Tabelle 9 zusammengefasst.

## 6.4 Diskussion der Ergebnisse zur Projektion der Transformationskosten

Mit den hier präsentierten Szenarien und Annahmen haben wir die Umsetzung der im Rahmen der Studie *Klimaneutrales Deutschland 2045* vorgeschlagenen Transformation der Zementproduktion modelliert und den Finanzierungsbedarf für Klimaschutzverträge entsprechend prognostiziert. Dabei scheint der Aufbau einer CCUS-basierten Zementklinkerproduktion mit einer Kapazität von bis zu 3 Millionen Tonnen realistisch und eröffnet das Potenzial für CO<sub>2</sub>-Minderungen von bis zu 2,2 Millionen Tonnen pro Jahr ab dem Jahr 2030. Dabei möchten wir jedoch herausstreichen, dass es sich bei dieser Kapazität um einen ersten Schritt handelt, um die notwendigen Technologien zur Marktreife zu bringen, die entsprechenden Regularien zu entwickeln und den Aufbau der notwendigen Infrastruktur anzugehen. Es ist wichtig, die Transformation im Zementsektor nicht nur als direktes Ziel zu verstehen, sondern als ersten Schritt

für die notwendige Entwicklung einer Strategie, um mit CCUS-Optionen für die Minderung unvermeidbarer Emissionen und auch CO<sub>2</sub>-Senken zu schaffen.

Die Tatsache, dass die Zementbranche dafür einen wichtigen Ansatzpunkt bietet, lässt sich durch die Ergebnisse unserer Modellrechnungen belegen, denn durch eine synergetische Kombination von Klimaschutzverträgen mit einer EU-EHS-Reform und selbst bei einem moderatem CO<sub>2</sub>-Preispfad lässt sich der Finanzierungsaufwand für die Förderung dieses ersten Transformationsschrittes durch Klimaschutzverträge auf unter 100 Millionen Euro taxieren. Darüber hinaus zeigen die Resultate, dass die weitere Transformation der Industrie nach 2030 marktgetrieben erfolgen kann. Voraussetzungen dafür sind eine EU-EHS-Reform, die zu nachhaltigen Preisen über 90 Euro führt, wie auch der Aufbau einer Infrastruktur und der entsprechenden Regularien, die den Transport und die Speicherung von CO<sub>2</sub> zu moderaten Kosten auch für Anlagen im Hinterland erlauben. Unter diesen Voraussetzungen ist davon auszugehen, dass die CCUS-basierte Zementklinkerproduktion sich als neuer Standard etabliert und die konventionelle Produktion verdrängt.

In der Übergangsphase spielen dabei auch politische Instrumente für den Aufbau einer Nachfrage nach klimafreundlichen Baustoffen eine wichtige Rolle, um einerseits die Kosten der CCUS-basierten Zementklinkerproduktion zu refinanzieren, andererseits das Produkt auch mit anderen Strategien der ressourceneffizienten Kreislaufwirtschaft in Konkurrenz zu setzen.

Darüber hinaus zeigen unsere Szenarien im Hinblick auf die Verwendung von Biomasse für BECCS, dass der Aufbau einer CCS-Infrastruktur ein strategisches Potenzial eröffnet, erste Erfahrungen mit klimapositiven Strategien zu sammeln. Dabei gilt es darauf zu achten, dass der Bedarf der Zementindustrie nach biogenen Brennstoffen sich aus ökologischer und ökonomischer Perspektive gut in den Aufbau einer ressourceneffizienten biomassebasierten Kreislaufwirtschaft einfügt.

33 Unter Annahme einer CO<sub>2</sub>-Abtransportgebühr in Höhe von 26 statt 36 Euro pro Tonne CO<sub>2</sub>, welche über den Anschluss an eine CO<sub>2</sub>-Infrastruktur an geeigneten Standorten denkbar ist, würden sich die Transformationskosten auf 6 Millionen Euro verringern.

## 7 Zusammenfassung und Ausblick für eine Umsetzung von Klimaschutzverträgen

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass erste Schritte für die Transformation der Zementproduktion bereits vor 2030 möglich sind. Dekarbonisierungsstrategien wie Materialeffizienz und Substitution spielen im Zementsektor eine hervorgehobene Rolle. Für die Minderung der zum jetzigen Stand unvermeidbaren Prozessemissionen in der Zementproduktion ist jedoch zudem die Umrüstung bestehender oder der Aufbau neuer Anlagen mit Oxyfuel- oder E-LEILAC-Verfahren ein dringender und sinnvoller Schritt, welcher zum Aufbau einer CCUS-Infrastruktur und der nötigen regulatorischen Rahmenbedingungen beiträgt. Darüber hinaus erschließen sich Optionen für einen klimapositiven Betrieb durch die Schaffung von CO<sub>2</sub>-Senken über BECCS, die für die langfristige Klimaneutralität Deutschlands strategisch wichtig sind. Im Rahmen der Diskussion zur nachhaltigen Verwendung von Biomasse bietet sich die Zementindustrie dabei als letzte Stufe in der angestrebten Nutzungshierarchie an,<sup>34</sup> denn sie birgt die Chance, biogene Reststoffe aus einer zunehmend biomassebasierten Wirtschaft effizient zu nutzen und den Kohlenstoff am Ende der Nutzungskaskade einer geologischen Speicherung zuzuführen.

Neben der genannten, für die Klimaneutralität Deutschlands strategischen Perspektiven, ergibt sich für die international agierende Zement- und Baustoffindustrie wie auch für zuliefernde Anlagenbauer die Möglichkeit, die in Deutschland entwickelten, klimafreundlichen Strategien, Prozesse und Anlagen auch am internationalen Markt anzubieten und als Standard zu etablieren.

Wie wir im Rahmen der Studie dargelegt haben, sind CCUS und BECCS in der Zementindustrie eine kosteneffiziente Strategie, um die unvermeidbaren Prozessemissionen der Klinkerproduktion zu mindern und darüber hinaus CO<sub>2</sub>-Senkenleistungen zu schaffen. Im Rahmen der generellen Erwartung steigender CO<sub>2</sub>-Preise gehen wir davon aus, dass sich diese Technologien nach 2030 ohne weitere Förderungen am Markt durchsetzen können.

Um dieses Ziel zu erreichen, ist es jedoch zentral, schon vor 2030 erste großtechnische Anlagen aufzubauen, um damit die angestrebte Transformation der Zementindustrie zu ermöglichen und auch BECCS als klimapositive Strategie zu etablieren.

Klimaschutzverträge stellen ein geeignetes Instrument dar, um diese Transformation abzusichern. Sie können schnell und recht unbürokratisch umgesetzt und flexibel auf die noch ungewisse Entwicklung relevanter rahmensetzender Regularien abgestimmt werden. Dazu gehören vor allem die Reform des EU-EHS, die Einführung eines Grenzausgleichsmechanismus und der Politikinstrumente zur Förderung einer marktgetriebenen Nachfrage nach klimafreundlichen Baustoffen.

Im Folgenden beleuchten wir die Relevanz einer strategischen Abstimmung von Klimaschutzverträgen mit den genannten Rahmenbedingungen und fassen kurz die zentralen Prinzipien für eine kurzfristige Umsetzung und das Auswahlverfahren zusammen.

### 7.1 Strategische Ziele

Wie im Laufe der Studie dargestellt, geht es bei der Ausgestaltung von Klimaschutzverträgen zur Transformation der Zementindustrie um strategische Ziele,

34 Im Rahmen des *Fit-for-55-Packages* strebt die EU-Kommission an, eine Nachhaltigkeitsstrategie für die Verwendung von Biomasse zu etablieren, um sicherzustellen, dass die wertstoffliche Nutzung über eine rein energetische Nutzung priorisiert wird (COM 2021b).

die über den engen Fokus der Branche hinausgehen. Eine kurze Zusammenfassung dieser Ziele soll die abschließende Diskussion zur Ausgestaltung und Anwendung von Klimaschutzverträgen strukturieren:

#### **1. Klimafreundliche Bauindustrie:**

Klimaschutzverträge und Politikinstrumente zur Förderung einer klimafreundlichen Bauindustrie müssen so konzipiert sein, dass sie alle Strategien zur Emissionsminderung sowie eine ressourcenschonende Kreislaufwirtschaft fördern.

#### **2. Technologische Entwicklung:**

Über die großtechnische Anwendung von CCUS und BECCS muss die technologische Entwicklung und Skalierung der notwendigen Technologien zur CO<sub>2</sub>-Abscheidung, -Verwendung, -Speicherung und zum Transport beschleunigt werden.

#### **3. Anstoßförderung mit Exitstrategie:**

Klimaschutzverträge sollen CCUS-Investitionen schnell anstoßen, aber so konzipiert sein, dass der Betrieb der Anlagen schnell durch den Markt getragen werden kann.

#### **4. Aufbau klimafreundlicher Produktionsverbände:**

Die Auswahl und Förderung von CCUS-Anlagen sollte Synergien mit anderen industriellen Prozessen und dem Aufbau der dafür nötigen Infrastruktur fördern. Beispiele sind die Schließung von Kreisläufen in Bezug auf die Verwendung von Sauerstoff, Biomasse, Abwärme und CO<sub>2</sub>.

## 7.2 Relevanz der Rahmenbedingungen

Damit Klimaschutzverträge die Erreichung der postulierten Ziele unterstützen können, müssen sie mit der sehr dynamischen Entwicklung anderer Politikinstrumente und den allgemeinen Rahmenbedingungen abgestimmt werden. Dabei ist gerade die Unsicherheit dieser Entwicklungen das Hauptargument für die Notwendigkeit, die anstehenden Reinvestitionen in der Zementindustrie nun schnell mit

geeigneten Klimaschutzverträgen abzusichern. Idealerweise wird die kurzfristige Umsetzung von Klimaschutzverträgen jedoch so konzipiert, dass Risiken für Investoren und Betreiber minimiert werden. Dafür muss der zukünftige regulatorische Rahmen antizipiert und Klimaschutzverträge müssen dennoch flexibel gestaltet werden, um auch mit unabsehbaren Entwicklungen umgehen zu können.

Im Folgenden möchten wir auf einige zentrale Wechselwirkungen der Klimaschutzverträge mit anderen regulatorischen Instrumenten eingehen:

#### **1) Reform des EU-EHS und Einführung eines Grenzausgleichsmechanismus:**

Ein steigender CO<sub>2</sub>-Marktpreis ist ein zentraler Hebel, um die Förderung einer CCUS-basierten Zementklinkerproduktion durch Klimaschutzverträge abzulösen. Die durch das *Fit-for-55 Package* angelegten Reformen lassen einen entsprechenden Anstieg der CO<sub>2</sub>-Preise erwarten, und fordern darüber hinaus, dass dadurch alle relevanten Minderungsstrategien gefördert werden. Durch die existierende Äquivalenz der kostenfreien Zuteilungen für konventionelle und CCUS-basierte Anlagen zur Klinkerproduktion entfaltet ein steigender CO<sub>2</sub>-Preis auch die gewünschte Wirkung zur Förderung der Klimaschutztechnologie und lässt sich gut durch einen Klimaschutzvertrag absichern.

Solange aber sowohl die Referenz- als auch die Klimaschutztechnologie kostenfreie Zuteilungen erhalten, werden konventioneller Zement und klimafreundlicher Zement subventioniert und andere Minderungsstrategien wie die Substitution und Materialeffizienz benachteiligt.

Der von der EU-Kommission vorgelegte Plan für die graduelle Einführung eines CBAM im Zeitraum von 2026 bis 2035 bietet dafür eine Lösung. Ab 2026 würden nach diesem Vorschlag die kostenfreien Zuteilungen für Referenz- und Klimaschutztechnologie schrittweise um 10 Prozent pro Jahr sinken. Der Preisanstieg der jeweiligen Produkte wird gleichzei-



tig im Rahmen eines CBAM kompensiert, um *Carbon Leakage* zu verhindern.<sup>35</sup> Durch den Anstieg der Referenzkosten entsteht ein entsprechendes Preissignal für die Vermeidung, Substitution oder das Recycling der ressourcen- und CO<sub>2</sub>-intensiven Primärproduktion. Zudem sinken die Mehrkosten für eine klimafreundliche Primärproduktion, was auch die Entstehung einer entsprechenden Nachfrage nach grünen Produkten fördert.

Darüber hinaus bietet der Plan den Vorteil, dass das Volumen an kostenfreien Zuteilungen graduell abgebaut wird und somit mit dem Ziel eines sinkenden Gesamtcaps im EU-EHS kompatibel ist.

Trotz dieser positiven Perspektiven ist es momentan noch unsicher, wann und in welcher Form ein CBAM kommt, oder ob seine Einführung durch außenhandelspolitische Entwicklungen sogar scheitert.

In der Konsequenz muss der Klimaschutzvertrag und seine Finanzierung so ausgestaltet werden, dass er mit verschiedenen Szenarien kompatibel bleibt.

## **2) Aufbau von grünen Leitmärkten und Standards für klimafreundliche Baustoffe:**

Der Aufbau einer soliden Nachfrage nach klimafreundlichen Baustoffen und Gebäuden muss die Transformation der Zementindustrie flankieren. Über Klimaschutzverträge kann die Produktion von CO<sub>2</sub>-armem Zement abgesichert werden, um das Angebot an klimafreundlichen Baustoffen zu erweitern. Um jedoch das volle Potenzial einer Nachfrage nach CO<sub>2</sub>-armen Zementprodukten und anderen klimafreundlichen Alternativen zu hebeln, müssen entsprechende Produktstandards wissenschaftlich

definiert und in verständlicher Weise vermarktet werden. Dies kann durch geeignete Verpflichtungen zur Produktkennzeichnung oder der Definition von Produkt- und Baustandards geschehen. Die Definition von klimafreundlichem Zement als Gegenstand der Förderung von Klimaschutzverträgen stellt dafür einen ersten Schritt dar. Über Produktkennzeichnungen kann auch das Verhalten der verarbeitenden Unternehmen und der Konsumentinnen und Konsumenten beeinflusst werden. Darüber hinaus müssen auch Instrumente zur Förderung der Nachfrage nach klimafreundlichen Produkten geschaffen werden. Ein Beispiel ist die Definition von Nachhaltigkeitskriterien für die öffentliche Beschaffung. Dabei gilt es jeweils zu beachten, dass Verzerrungen zwischen verschiedenen aus ökologischer Perspektive gleichwertigen Zementqualitäten und Baustoffen insgesamt vermieden werden.

## **3) Synergie mit einer nachhaltigen Nutzungshierarchie von Biomasse:**

Im Rahmen des *Fit-for-55 Package* hat die EU-Kommission neue Prinzipien für eine aus ökologisch und ökonomischer Perspektive effizienteren Nutzung von Biomasse definiert. Dazu gehört einerseits das Ziel, den Anteil der Erneuerbaren Energien in der Industrie zu erhöhen, andererseits aber auch die Nutzung von Biomasse für die reine Stromproduktion nicht weiter zu fördern. Darüber hinaus sollen verschärfte Nachhaltigkeitskriterien für die Verwendung von Biomasse mit einem klaren Fokus auf die Kaskadennutzung definiert werden. Über die Nutzung von Biomasse sollen auch CO<sub>2</sub>-Senkeneffekte erzielt werden – sei es im Rahmen der stofflichen Verwendung von Produkten mit langer Lebensdauer oder aber über die energetische Nutzung in Verbindung mit CCS.

Die Diskussion zur Definition der notwendigen Kriterien und Methoden zur Zertifizierung von nachhaltiger Biomasse und CO<sub>2</sub>-Senkenleistungen steht noch am Anfang, doch im Rahmen der Definition einer Förderung von CCS in der Zementindustrie ergeben sich Chancen, den klimapositiven Betrieb der Anlagen anfangs mit überschüssiger Biomasse aus

35 Ein Grenzausgleichsmechanismus (CBAM) erhöht den Importpreis von CO<sub>2</sub>-intensiven Produkten und schützt somit die europäische Industrie vor *Carbon Leakage*. In der Regel erlaubt ein CBAM aber nicht, den Export von CO<sub>2</sub>-intensiven Grundstoffen vom in der EU geltenden CO<sub>2</sub>-Marktpreis freizustellen. Die europäische Zementindustrie könnte daher im Rahmen eines CBAM Exportverluste erleiden.

der rein energetischen Verwendung und später mit einem steigenden Volumen an biogenen Reststoffen zu sichern.

#### **4) Entwicklung einer Strategie für CCUS und den Aufbau der notwendigen Infrastruktur:**

Ein Spezifikum des Zementsektors besteht in der Notwendigkeit der Errichtung einer CCS-Infrastruktur zur Speicherung unvermeidbarer Prozessemissionen. Mit der Förderung der hier analysierten Klimaschutztechnologien Oxyfuel und E-LEILAC kann ein erster Schritt zur Errichtung solch einer Infrastruktur geleistet werden, indem die Möglichkeit zur Abscheidung des CO<sub>2</sub> im Produktionsprozess geschaffen wird.

Der Aufbau der benötigten Pipelinestruktur zum Transport des abgeschiedenen CO<sub>2</sub> und der anschließenden geologischen Speicherung erfordert jedoch einen klaren regulatorischen Rahmen zur Definition von Verantwortlichkeiten und Absicherung von Risiken. Dazu gehören der Abschluss von Verträgen zwischen der EU und möglichen CO<sub>2</sub>-Abnehmerländern wie Norwegen zur Absicherung der Risiken sowie die Regulierung der Infrastrukturverknüpfung zwischen EU-Ländern über die TEN-E-Richtlinie.

### **7.3 Prinzipien für die rasche Umsetzung**

Wie schon herausgestellt wurde, ist der Aufbau von Anlagen zur CCUS-basierten Zementklinkerproduktion ein notwendiger Schritt für die Transformation zur klimaneutralen Zementproduktion. Um die Kosten für diese Transformation zu minimieren, müssen kurzfristig Rahmenbedingungen geschaffen werden, die es der Industrie ermöglichen, anstehende Investitionen gezielt für den Aufbau oder die Vorbereitung für die zukünftige Nachrüstung mit einer geeigneten CCUS-Technologie und Infrastruktur zu nutzen. Idealerweise werden diese Investitionen durch eine Kombination von Förderinstrumenten abgesichert:

#### **1) Förderung zusätzlicher Investitionen:**

Investitionen, die über eine Neuzustellung der klassischen Zementwerke hinausgehen, können durch eine Kombination von existierenden und neu zu schaffenden Förderinstrumenten bezuschusst werden. Diese Instrumente können einerseits direkt oder anteilig den Aufbau von Oxyfuel- und E-LEILAC-Anlagen oder aber den Aufbau der nötigen Infrastruktur fördern. Beispiele dafür sind Pipelines oder Häfen für den CO<sub>2</sub>-Transport oder die Infrastruktur für den externen Bezug von Strom, Sauerstoff oder Biomasse. Solche Investitionsförderungen lassen sich gut mit Klimaschutzverträgen kombinieren. Eine solche kombinierte Förderung ist vor allem dann erforderlich, wenn eine Anlage aufgrund fehlender Infrastruktur nicht ohne Weiteres auf den CCUS-Betrieb umgestellt werden kann.

Um einer entsprechenden Kombination von Investitions- und Betriebskostenförderung Rechnung zu tragen, muss der Vertragspreis eines Klimaschutzvertrages entsprechend berechnet werden.

#### **2) Absicherung der Mehrkosten über abgestimmte Klimaschutzverträge:**

Verbleibende Mehrkosten bei der Investition und beim Betrieb von CCUS-Anlagen müssen je nach Betriebskonzept quantifiziert und über einen Klimaschutzvertrag abgesichert werden. Dabei muss der Vertrag über eine Dynamisierung auf relevante Variationen und Entwicklungen bei den betrieblichen Mehrkosten, bei den Regularien zu den kostenfreien Zuteilungen im EU-EHS und der Nachfrage im Rahmen von grünen Leitmärkten abgestimmt werden. Zudem müssen Klimaschutzverträge so definiert werden, dass sie sich über die Zeit kombinieren und gegebenenfalls ersetzen lassen. Es muss zum Beispiel möglich sein, den existierenden Brennstoffmix sukzessive durch den Einsatz von BECCS zu ersetzen und somit über die Zeit hinweg CO<sub>2</sub>-Senken zu schaffen. Zudem sollten Klimaschutzverträge sich in Bezug auf Entwicklungen beim Transport und der Speicherung oder aber einer langfristigen Nutzung von CO<sub>2</sub> anpassen lassen.

## 7.4 Prinzipien für das Auswahlverfahren

Die Vergabe einer Förderung durch Klimaschutzverträge kann im ersten Schritt über ein zweistufiges Auswahlverfahren geschehen, das staatlich organisiert wird und allen Unternehmen, die in Deutschland eine geeignete CCUS-basierte Anlage zur Produktion von Zementklinker oder gegebenenfalls auch gebranntem Kalk aufbauen möchten, offensteht.

In der ersten Stufe des Verfahrens müssen die teilnehmenden Unternehmen auf der Basis einer Projektskizze das anvisierte Betriebskonzept und die daraus erwachsenden Mehrkosten definieren, um sich damit für eine Förderung zu bewerben. Da Betriebskonzepte und ihre Umsetzung im Rahmen existierender Anlagen sehr unterschiedlich sein können, ist es wichtig, dass über die Definition und Verwendung einheitlicher Kriterien und eines geeigneten Transformationskostenrechners Vergleichbarkeit geschaffen wird. Im Rahmen dieser Kriterien spielt die klare Definition der CO<sub>2</sub>-Minderungskosten eine zentrale Rolle, da sie nicht nur Grundlage für die Diskussion und Definition eines geeigneten Vertragspreises ist, sondern auch ein zentrales Kriterium für die Projektauswahl darstellt.

Neben der reinen Kosteneffizienz sollten für die Auswahl der Projekte aber auch weitere Kriterien definiert werden. Beispiele dafür sind:

### 1) Definition eines betrieblichen Transformationspfades zur Klimaneutralität:

Der Aufbau einer CCUS-Anlage stellt in der Regel nur einen der notwendigen Schritte auf dem Pfad zur Klimaneutralität dar. Um sicherzustellen, dass Unternehmen eine komplette und umsetzbare Strategie zur Erreichung der Klimaneutralität haben, sollte der gesamte Transformationspfad im Rahmen des Auswahlverfahrens schlüssig dargelegt werden. Dabei gilt es sicherzustellen, dass die Klimaschutzanlage perspektivisch Zugang zu einer CCS-Infrastruktur hat und der Betrieb mit BECCS möglich ist.

Im Hinblick auf eine langfristige Verwendung des CO<sub>2</sub> als Alternative zum CCS erscheint es sinnvoll, auch solche Vorschläge und Konzepte ad hoc für eine Förderung zu prüfen. Geeignete Kriterien für eine Förderung solcher CCU-Projekte müssten gegebenenfalls in Abstimmung mit der EU-Kommission entwickelt werden, um eine Kohärenz mit den zu erwartenden EU-EHS-Regulativen sicherzustellen.

### 2) Positive Übertragungseffekte:

Damit CCUS-Anlagen in der Zement- oder auch Kalkindustrie nach ihrem Beitrag als Anker für den Aufbau von klimaneutralen Produktionsverbänden und der für die Klimaneutralität Deutschlands strategischen Infrastruktur ausgewählt und gefördert werden können, ist es sinnvoll, dass auch diese Aspekte im Rahmen der Projektauswahl durch geeignete Kriterien evaluiert werden. Beispiele für relevante Synergien sind:

- die Nutzung von Sauerstoff aus der Wasserstoffelektrolyse für das Oxyfuel-Verfahren,
- die Nutzung von regionalen biogenen Abfallstoffen oder Biogas,
- Nutzung des CO<sub>2</sub> (CCU),
- Synergien bei der Nutzung der Infrastruktur für den CO<sub>2</sub>-Transport.

### 3) Eigenanteile zur freien Vermarktung

Unternehmen, die sich verpflichten, einen Teil der Produktion als CO<sub>2</sub>-armes Produkt am freien Markt abzusetzen und deshalb nur eine anteilige Förderung beantragen, könnten im Auswahlverfahren entsprechend bevorzugt werden.

Auf der Basis von geeigneten Kriterien kann somit im ersten Schritt des Auswahlverfahrens eine wettbewerbliche Auswahl getroffen werden, um sicherzustellen, dass Projekte gefördert werden, die mit dem Ziel der Klimaneutralität vereinbar sind, aber auch geringe CO<sub>2</sub>-Minderungskosten und hohe positive Übertragungseffekte bieten.

Im zweiten und abschließenden Schritt des Auswahlverfahrens kann dann ein projektspezifischer Klimaschutzvertrag ausgehandelt werden, um damit auf anlagen- und konzeptspezifische Eigenheiten einzugehen. Dabei sollten das vorgeschlagene Betriebskonzept geprüft und der generische Transformationskostenrechner in ein projektspezifisches Finanzmodell übertragen werden. Dieses Modell und die daraus errechneten CO<sub>2</sub>-Minderungskosten stellen dann die Grundlage für die Definition des Klimaschutzvertrages dar. Dabei müssen auch die Mechanismen für die Dynamisierung, Verifizierung und Abrechnung aller Vertragsparameter in geeigneter Form festgelegt werden. Für erste Projekte sollte darüber hinaus ein betriebswirtschaftliches Audit im Rahmen von regelmäßigen Abrechnungsperioden erfolgen.

Auf der Basis der ersten Erfahrungen kann das Ausschreibungsmodell weiterentwickelt und gegebenenfalls vereinfacht werden.

## 7.5 Ein Appell für die zügige Umsetzung

Im Koalitionsvertrag vom November 2021 haben SPD, Bündnis 90/Grüne und FDP die Wichtigkeit einer zügigen Transformation des Industriestandorts Deutschland durch neue Geschäftsmodelle und Technologien unterstrichen, und dabei auch die geplante Einführung von Klimaschutzverträgen dokumentiert (SPD, Bündnis 90/Die Grünen, FDP 2021). Gerade wegen der hier zusammengefassten Unsicherheiten ist eine zügige und pragmatische Umsetzung von Klimaschutzverträgen ein wichtiger und notwendiger Schritt, um die Transformation der Zementbranche anzugehen. Dabei gilt es, möglichst schnell die Rahmenbedingungen für geeignete Investitionsentscheidungen zu schaffen, da die nachgeschalteten Genehmigungsverfahren und der Anlagenbau in etwa drei Jahre erfordern. Somit müssen die entsprechenden Entscheidungen für eine Förderung der Investitionen und die Zusagen zur Absicherung der vergleichsweise geringen Mehrkos-

ten beim Betrieb dieser Anlagen schon in der nächsten Legislaturperiode erfolgen.

Um diesen Prozess erfolgreich anzustoßen und weiterzuentwickeln, sollte pragmatisches Handeln, aber auch eine strategische Entwicklung der Rahmenbedingungen im Vordergrund stehen. Klimaschutzverträge bieten dabei die Chance, schnell die notwendigen Investitionsentscheidungen abzuschließen. Ihre strategische Ausgestaltung und Integration mit den hier angesprochenen Rahmenbedingungen sind entscheidend, wenn es darum geht, CO<sub>2</sub>-armen oder sogar klimapositiven Zement als einen Standard im globalen Wettbewerb zu etablieren.

## 8 Annex I: Beschreibung des Transformationskostenrechners

Das Ziel des TKR ist es, eine erste, qualifizierte Abschätzung der auf die CO<sub>2</sub>-Minderung bezogenen Mehrkosten einer CO<sub>2</sub>-armen oder klimaneutralen Produktion im Vergleich zur konventionellen Referenzanlage zu treffen. Die übergeordneten Ziele dabei sind:

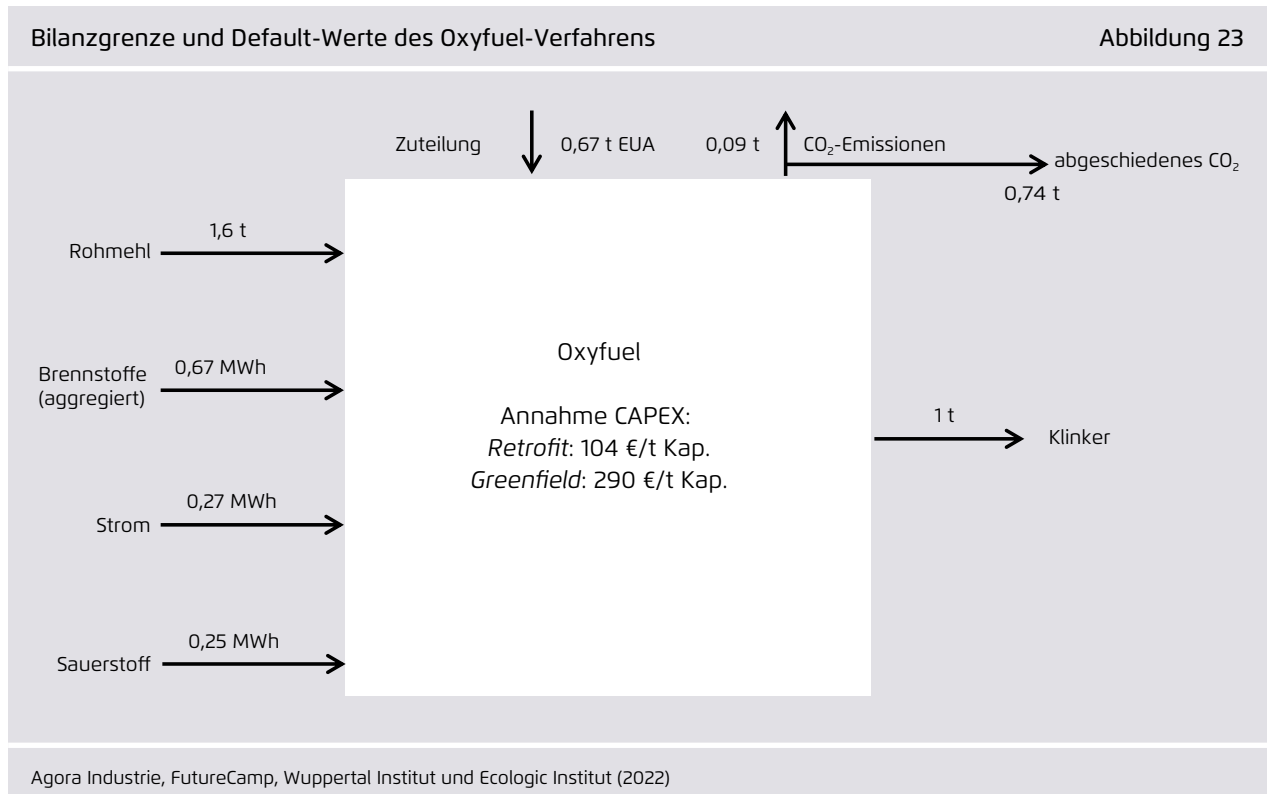
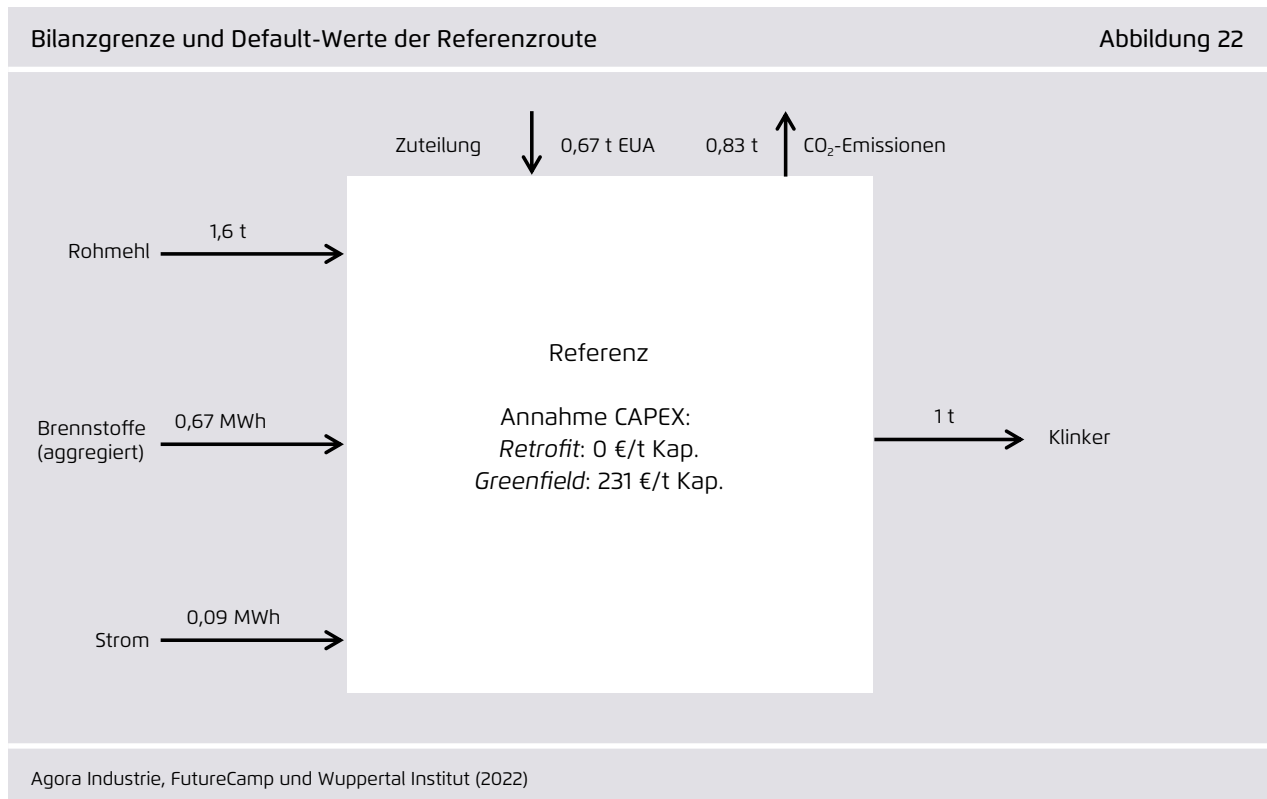
1. Die Identifikation und allgemeingültige Quantifizierung der wesentlichen Kostentreiber für die Transformation einer typischen Primärstahlproduktion auf der Basis der spezifischen CO<sub>2</sub>-Minderungskosten.
2. Die Definition eines Werkzeuges mit dem eine erste Einschätzung und Diskussion von spezifischen Projekten, gegebenenfalls als erster Schritt zur Vergabe von Klimaschutzverträgen, möglich wird.
3. Das Schaffen einer transparenten Grundlage für die Diskussion über Kosten und Nutzen der Transformation einer Produktionsanlage und der dafür nötigen Infrastruktur.
4. Das Schaffen einer Grundlage zur Abschätzung des gesamten Investitions- und Finanzierungsbedarfs für die Transformation des Stahlsektors zur Klimaneutralität.

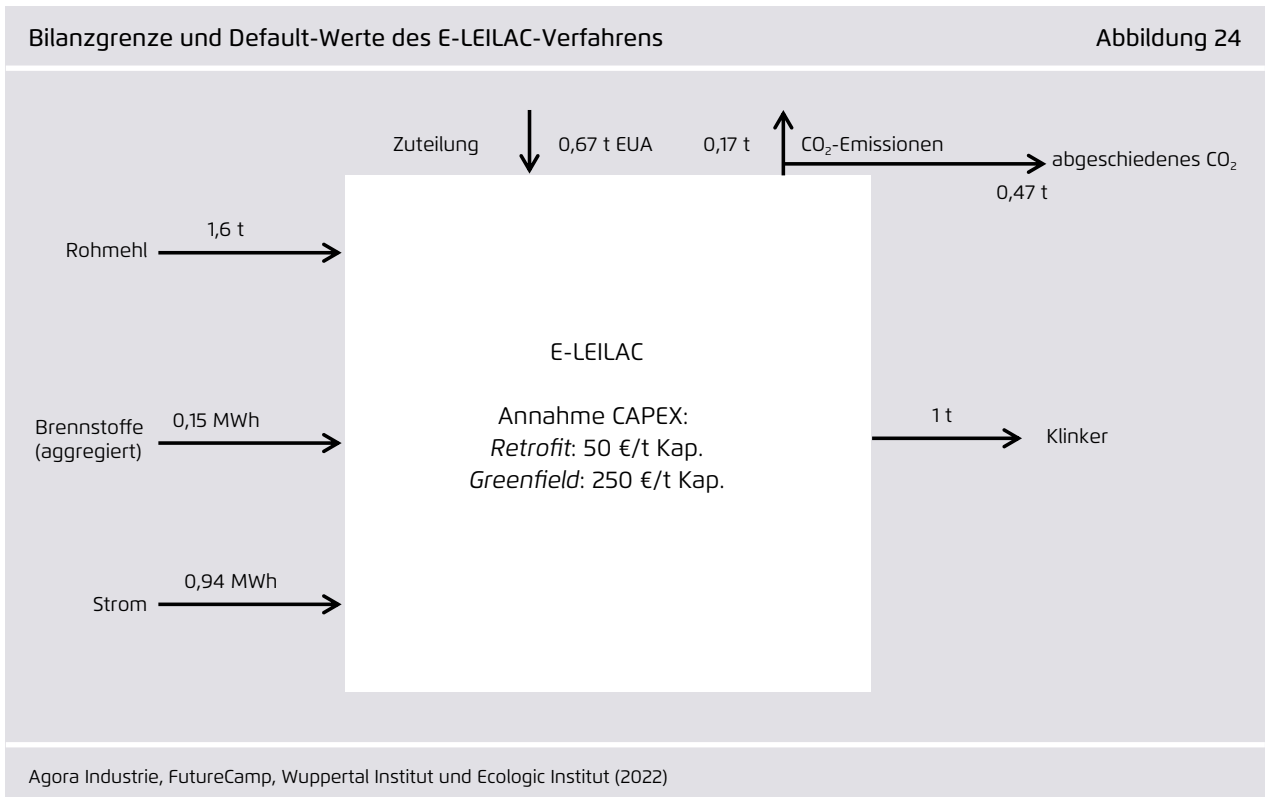
Dieses Werkzeug soll die allgemeine Diskussion und Einschätzung der generellen Transformationskosten unterstützen. Die Verwendung für die Einschätzung konkreter Projekte ist unter eigener Verantwortung der Beteiligten möglich, kann aber eine spezifische Investitionsanalyse nicht ersetzen.

Der Aufbau des Transformationskostenrechners in Excel ist so gestaltet, dass auf Basis hinterlegter Default-Werte individuelle Handeingaben sowohl hinsichtlich der Preisannahmen als auch hinsichtlich

der spezifischen Verbrauchsmengen möglich sind. Als Bilanzgrenze wird die Produktion einer Tonne Zementklinker ohne Weiterverarbeitung betrachtet.

Nachfolgend sind die Bilanzgrenzen der betrachteten Routen sowie die hinterlegten Default-Werte für die Produktion einer Tonne Zementklinker dargestellt. Die hinterlegten Annahmen und Referenzen zu den Default-Werten sind im Annex dargelegt.





**Brennstoffmix nach Verfahren in MWh/t Klinker** Tabelle 10

MWh/t Klinker	Referenz	Oxyfuel	E-LEILAC
Alternativbrennstoffe	0,67	0,67	0,15
Steinkohle	0,07	0,07	0,04
Braunkohle	0,18	0,18	0,10
Petrolkoks	0,02	0,02	0,02
Erdgas	0,01	0,01	0,01
Heizöl	0,01	0,01	0,01
<b>gesamt</b>	<b>0,96</b>	<b>0,96</b>	<b>0,33</b>

Agora Industrie, FutureCamp, Wuppertal Institut und Ecologic Institut (2022)





## 9 Annex II: Hinterlegte Annahmen zu Preisen und Berechnungsparametern

Annahmen zu Preisen				Tabelle 11
Energiepreise	Erläuterung	Einheit	Defaultwert	Kommentar
Alternativbrennstoffe	ECRA (2017)	€/MWh	2,3 €/MWh	Umrechnung in €/MWh mittels Heizwert 16,7 MJ/kg (Eigene Berechnung für ABS-Mix). Wert für 2016
Steinkohle	ECRA (2017)	€/MWh	9,6 €/MWh	
Braunkohle	Ökoinstitut (2017)	€/MWh	6,2 €/MWh	
Petrolkoks	IHS Markit (2020)	€/MWh	3,7 €/MWh	Heizwert 31,359 MJ/kg (AG Energiebilanzen); 1\$=0,82 €; 10% Aufschlag auf FOB (Schätzung)
Erdgas	IEAGHG 2013/ Voldsund et al. (2019)	€/MWh LHV	21,6 €/MWh	
Biomasse (Holzhackschnitzel)	FNR (2012)	€/MWh	24,4 €/MWh	eigene Umrechnung von 100 €/t mit Heizwert 4,1 kWh/kg
Biomethan	Schneider et al. (2019)	€/MWh	57 €/MWh	
Heizöl	Börsenpreis (Börse online, 1.12.2020)	€/MWh	30,6 €/MWh	Heizwert 9,8 kWh/Liter
Strom	ECRA (2009)	€/MWh	50 €/MWh	
Rohmehl	Voldsund et al. (2019)	€/t Rohmehl	5 €/t	
Sauerstoff	Vogl et al. (2018)	€/t	63,4 €/t O <sub>2</sub>	
CO <sub>2</sub> -Abtransportgebühren	Gebühr für Abtransport und Einlagerung pro t CO <sub>2</sub>		26 €/t CO <sub>2</sub>	Pipeline (12 € Transport + 14 € Speicherung)
			36 €/t CO <sub>2</sub>	Schiff (22 € Transport + 14 € Speicherung)

Agora Industrie, FutureCamp, Wuppertal Institut und Ecologic Institut (2022)

Annahmen zur Kapitalkostenberechnung			Tabelle 12
Wirtschaftlichkeitsparameter	Erläuterung	Einheit	Für Bilanz-Rechnung gewählter Wert
Abschreibungszeitraum Schachtöfen, Drehöfen	Afa Tabelle	a	10
Zinssatz	Vogl et al. (2018) und Wörtler et al. (2013)	%	8

Agora Industrie, FutureCamp, Wuppertal Institut und Ecologic Institut (2022)

Annahmen zur kostenfreien Zuteilung					Tabelle 13
kostenfreie Zuteilung	Einheit	2013–2020	2021–2025	2026–2030	Rate Update
Grauzementklinker	EUA/t Grauzementklinker	0,766	0,692	0,667	0,644 %
Weißzementklinker	EUA/t Weißzementklinker	0,987	0,957	0,947	0,2026 %
Wärme	EUA/MWh	0,22428	0,170	0,153	1,6 %
Brennstoff	EUA/MWh	0,20196	0,153	0,137	1,6 %

Agora Industrie, FutureCamp, Wuppertal Institut und Ecologic Institut (2022)

---

## 10 Literatur

---

**Agora Energiewende und Forum New Economy (2021):** *Öffentliche Finanzierung von Klima- und anderen Zukunftsinvestitionen*

**Agora Industrie, FutureCamp, Wuppertal Institut und Ecologic Institut (2022):** *Klimaschutzverträge für die Industrietransformation: Kurzfristige Schritte auf dem Pfad zur Klimaneutralität der deutschen Grundstoffindustrie*

**Agora Energiewende, FutureCamp, Wuppertal Institut und Ecologic Institut (2021):** *Klimaschutzverträge für die Industrietransformation. Analyse zur Stahlbranche*

**BMU (2021a):** *Treibhausgasemissionen sinken 2020 um 8,7 Prozent*, vom 16.03.2021. Online verfügbar unter: <https://www.bmu.de/pressemitteilung/treibhausgasemissionen-sinken-2020-um-87-prozent>

**BMU (2021b):** *Lesefassung des Bundes-Klimaschutzgesetzes 2021 mit markierten Änderungen zur Fassung von 2019*, Stand: 07.07.2021. Online verfügbar unter: [https://www.bmu.de/fileadmin/Daten\\_BMU/Download\\_PDF/Klimaschutz/ksg\\_aendg\\_2021\\_3\\_bf.pdf](https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/ksg_aendg_2021_3_bf.pdf)

**BMU (2021c):** *Eckpunkte für eine Förderrichtlinie Klimaschutzverträge zur Umsetzung des Pilotprogramms „Carbon Contracts for Difference“*

**CEMCAP (2018):** *Deliverable 4.4 Cost of critical performance in CO<sub>2</sub> capture processes comparative techno-economic analysis of CO<sub>2</sub> capture in cement plants*

**CEMCAP (2019):** *Deliverable 4.6 CEMCAP comparative techno-economic analysis of CO<sub>2</sub> capture in cement plants*

**COM (2020):** Commission Staff Working Document Impact Assessment, Accompanying the document: *Communication From The Commission To The European Parliament, The Council, The European Economic And Social Committee Of The Regions, Stepping Up Europe`s 2030 Climate Ambition, Investing in a climate-neutral future for the benefit of our people.* COM (2020) 562 final - SEC (2020) 301 final - SWD(2020) 177 final - SWD(2020) 178 final

**COM (2021a):** *Proposal for a Directive Of The European Parliament And Of The Council amending Directive 2003/87/EC establishing a system for greenhouse gas emission allowance trading within the Union, Decision (EU) 2015/1814 concerning the establishment and operation of a market stability reserve for the Union greenhouse gas emission trading scheme and Regulation (EU) 2015/757*

**COM (2021b):** *Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and social Committee and the Committee of the Regions. „Fit for 55‘: delivering the EU’s 2030 Climate Target on the way to climate neutrality.* Online verfügbar unter: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52021DC0550&from=EN>

**Deutsche Emissionshandelsstelle (DEHSt) (2014):** *Ergebnisse der kostenlosen Zuteilung von Emissionsberechtigungen an Bestandsanlagen für die 3. Handelsperiode 2013–2020*

**Durusut, E., Mattos, A. (2018):** *Industrial carbon capture business models.* Report for the Department of Business, Energy and Industrial Strategy

**European Cement Research Academy (2009):** *Technical Report – ECRA CCS Project Report about Phase II*

**European Cement Research Academy (2012):** *Technical Report – ECRA CCS Project Report about Phase III*

**European Cement Research Academy (2017):** CSI/ECRA- Technology Papers 2017. *Development of State of the Art Techniques in Cement Manufacturing: Trying to Look Ahead.* Düsseldorf

**European Technology Platform for Zero Emission Fossil Fuel Power Plants (2011):** *The cost of CO<sub>2</sub> capture, transport and storage.* Post-demonstration CCS in the EU

**Fishedick, M., Marzinkowski, J., Winzer, P., Weigel, M. (2014):** *Techno-economic evaluation of innovative steel production technologies.* Journal of Cleaner Production 84, 563-580. DOI: 10.1016/j.jclepro.2014.05.063

**Gardarsdottir, S. O., De Lena, E., Romano, M., Rousanally, S., Voldsund, M., Pérez-Calvo, J.-F., Berstad, D., Fu, C., Anantharaman, R., Sutter, D., Gazzani, M., Mazzotti, M., & Cinti, G. (2019):** *Comparison of Technologies for CO<sub>2</sub> Capture from Cement Production—Part 2: Cost Analysis.* Energies, 12(3), 542. <https://doi.org/10.3390/en12030542>

**Hills, T. P., Leeson, D., Florin, N.H., Fennel, P. (2015):** *Carbon Capture in the Cement Industry: Technologies, Progress, and Retrofitting.* In: Environmental Science and Technology, Vol. 50, 368-377

**Hölling, M., Weng, M. (2018):** *Induktive Knüppelvorwärmung als eine Möglichkeit zur Bereitstellung von Regelenergie*

**IEAGHG (2021):** *Exporting CO<sub>2</sub> for Offshore Storage – The London Protocol's Export Amendment and Associated Guidelines and Guidance.* 2021-TR02

**International Energy Agency Greenhouse Gas (2013):** *Deployment of CCS in the cement industry.* 2013/19, December 2013

**Prognos, Öko-Institut, Wuppertal-Institut (2020):** *Klimaneutrales Deutschland.* Studie im Auftrag von Agora Energiewende, Agora Verkehrswende und Stiftung Klimaneutralität

**Prognos, Öko-Institut, Wuppertal-Institut (2021):** *Klimaneutrales Deutschland 2045. Wie Deutschland seine Klimaziele schon vor 2050 erreichen kann.* Zusammenfassung im Auftrag von Stiftung Klimaneutralität, Agora Energiewende und Agora Verkehrswende

**Rubin, E., Davison, J., Herzog, H. J. (2015):** *The cost of CO<sub>2</sub> capture and storage.* International Journal of Greenhouse Gas Control, Vol. 40, 378-400

**Ruppert, J., Wagener, C., Palm, S., Scheuer, W., Hoenig, V. (2020):** *Prozesskettenorientierte Ermittlung der Material- und Energieeffizienzpotenziale in der Zementindustrie.* Abschlussbericht im Auftrag des Umweltbundesamtes

**Schneider, C. et al. (2019):** *Klimaneutrale Industrie: Ausführliche Darstellung der Schlüsseltechnologien für die Branchen Stahl, Chemie und Zement.* Analyse im Auftrag von Agora Energiewende. Berlin, November 2019

**Stiftung Klimaneutralität, Agora Energiewende, Agora Verkehrswende (2021):** *Politikinstrumente für ein klimaneutrales Deutschland.* 50 Empfehlungen für die 20. Legislaturperiode (2021–2025)

**SPD, Bündnis 90/Die Grünen, FDP (2021):** *Mehr Fortschritt wagen. Bündnis für Freiheit, Gerechtigkeit und Nachhaltigkeit.*

**University of Cambridge Institute for Sustainability Leadership (CISL) and Agora Energiewende (2021):** *Tomorrow's markets today: Scaling up demand for climate neutral basic materials and products.* CLG Europe

**Vogl, V., Åhman, M., Nilsson, L. J. (2018):** *Assessment of hydrogen direct reduction for fossil-free steelmaking.* Journal of Cleaner Production 203, 736-745

**Zieri, W., Ismail, I. (2018):** *Alternative Fuels from Waste Products in Cement Industry.* In: Martinez, L., Kharissova, O., Kharisov, B. (eds) Handbook of Ecomaterials. Springer, Cham





---

# Publikationen von Agora Energiewende

---

## AUF DEUTSCH

### Energiesicherheit und Klimaschutz vereinen

Maßnahmen für den Weg aus der fossilen Energiekrise

### Klimaschutzverträge für die Industrietransformation (Gesamtstudie)

Kurzfristige Schritte auf dem Pfad zur Klimaneutralität der deutschen Grundstoffindustrie

### Die deutsche Braunkohlenwirtschaft 2021

Historische Entwicklungen, Ressourcen, Technik, wirtschaftliche Strukturen und Umweltauswirkungen

### Die Energiewende in Deutschland: Stand der Dinge 2021

Rückblick auf die wesentlichen Entwicklungen sowie Ausblick auf 2022

### Öffentliche Finanzierung von Klima- und anderen Zukunftsinvestitionen

### Ein beihilfefreies und schlankeres EEG

Vorschlag zur Weiterentwicklung des bestehenden Erneuerbare-Energien-Gesetzes

### Windenergie und Artenschutz – Wege nach vorn

### Der Photovoltaik- und Windflächenrechner

Ein Beitrag zur Diskussion um die Ausweisung von Flächen

für Photovoltaik- und Windenergieanlagen an Land

### Klimaschutzverträge für die Industrietransformation (Stahl)

Analyse zur Stahlbranche

### Das Klimaschutz-Sofortprogramm

22 Eckpunkte für die ersten 100 Tage der neuen Bundesregierung

### Zukünftige Anforderungen an eine energiewendegerechte Netzkostenallokation

### Abschätzung der Klimabilanz Deutschlands für das Jahr 2021

### Stellungnahme zum Szenariorahmen Gas 2022-2032 der Fernleitungsnetzbetreiber

Konsultation durch die Fernleitungsnetzbetreiber

### Politikinstrumente für ein klimaneutrales Deutschland

50 Empfehlungen für die 20. Legislaturperiode (2021-2025)

### Ein Gebäudekonsens für Klimaneutralität (Langfassung)

10 Eckpunkte wie wir bezahlbaren Wohnraum und Klimaneutralität 2045 zusammen erreichen



---

# Publikationen von Agora Energiewende

---

## AUF ENGLISCH

### Getting the Transition to CBAM Right

Finding pragmatic solutions to key implementation questions

### The EU's Carbon Border Adjustment Mechanism

Challenges and Opportunities for the Western Balkan Countries

### Transitioning to a climate-neutral EU buildings sector

Benchmarks for the success of the European Green Deal

### 12 Insights on Hydrogen

### Global Steel at a Crossroads

Why the global steel sector needs to invest in climate-neutral technologies in the 2020s

### The Future of Lignite in the Western Balkans

Scenarios for a 2040 Lignite Exit

### Phasing out coal in the EU's power system by 2030

A policy action plan

### Making renewable hydrogen cost-competitive

Policy instruments for supporting green H<sub>2</sub>

### EU-China Roundtable on Carbon Border Adjustment Mechanism

Briefing of the first dialogue on 26 May 2021

### Towards climate neutrality in the buildings sector (Summary)

10 Recommendations for a socially equitable transformation by 2045

### Matching money with green ideas

A guide to the 2021–2027 EU budget

### Tomorrow's markets today

Scaling up demand for climate neutral basic materials and products

### Breakthrough Strategies for Climate-Neutral Industry in Europe (Study)

Policy and Technology Pathways for Raising EU Climate Ambition

### Towards a Climate-Neutral Germany by 2045

How Germany can reach its climate targets before 2050

Alle Publikationen finden Sie auf unserer Internetseite: [www.agora-energiewende.de](http://www.agora-energiewende.de)

---

## Über Agora Industrie

Agora Industrie erarbeitet unter dem Dach von Agora Energiewende Strategien und Politikinstrumente für eine Transformation der Industrie zur Klimaneutralität – in Deutschland, Europa und international. Agora Industrie agiert unabhängig von wirtschaftlichen und parteipolitischen Interessen und ist ausschließlich dem Klimaschutz verpflichtet.

---



Unter diesem Scan-Code steht diese Publikation als PDF zum Download zur Verfügung.

### **Agora Industrie**

Anna-Louisa-Karsch-Straße 2 | 10178 Berlin

T +49 (0)30 700 14 35-000

F +49 (0)30 700 14 35-129

[www.agora-industrie.de](http://www.agora-industrie.de)

[info@agora-industrie.de](mailto:info@agora-industrie.de)

