

Roadmap für eine treibhausgasneutrale Kalksandsteinindustrie in Deutschland



© Bundesverband Kalksandsteinindustrie e.V. / Tomml (iStock)

Eine Studie für den Bundesverband Kalksandsteinindustrie e. V.

von FutureCamp Climate GmbH

Impressum

Herausgeber

Bundesverband Kalksandsteinindustrie e. V.

Entenfangweg 15, 30419 Hannover

Tel. +49 511 27954-0

info@kalksandstein.de, www.kalksandstein.de

Autoren

Dr. Roland Geres, Johanna Lausen, Stefan Weigert

FutureCamp Climate GmbH

Aschauer Str. 30, 81549 München

Tel. +49 (1520) 380 69 48

webkontakt@future-camp.de, www.future-camp.de

© FutureCamp Climate GmbH, November 2021

Haftungsausschluss

Die vorliegende Studie wurde unabhängig im Auftrag des Bundesverbandes Kalksandsteinindustrie e.V. durch die FutureCamp Climate GmbH (FutureCamp) erstellt. Zur Sicherstellung der Fehlerfreiheit der in dieser Studie dargestellten Informationen wurden angemessene Maßnahmen getroffen. Dennoch gibt FutureCamp keine Zusicherungen und Gewährleistungen für die Richtigkeit der getroffenen Aussagen und übernimmt keine Haftung für Ungenauigkeiten und Unvollständigkeiten. Gegenüber Parteien, die diese Studie nutzen, wird weder jetzt noch in Zukunft durch FutureCamp, seine Mitarbeiter oder Vertreter eine ausdrückliche oder implizite Zusicherung oder Gewährleistung gegeben oder eine Verantwortung oder Haftung übernommen. Jegliche Haftung ist hiermit ausdrücklich ausgeschlossen.

Inhalt

1	Zusammenfassung.....	1
1.1	Einleitung und Methodik	1
1.2	Kernergebnisse.....	3
2	Zielsetzung und Rahmen der Roadmap.....	10
3	Branchenbeschreibung: Die deutsche Kalksandsteinindustrie	11
4	Methodik und Vorgehensweise	14
4.1	Herangehensweise und Scope der Roadmap.....	15
4.2	Definition und Skizzierung der drei Pfade.....	16
4.3	Datenbasis.....	17
4.4	Grundlegende Annahmen und Berechnungsparameter.....	17
4.4.1	Annahmen zur deutschen Kalksandsteinindustrie	17
4.4.2	Annahmen zu Emissionsfaktoren.....	21
4.4.3	Annahmen zu Energiepreisen und CO ₂ -Kosten	23
4.4.4	Annahmen zur Wirtschaftlichkeit.....	25
4.5	Betrachtete Technologien und Maßnahmen	27
4.5.1	Ausgewählte Minderungsmaßnahmen	27
4.5.2	Annahmen zu Technologieverfügbarkeiten und Einsatzzeitpunkte.....	29
4.6	Vorgehen zur Modellierung.....	29
5	Ausgangsbasis	30
5.1	Energieeinsatz und -träger.....	30
5.2	Emissionen	31
5.3	Energiebezogene Kosten.....	33
6	Referenzpfad (Pfad 1)	35
6.1	Maßnahmen	35
6.2	Entwicklung des Energieeinsatzes	36
6.3	Entwicklung der CO ₂ -Emissionen.....	37
6.4	Entwicklung der betrachteten Kosten	41
6.5	Wesentliche Erkenntnisse	43
6.6	Steckbrief Referenzpfad (Pfad 1)	44
7	Pionierpfad (Pfad 2)	46
7.1	Maßnahmen	47
7.2	Entwicklung des Energieeinsatzes	49
7.3	Entwicklung der CO ₂ -Emissionen.....	51
7.4	Entwicklung der energiebezogenen Kosten.....	55
7.5	Sensitivitäten	58
7.5.1	Sensitivität – höhere CO ₂ -Preise	59

7.5.2	Sensitivität – höhere CO ₂ -Preise und Verringerung der EEG-Umlage.....	60
7.6	Wesentliche Erkenntnisse	62
7.7	Steckbrief Pionierpfad (Pfad 2)	63
8	Klimaneutralitätspfad (Pfad 3).....	65
8.1	Maßnahmen	66
8.2	Entwicklung des Energieeinsatzes	69
8.3	Entwicklung der CO ₂ -Emissionen.....	71
8.4	Entwicklung der energiebezogenen Kosten.....	75
8.5	Sensitivitäten	77
8.5.1	Sensitivität – höhere CO ₂ -Preise	79
8.5.2	Sensitivität – höhere CO ₂ -Preise und Verringerung der EEG-Umlage.....	79
8.5.3	Sensitivität – 100 % Grünstrom erst ab 2045	82
8.5.4	Sensitivität - Halbierung Preis Wasserstoff	84
8.6	Wesentliche Erkenntnisse	86
8.7	Steckbrief Klimaneutralitätspfad (Pfad 3).....	87
9	Gegenüberstellung der Ergebnisse	89
9.1	Treibhausgasminderung	90
9.2	Investitionsbedarf.....	91
9.3	Energiebezogene Kosten.....	92
10	Schlussfolgerungen.....	94
11	Anhang	96
11.1	Emissionsfaktoren.....	96
11.2	Energiepreise	97
11.3	Annahmen zur Entwicklung von Emissionsfaktoren sowie zu Preisentwicklungen	98
11.4	Annahmen zur Wirtschaftlichkeitsberechnung.....	100
11.5	Annahmen zu den technischen Maßnahmen zur Emissionsreduktion.....	101
11.6	Annahmen zum Kalkgehalt im Stein und der Recarbonatisierung	102
11.7	Weitere Annahmen	103
11.8	Kennzahlen	104
12	Verzeichnisse	105
12.1	Quellenverzeichnis	105
12.2	Abbildungsverzeichnis	108
12.3	Tabellenverzeichnis.....	111
12.4	Abkürzungssverzeichnis.....	112

1 Zusammenfassung

1.1 Einleitung und Methodik

Die vorliegende Studie „Roadmap für eine treibhausgasneutrale Kalksandsteinindustrie in Deutschland“ von FutureCamp im Auftrag der Kalksandstein-Dienstleistung GmbH zeigt einen möglichen Weg für die Transformation der deutschen Kalksandsteinindustrie in Richtung Treibhausgasneutralität bis zum Zieljahr der deutschen Klimapolitik 2045. Sie stellt auch die damit verbundenen Maßnahmen, Kosten und Voraussetzungen deutlich dar. Dabei werden auch bis 2030 erreichbare Emissionsreduktionen ausgewiesen.

Scope der Roadmap

Bestandteil der Studie sind die Emissionen der Branche. Dabei werden die direkten (Scope 1) und indirekten Emissionen aus dem Bezug von Energien (Scope 2) vollständig einbezogen.

Die Scope 1-Emissionen entstehen insbesondere durch den Brennstoffeinsatz in den Werken sowie den Betrieb der Fuhrparks. Hierzu zählen u. a. das Verbrennen von Erdgas und Heizöl zur Erzeugung von Dampf, Flüssiggaseinsatz bei Verpackungsanlagen sowie der Dieseleinsatz von Staplern. Einige Werke betreiben auch den Sandabbau intern. Die entstehenden Emissionen der Maschinen im Sandabbau sind ebenfalls in Scope 1 berücksichtigt.

Im Scope 2 finden ausschließlich die Emissionen aus dem Fremdstrombezug der Anlagen Berücksichtigung.

Um den Besonderheiten der Branche Rechnung zu tragen, werden auch wichtige Emissionsquellen aus vorgelagerten Prozessen einbezogen. Es werden die Anlieferung der Rohstoffe Kalk und Sand sowie der Transport der Kalksandsteine berücksichtigt. Hinzu kommen die Emissionen aus dem Abbau von Sand, soweit dieser an externe Betreiber ausgelagert ist.

Der weitaus größte Anteil der Scope 3-Emissionen entsteht im Produktionsprozess des zugekauften Branntkalks. Diese Emissionen wiederum setzen sich zu ca. einem Drittel aus energiebedingten Emissionen und zwei Dritteln aus dem Kalkstein stammender CO₂-Emissionen (sogenannter Prozessemissionen)¹.

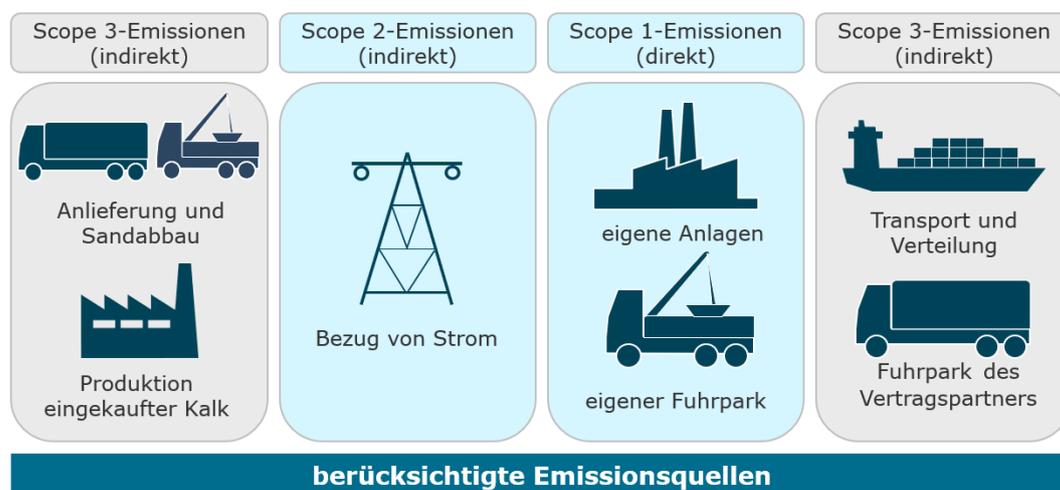


Abbildung 1: Für die Roadmap berücksichtigte Emissionsquellen; Quelle: FutureCamp

¹ Quelle: BVK (2020)

Die dargestellten Scopes werden auf ein virtuelles Durchschnittswerk angewendet². Dieses soll die derzeit 76 realen Werke repräsentieren. Dies erlaubt eine Näherung an die betriebliche Realität – auch wenn sich diese natürlich in der Praxis in jedem Standort und jedem Unternehmen unterschiedlich darstellt.



Abbildungen 2, 3 und 4: Rohstoffe, Recyclingmaterial und Produkt der Kalksandsteinindustrie;
Bildquelle: © Bundesverband Kalksandsteinindustrie e.V.

Ausgangspunkt und historische Entwicklung

In dieser Roadmap wurde das Jahr 2021 als Ausgangsjahr für alle Pfade zugrunde gelegt. Die Treibhausgasemissionen der deutschen Kalksandsteinindustrie betragen demnach rund 0,78 Mio. t CO₂ im Jahr 2021, ermittelt anhand der Brennstoffeinsätze 2019 als repräsentatives Jahr.

Die Herausforderung

Wie andere Branchen auch steht die deutsche Kalksandsteinindustrie vor tiefgreifenden Veränderungen, um ihren Beitrag zur Erreichung der Klimaschutzziele aus dem Abkommen von Paris zu leisten. Zentrale Prozesse in den Werken hängen derzeit noch an fossilen Energieträgern und eine vollständige Abkehr von diesen ist zur Erreichung der Klimaneutralität zwingend notwendig. Dafür müssen die bestehenden Anlagen umfangreich angepasst und teilweise neu errichtet werden. Damit geht ein erheblicher Investitionsbedarf einher. Diese Belastung muss in Zeiten ohnehin steigenden Kostendrucks zusätzlich getragen werden. Die deutsche Kalksandsteinindustrie ist dennoch unvermindert bereit, ihren Beitrag zum Klimaschutz zu leisten. Dabei steht sie aufgrund der politischen Rahmenbedingungen im internationalen Wettbewerb mit weiteren Baustoffen. Importe aus dem Ausland unterliegen nicht dem nationalen Emissionshandelssystem (nEHS) und genießen damit unter Umständen deutliche Wettbewerbsvorteile gegenüber der heimischen Produktion. Daher ist ein effektiver Carbon-Leakage-Schutz unabdingbar, um zu verhindern, dass Anstrengungen zur Emissionsminderung im Inland erhöhte Emissionen im Ausland zur Folge haben.

² Die Darstellung des virtuellen Durchschnittswerks ist in Kapitel 4.4.1 zu finden.

Pfade

In der Roadmap werden drei unterschiedliche Pfade entwickelt und dargestellt. Für alle Pfade gleich ist der Fokus auf die eigenen Produktionsanlagen in Deutschland und die Umsetzung dort möglicher technischer Maßnahmen unter der Annahme gleichbleibender Produktion und ohne Berücksichtigung möglicher Substitutionseffekte im Baustoffwettbewerb.³

Pfad 1 dient als **Referenzpfad**, um einen Vergleichswert für die weiteren Pfade zu definieren. In diesem Pfad kommen keine neuen Technologien und Produktionsprozesse zum Einsatz, sondern es wird von „business as usual“ ausgegangen. Effizienzsteigerungen und notwendiger Anlagentausch (bezüglich der Dampferzeuger) wird abgebildet. Zudem werden bereits heute bekannte externe Rahmenbedingungen z. B. der Bezug von klimaneutralem Strom des deutschen Strommixes bis 2045 zugrunde gelegt. Der Referenzpfad schreibt somit den Status quo in der Branche in die Zukunft fort und liefert im Vergleich mit den weiteren Pfaden entscheidende Erkenntnisse zu den entstehenden zusätzlichen Belastungen auf dem Weg zur Klimaneutralität für die Branche.

In **Pfad 2** werden größere eigene Anstrengungen unternommen, um dem Ziel der Treibhausgasneutralität näher zu kommen. Allerdings werden noch nicht alle dafür notwendigen Maßnahmen aufgrund bestehender Restriktionen flächendeckend umgesetzt. In einigen Werken werden bereits innovative Änderungen vorgenommen und daher trägt der Pfad den Namen **Pionierpfad**. Dieser unterscheidet sich wie auch Pfad 3 stark vom Referenzpfad. Im Pionierpfad wird neben der allgemeinen Effizienzsteigerung die zunehmende Digitalisierung des Produktionsprozesses modelliert. Ziel des Pionierpfades ist, mit realistischem Mehraufwand den Weg zur Klimaneutralität einzuschlagen. Jedoch werden in diesem Pfad noch an der Realität orientierte Limitationen definiert. Daher wird das zusätzlich zur Verfügung stehende Investitionsbudget für die Umsetzung von Maßnahmen zum Klimaschutz hier begrenzt. Neben den Emissionen in den Werken wird in diesem Pfad auch in den Scope 3-Emissionen bereits von einer Verringerung ausgegangen. Dafür wird von einer Teilelektrifizierung des LKW-Verkehrs und einer Minderung der Vorkettenemissionen des Kalks ausgegangen.

In **Pfad 3**, dem **Klimaneutralitätspfad**, wird dagegen auf sämtliche wirtschaftlichen Restriktionen verzichtet. In diesem Pfad wird ermittelt, welche Investitionen nötig sind, um sämtliche notwendigen Maßnahmen zur Klimaneutralität bis 2045 umzusetzen. Dabei wird keine Rücksicht auf die wirtschaftlichen Auswirkungen dieser Entscheidungen genommen. Die Reduktion der Emissionen auf Null bis 2045 wird durch Umsetzung von Maßnahmen bis zur Zielerreichung erzwungen. Die dabei entstehenden Kosten werden bestimmt und interpretiert. In diesem Pfad wird der gesamte Produktionsprozess der deutschen Kalksandsteinindustrie auf neue Technologien umgestellt. Auch die Scope 3-Emissionen werden mit Hilfe der Umstellung von Transport und nun auch insbesondere durch Maßnahmen in der Vorkette Kalkproduktion vollständig reduziert.

1.2 Kernergebnisse

Relevante Maßnahmen und Verlauf der CO₂-Emissionen

Bereits im Referenzpfad sind Emissionsrückgänge zu verzeichnen, die jedoch trotz weiterer Fortschritte deutlich nicht ausreichen, um das Ziel der Treibhausgasneutralität zu erreichen.

³ Alle in Betracht gezogenen technischen Maßnahmen sowie die dazugehörigen Annahmen z. B. zu Investitionskosten, Energieeinsparungen oder Mehrverbräuchen bei anderen Energieträgern (Strom) finden sich in den nachfolgenden Kapiteln sowie im Anhang.

Im Pionierpfad gelingt es dagegen, bereits bis 2030 die Emissionen auf rund 0,658 Mio. t CO₂/a und damit stark zu reduzieren und dem Ziel der Treibhausgasneutralität bis 2045 mit dann noch rund 0,44 Mio. t CO₂/a deutlich näher zu kommen.

Das Ziel der Treibhausgasneutralität wird schließlich im Klimaneutralitätspfad erreicht, jedoch unter Inkaufnahme hoher Kosten.

Die folgende Tabelle fasst die Emissionsentwicklungen zusammen und benennt zugleich die wichtigsten Maßnahmen. Dabei wird getrennt dargestellt, wie sich die Emissionen entwickeln ohne und mit Berücksichtigung der Recarbonatisierung⁴.

Tabelle 1: Übersicht der Emissionsentwicklung der drei betrachteten Pfade (Bezugsgröße: deutsche Kalksandsteinindustrie)

	Referenzpfad (Pfad 1)	Pionierpfad (Pfad 2)	Klimaneutralitätspfad (Pfad 3)
Beschreibung Maßnahmen		Zusätzliche Maßnahmen ggü. Pfad 1 (nicht abschließend):	Zusätzliche Maßnahmen ggü. Pfad 1 (nicht abschließend):
	<ul style="list-style-type: none"> kontinuierliche Effizienzsteigerung beim Einsatz der Energieträger (interner Einflussfaktor) Austausch Dampferzeuger Reduktion Emissionsfaktoren Strom und Erdgas (externer Einflussfaktor) 	<ul style="list-style-type: none"> Digitalisierung des Produktionsprozesses Einsatz von 10 Wasserstoffdampferzeugern Umsetzung Wärmemanagement Reduktion Kalkgehalt auf 6 % bis 2045 Reduktion Emissionsfaktor (EF) Kalk um 1/3 	<ul style="list-style-type: none"> Austausch inkl. Brennstoffwechsel Dampferzeuger Umsetzung Wärmemanagement Ersatz Wärmespeicher Umstellung (Werks-)Verkehr Reduktion Kalkgehalt auf 5 % bis 2045 Reduktion Emissionsfaktor Kalk auf null
Emissionsentwicklung der drei betrachteten Pfade ohne Recarbonatisierung			
Verlauf CO ₂ -Emissionen			
Emissionsentwicklung	Bis 2030: <ul style="list-style-type: none"> Senkung auf 768 Tsd. t CO₂ 	Bis 2030: <ul style="list-style-type: none"> Senkung auf 658 Tsd. t CO₂ 	Bis 2030: <ul style="list-style-type: none"> Senkung auf 595 Tsd. t CO₂
	Bis 2045: <ul style="list-style-type: none"> Senkung auf 738 Tsd. t CO₂ 	Bis 2045: <ul style="list-style-type: none"> Senkung auf 442 Tsd. t CO₂ Zusätzlich 296 Tsd. t CO₂ Minderungen ggü. Referenzpfad 	Bis 2045: <ul style="list-style-type: none"> Senkung auf 0 t CO₂ Zusätzlich 738 Tsd. t CO₂ Minderungen ggü. Referenzpfad

⁴ Ausführliche Annahmen zur Recarbonatisierung werden in Kapitel 4.4.1 beschrieben.

	Referenzpfad (Pfad 1)	Pionierpfad (Pfad 2)	Klimaneutralitätspfad (Pfad 3)
Emissionsentwicklung der drei betrachteten Pfade mit Recarbonatisierung			
Verlauf CO ₂ -Emissionen			
Emissionsentwicklung	Bis 2030: <ul style="list-style-type: none"> • Senkung auf 706 Tsd. t CO₂ 	Bis 2030: <ul style="list-style-type: none"> • Senkung auf 595 Tsd. t CO₂ 	Bis 2030: <ul style="list-style-type: none"> • Senkung auf 532 Tsd. t CO₂
	Bis 2045: <ul style="list-style-type: none"> • Senkung auf 568 Tsd. t CO₂ 	Bis 2045: <ul style="list-style-type: none"> • Senkung auf 282 Tsd. t CO₂ • Zusätzlich 286 Tsd. t CO₂ Minderungen ggü. Referenzpfad 	Bis 2045: <ul style="list-style-type: none"> • Senkung auf -149 Tsd. t CO₂ • Zusätzlich 717 Tsd. t CO₂ Minderungen ggü. Referenzpfad

Entwicklung energiebezogener Kosten

Nachfolgende Tabelle gibt wieder, wie sich die Pfade bezüglich der in dieser Roadmap betrachteten Kosten unterscheiden. Die Berechnungen zeigen, wie hoch Mehrkosten sind und wie sich diese auf Investitionen und Betriebsausgaben verteilen. Ferner ist der zeitliche Verlauf ebenso wiedergegeben wie die wesentlichen Kostentreiber. Erkennbar ist im zweiten Teil der Tabelle auch, wie stark CO₂-Emissionen und -Kosten aus dem Bezug von Kalk das Ergebnis beeinflussen.

Auf diese Weise werden die größten branchenspezifischen Hemmnisse erkennbar und es ergeben sich Anknüpfungspunkte für Schlussfolgerungen zu den politischen Rahmenbedingungen.

Tabelle 2: Übersicht Entwicklung energiebezogener Kosten für die betrachteten Pfade inkl. CO₂-Kosten aus Kalk (Bezugsgröße: deutsche Kalksandsteinindustrie)

	Referenzpfad (Pfad 1)	Pionierpfad (Pfad 2)	Klimaneutralitätspfad (Pfad 3)	
Energiebezogene Kosten setzen sich zusammen aus: Betriebskosten, Kapitalkosten, CO ₂ -Kosten (inkl. Kalk), Kosten der Energieträger				
energiebezogene Kostenentwicklung	Kosten 2045:			
	190 Mio. €/a	164 Mio. €/a	192 Mio. €/a	
	Mehrkosten zum Referenzpfad:	-26 Mio. €/a	+2 Mio. €/a	
	Gesamtinvestitionskosten:			
	238 Mio. €	342 Mio. €	536 Mio. €	
	Mehrkosten zum Referenzpfad:	+194 Mio. €	+298 Mio. €	
	Davon Investitionskosten in (klimaschutz-)spezifische Maßnahmen:			
	Gesamt:	0 €	37,8 Mio. €	231,9 Mio. €
	mittlere Investitionskosten spezifische Maßnahmen pro Jahr:	-	1,5 Mio. €	9,3 Mio. €
	Verlauf energiebezogene Kosten			
wesentliche Einflussfaktoren	<ul style="list-style-type: none"> • CO₂-Kosten • Kapitalkosten 	<ul style="list-style-type: none"> • CO₂-Kosten • Kapitalkosten 	<ul style="list-style-type: none"> • Energiepreise • Kapitalkosten • Betriebskosten 	
Hemmnisse		<ul style="list-style-type: none"> • Wirtschaftlichkeit der Minderungsoptionen 	<ul style="list-style-type: none"> • Vermeidungskosten • Energiekosten • Investitionskosten 	

Tabelle 3: Übersicht Entwicklung energiebezogener Kosten für die betrachteten Pfade **ohne** CO₂-Kosten aus Kalk (Bezugsgröße: deutsche Kalksandsteinindustrie)

	Referenzpfad (Pfad 1)	Pionierpfad (Pfad 2)	Klimaneutralitätspfad (Pfad 3)
Energiebezogene Kosten setzen sich zusammen aus: Betriebskosten, Kapitalkosten, CO ₂ -Kosten, Kosten der Energieträger			
Kosten 2045 ohne CO₂-Kosten aus Kalk:			
	117 Mio. €/a	122 Mio. €/a	192 Mio. €/a
	Mehrkosten zum Referenzpfad:	+5 Mio. €/a	+75 Mio. €/a
Verlauf energiebezogene Kosten ohne CO ₂ -Kosten aus Kalk			

Die nachfolgende Tabelle fasst die Ergebnisse für das definierte virtuelle Durchschnittswerk zusammen.

Tabelle 4: Gegenüberstellung der Ergebnisse der Pfade - virtuelles Durchschnittswerk

	Kosten in Mio. EUR/a					CO ₂ -Emissionen in Tsd. t/a			
	Basis 2021	Mit Kalk 2045	Ohne Kalk 2045	Mittlere Kosten 2021-2045	Investition ges. in Mio. EUR	Basis 2021	2045 ohne Rec.	2045 mit Rec.	Rec. Effekt gesamt in Tsd. t CO ₂
Referenzpfad	1,6	2,5	1,5	2,1	3,1	10,5	9,7	7,5	-116,8
Pionierpfad	1,6	2,5	1,6	2,0	4,5	10,5	5,8	3,7	-107,2
Klimaneutralitätspfad	1,6	2,5	2,5	2,4	7,1	10,5	0	-2,0	-100,1

Zusammenfassende Schlussfolgerungen und Forderungen an die Politik

Aus den Ergebnissen der im Projekt angestellten Untersuchungen lassen sich die nachfolgenden Schlussfolgerungen ableiten.

1. Klimaneutralität für die Kalksandsteinbranche ist erreichbar.
2. Die entsprechende Infrastruktur (Strom, Wasserstoff) muss geschaffen werden.
3. Die Verfügbarkeit klimaneutraler Energieträger muss hergestellt und gewährleistet werden.
4. Wirtschaftliche Anreize sind für eine schnelle Umsetzung unerlässlich. Höhere CO₂-Preise allein fördern die Transformation nicht.
5. Klimaneutralität ist mit relevanten Mehrkosten verbunden. Schutz vor Carbon-Leakage bleibt zentral.
6. Veränderungen in der Kalkproduktion vorausgesetzt, kann die Kalksandsteinindustrie sogar klimapositiv werden.

Abbildung 5: Kernbotschaften auf einen Blick

Die dargestellten Ergebnisse zeigen, dass die Kalksandsteinindustrie bis 2045 klimaneutral werden und bereits bis 2030 mit erheblichen Emissionsreduktionen zu europäischen und nationalen Klimaschutzziele beitragen kann.

Besonders relevante Maßnahmen in den Produktionsprozessen der Kalksandsteinindustrie selbst und damit Beiträge der Branche können konkret benannt werden:

- Effizienzmaßnahmen und zusätzliche Effizienzeffekte aus der Digitalisierung,
- einschließlich einem optimierten Wärmemanagement in den Werken und
- Umstellungen im Fuhrpark.
- Von besonderer Bedeutung für die Emissionsreduktion sind Brennstoffwechsel für die Dampferzeugung und ferner
- die Reduktion des Kalkanteils in den Produkten.

Mit Umsetzung dieser Maßnahmen sind Innovationen in der Branche verbunden – jedoch auch erhebliche Anstrengungen, hohe Investitionen und relevant steigende Kosten.

Es ist für die Industrie deshalb von elementarer Bedeutung, dass die besonders relevanten politischen Rahmenbedingungen möglichst frühzeitig und langfristig gesetzt werden. Nur dann können in den Unternehmen die notwendigen Investitionsentscheidungen so getroffen werden, dass die verfügbaren Mittel möglichst effizient zur Erreichung der Ziele genutzt werden.

Die mittelständisch geprägte Branche der Kalksandsteinindustrie braucht dafür:

- Staatliche Fördermechanismen für Investitionen, um den erheblichen Kostenanstieg zu dämpfen und damit zugleich schneller zu Emissionsreduktionen zu kommen.
- Einen hinreichenden Schutz vor Carbon-Leakage,
 - auch innerhalb der EU, solange die CO₂-Preise für die Branche v. a. Folge nationaler Rahmenbedingungen sind und
 - mit Blick auf den Substitutionswettbewerb mit anderen Baustoffen.
- Bereits jetzt absehbar eine deutliche Dämpfung stark steigender Energiekosten für z. B. Wasserstoff und Strom – hierfür sind mit Blick auf die Ergebnisse dieser Roadmap nicht nur Investitionszuschüsse, sondern ggf. auch OPEX-seitige Förderungen in Betracht zu ziehen, insbesondere wenn sich die Kosten für Strom und Wasserstoff nicht stark reduzieren ließen.
- Der Bedarf an Förderungen wird auch davon beeinflusst, ob sich für klimaneutrale Produkte höhere Preise im Markt erzielen lassen.

Sehr wesentlich ist die Feststellung, dass höhere CO₂-Preise zwar einen spürbaren Kosteneffekt haben, jedoch allein bei weitem nicht ausreichen, um wirtschaftliche Anreize für Investitionen in Maßnahmen zur Reduktion der Emissionen zu schaffen. Die deutlich höheren energiebezogenen Kosten der quantitativ besonders wesentlichen technologischen Alternativen insbesondere in der Dampferzeugung überwiegen die Effekte deutlich.

Wie für andere Branchen auch braucht es für die Kalksandsteinindustrie zudem

- leistungsfähige Infrastrukturen, wie z. B. Netze und die Verfügbarkeit von regenerativ erzeugtem Wasserstoff und Strom zu erschwinglichen Kosten,
- eine Beschleunigung bei Genehmigungen und
- mehr Anstrengungen in der Forschung und Entwicklung.

Für einzelne Maßnahmen, wie etwa

- die Reduktion des Kalkanteils in den Produkten oder
- die Nutzung von Formaten, die weniger Masse benötigen oder im Kreislauf geführte Materialien nutzen,

sollten auch Anpassungen von Produktnormen und Bauvorschriften an geänderte Rahmenbedingungen und die höhere Gewichtung von klimapolitischen Zielen in Betracht gezogen werden.

Unter Berücksichtigung des produktspezifischen Aspekts der Recarbonisierung ist es möglich, dass die Branche klimapositiv wird – also in den Produkten mehr CO₂ eingelagert, als in der gesamten Produktionskette – einschließlich der vorgelagerten Produktion von Kalk – freigesetzt wird.

Hierfür ist dann die Bereitstellung von klimaneutral produziertem Kalk ohne relevante Mehrkosten für die Kalksandsteinindustrie notwendig. Für die Kalkindustrie selbst könnten sogenannte „Carbon Contracts for Difference“ (CCfD), auch als „Klimaschutzverträge“ (KSV) bezeichnet, zur Finanzierung der Transformation beitragen.⁵

⁵ Quelle: Agora Energiewende, FutureCamp, Wuppertal Institut und Ecologic Institut (2021); Paper „Klimaschutzverträge für die Industrietransformation. Analyse zur Stahlbranche“ bereits veröffentlicht, weitere Publikationen zu CCS in der Zement- und Kalkindustrie folgen.

2 Zielsetzung und Rahmen der Roadmap

Mit der vorliegenden Roadmap zeigen wir auf, wie die deutsche Kalksandsteinindustrie das Ziel der Treibhausgasneutralität bis 2045 erreichen kann. Grundlage dafür ist eine detaillierte Betrachtung der aktuellen Emissionen basierend auf den Einsätzen an Energieträgern und an den bedeutendsten Rohstoffen der Industrie. Dies ermöglicht es, die relevanten Prozesse und Handlungsfelder zur Reduktion der CO₂-Emissionen zu identifizieren und entsprechende Handlungsoptionen darzulegen. Im Fokus der Betrachtung stehen vor allem technische Machbarkeit und wirtschaftliche Auswirkungen.

Von besonderer Bedeutung ist die Herausarbeitung von notwendigen Rahmenbedingungen, die für eine erfolgreiche Transformation geschaffen werden müssen und relevanten Hemmnissen, die einer solchen entscheidend im Weg stehen. Das Hauptaugenmerk der Studie liegt auf den möglichen Emissionsminderungen in den Kalksandsteinwerken selbst und damit auf der Art der Wärmebereitstellung für den Härtungsprozess und der effizienten Nutzung dieser Wärme.

Die Perspektive der Roadmap ist betriebswirtschaftlich orientiert. Die tatsächliche Umsetzung von Maßnahmen zur Emissionsminderung ist damit abhängig von deren Wirtschaftlichkeit aus Unternehmenssicht. Unter den heutigen Voraussetzungen sind viele dieser Maßnahmen (noch) nicht wirtschaftlich umsetzbar.

Die Studie beleuchtet die denkbare Emissionsentwicklung der deutschen Kalksandsteinindustrie und damit verbundene Kosten in drei konkret abgegrenzten Pfaden:

- **Pfad 1** schreibt als **Referenzpfad** den heutigen Stand in die Zukunft fort. Entwicklungen, die auf bereits konkret absehbaren Veränderungen der Rahmenbedingungen beruhen, werden berücksichtigt.
- In **Pfad 2** als **Pionierpfad** bezeichnet, steht ein gewisses Investitionsbudget zur Durchführung von gezielten Reduktionsmaßnahmen zur Verfügung. Es wird untersucht, welche Emissionsminderungen damit erreicht werden können.
- In **Pfad 3**, dem Klimaneutralitätspfad, werden alle Maßnahmen ergriffen, die notwendig sind, das Ziel Treibhausgasneutralität zu erreichen. Restriktionen bezüglich der dafür benötigten Investitionsmittel oder der zulässigen Mehrkosten werden nicht gesetzt.

Die vorliegende Roadmap wurde von der Kalksandstein-Dienstleistung GmbH in Auftrag gegeben. Die hier enthaltenen Äußerungen sind jedoch Aussagen der Verfasser. Annahmen zu wettbewerbssensitiven Parametern wie z. B. Energiepreisen beruhen auf öffentlich zugänglichen Quellen.

Vor dem Hintergrund der betriebswirtschaftlichen Perspektive der vorliegenden Roadmap und zur Berücksichtigung der spezifischen Rahmenbedingungen der betrachteten Branche wurde ein Begleitkreis⁶ in die Erarbeitung der Studie eingebunden. Der Begleitkreis besteht aus Vertretern des Bundesverbandes und der dort organisierten Unternehmen. Neben Workshops zur Diskussion methodischer und technischer Fragen wurden auch technologiespezifische Abfragen mit den Teilnehmern durchgeführt. In enger Abstimmung mit dem Verband wurden daraus aggregierte Annahmen zu den betrachteten Handlungsoptionen abgeleitet, die den Verlauf der Pfade maßgeblich bestimmen.

Die folgende Darstellung ist vor diesem Hintergrund sehr stark verdichtet.

⁶ R. Meissner (Bundesverband Kalksandsteinindustrie e.V.), Dr. W. Eden (Bundesverband Kalksandsteinindustrie e.V.), Dr. C. Aberle (Xella Deutschland GmbH), C. de Boer (Emsländer Baustoffwerke GmbH & Co. KG), S. Dylus (Schlamann Kalksandsteinwerk GmbH), Dr. T. Jung (H+H Kalksandstein GmbH), Dr. H. Müller (Cirkel GmbH & Co. KG), H. Otto (Kalksandsteinwerk Bösel GmbH & Co. KG), J. Radmacher (Kalksandsteinwerk Wendeburg Radmacher GmbH & Co. KG), Dr. S. Volkmann (Unika GmbH), M. Wilhelm (Baustoffwerke Münster-Osnabrück GmbH & Co. KG), S. Wolfram (Zapfwerke GmbH & Co. KG)

3 Branchenbeschreibung: Die deutsche Kalksandsteinindustrie

Die Erfolgsgeschichte des Kalksandsteins begann bereits vor über 125 Jahren. Damals begann die industrielle Kalksandsteinfertigung in Deutschland und das Produkt fand schnell Verbreitung. Heute ist der Einsatz von Kalksandsteinen in Deutschland führend im mehrgeschossigen Wohnungsbau und trägt damit wesentlich dazu bei, qualitativ hochwertigen, aber bezahlbaren Wohnraum zu schaffen. Die überwiegend mittelständisch geprägte Industrie sichert durch ihre dezentrale Struktur attraktive Arbeitsplätze auch in ländlichen Regionen der Republik. Zum Zeitpunkt der Studie sind 76 Kalksandsteinwerke in Deutschland in Betrieb.

Bei Kalksandsteinen handelt es sich um Mauersteine, die aus Branntkalk, Sand und Wasser hergestellt werden. Die Rohstoffe werden vermischt, in Form gebracht und unter Dampfdruck gehärtet.



Abbildung 6: Formate von Kalksandstein; Bildquelle: © Bundesverband Kalksandsteinindustrie e.V.

In den Werken entstehen Treibhausgase vorwiegend durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe zur Dampferzeugung. Diese Emissionen stehen im Fokus der Studie. Hier wurden in der Vergangenheit bereits erhebliche Emissionsminderungen erreicht, indem der Einsatz von Kohle eingestellt wurde. Ein relevanter Anteil der Gesamtemissionen entfällt allerdings auch auf die Vorkette des Produkts. Die Emissionslast des verwendeten Branntkalks ist insgesamt für die Branche von hoher Bedeutung. Da ein großer Teil der dort entstehenden Emissionen prozessbedingt ist, reicht in diesem Bereich ein Wechsel auf regenerative Energieträger in der Erzeugung allein nicht aus.

Diskurs 1: Recarbonatisierung von Kalksandsteinen

Kalksandsteine werden aus den Rohstoffen Kalk, natürlichen mineralischen Gesteinskörnungen und Wasser hergestellt. Als Gesteinskörnungen werden meistens Quarzsande oder auch gebrochenes Natursteinmaterial eingesetzt. Die Rohstoffe werden im erdfeuchten Zustand mechanisch verdichtet und anschließend in Autoklaven unter gespanntem Wasserdampf gehärtet. Im Wesentlichen finden während dieser Hydrothermalhärtung im Porenraum der Kalksandstein-Rohlinge Reaktionen zwischen dem Kalkhydrat und der gelösten Kieselsäure statt. Dabei bilden sich Calciumsilikathydrate (CSH-Phasen), die dem Gefüge der Kalksandsteine ihre Festigkeit verleihen. Die Dauer der Dampfhärtung beträgt in der Regel $t_h = 6$ bis 12 Stunden und findet bei Temperaturen um $T_h = 200$ °C und einem zugehörigen Wasserdampfdruck von bis zu $p_e = 16$ bar statt. Bei der Dampferzeugung wird heute in fast allen Fällen Erdgas eingesetzt, bei dessen Verbrennung CO_2 emittiert wird.

Kalksandsteine nehmen im Laufe der Zeit einen beträchtlichen Teil des bei deren Herstellung emittierten CO_2 wieder auf. Deshalb wurde die Recarbonatisierung von Kalksandsteinen für die Kalksandstein-Roadmap quantifiziert und in die Pfade eingerechnet. Bei der Recarbonatisierung handelt es sich um eine natürlich vorkommende chemische Reaktion, deren Ablauf und Größenordnung seit langem bekannt sind. Das in der Umgebungsluft vorhandene CO_2 dringt dabei langsam in das Porensystem der Kalksandsteine ein und reagiert mit den bei der Autoklavierung entstandenen kristallinen CSH-Phasen zu Calciumcarbonat ($CaCO_3$). Aus Sicht der CO_2 -Bilanz ist die Recarbonatisierung von Kalksandsteinen positiv zu bewerten, denn dadurch werden die CO_2 -Emissionen der Kalksandsteinherstellung zum Teil kompensiert. Dieser Vorgang wurde mit zwei eigens für die Kalksandstein-Roadmap durchgeführten Untersuchungsreihen experimentell und rechnerisch bestätigt. Die Ergebnisse werden nachfolgend erläutert:

Die erste Untersuchung an mit üblichen Herstellparametern erzeugtem Kalksandsteinmaterial hat im Rahmen eines Schnellcarbonatisierungsversuchs gezeigt, dass die in den Kalksandsteinen vorliegenden CSH-Phasen zu rd. 90 % carbonatisiert wurden. Rechnet man die an diesen Kalksandsteinen gewonnenen Erkenntnisse auf Kalksandsteinmassen hoch, dann lässt sich ableiten, dass Kalksandsteine rd. 50 kg CO_2 pro Tonne aufnehmen können. Dabei wird das aufgenommene CO_2 fest in die Kristallstruktur des entstehenden Calciumcarbonats eingebaut, so dass von einem dauerhaften CO_2 -Speicherpotenzial ausgegangen werden kann⁷.

Mit einer weiter gehenden Untersuchung wurden bundesweit über 20 Steinproben aus bestehendem Kalksandsteinmauerwerk entnommen und hinsichtlich deren Carbonatisierungszustand untersucht. Die ältesten Kalksandsteine stammen aus dem Jahr 1903 und die jüngsten Proben sind neueren Datums, so dass praktisch der Zeitraum vom Beginn der industriellen Kalksandsteinproduktion (1894) bis heute abgedeckt werden konnte. Zu den Proben und dem betreffenden Mauerwerk wurden alle vorliegenden Informationen erfasst, beispielsweise das Baujahr des Gebäudes, die Art der Wand und deren Beschichtung, die Putzdicke, etc. Aus den Untersuchungsergebnissen wurde anschließend der Grad der natürlichen Recarbonatisierung rechnerisch abgeschätzt. Die Untersuchungsergebnisse untermauern den oben genannten Nachweis, dass Kalksandsteinmaterial bereits nach etwa 50 Jahren CO_2 in der oben genannten Größenordnung aus der Umgebungsluft aufnimmt und fest in sein kristallines Gefüge einbaut⁸.

Die natürliche Recarbonatisierung geschieht hauptsächlich während der Nutzungsphase der Gebäude in Abhängigkeit von den jeweiligen Expositionsbedingungen. Beschichtungen und Anstriche sowie Putze und Anschlüsse an andere angrenzenden Bauteile können die Carbonatisierung verlangsamen. Nach der Nutzungsphase hängt die CO_2 -Aufnahme von Kalksandsteinen von den bei der Verwertung oder Entsorgung vorliegenden Randbedingungen ab. Durch die mechanische Zerkleinerung von abgebrochenem Kalksandsteinmauerwerk in Brecheranlagen zu einem Recyclinggranulat wird die dem Luft- CO_2 zugängliche Oberfläche sehr stark vergrößert, so dass die Recarbonatisierung entsprechend beschleunigt wird.

– Bundesverband Kalksandsteinindustrie e.V.

⁷ MIDDENDORF, B.: Quantitative Bestimmung und Berechnung der CO_2 -Aufnahme von werkfrischen Kalksandsteinen, Bericht Nr. 25/2021, Universität Kassel, 2021

⁸ CLG Chemisches Labor Dr. Graser KG: Bericht Nr. 21/08/2129259 vom 20.08.2021

Diskurs 2: Recycling von Kalksandsteinen

Der „Green Deal“ der Europäischen Kommission enthält neben den Forderungen zur Klimaneutralität die Aussage, dass nachhaltige Produktpolitik auch das Potenzial birgt, die Abfallmenge erheblich zu verringern. So ist zu erwarten, dass die Kommission auch rechtliche Anforderungen zur Kreislaufwirtschaft formulieren wird, um den Markt für Sekundärrohstoffe mithilfe eines vorgeschriebenen Recyclinganteils (z. B. für Verpackungen, Fahrzeuge, Baustoffe und Batterien) zu fördern⁹. Die EU-Kommission hat mit dem „Green Deal“ einen umfassenden Plan für den Umbau der europäischen Energie- und Klimapolitik beschlossen. Der zugehörige Circular Economy Action Plan wurde im März 2020 veröffentlicht. Er zielt darauf ab, Nachhaltigkeitsgrundsätze durch Legislativvorgaben zu verankern, Ziele sind u. a. die Erhöhung des Rezyklatanteils in Produkten. Darauf ist die deutsche Kalksandsteinindustrie vorbereitet.

Im Jahr 2020 wurden rd. 2,1 Mrd. Kalksandsteine im Zählformat NF (l x b x h = 240 x 115 x 71 mm) hergestellt. Dies entspricht einer Masse von rd. 8 Mio. t¹⁰. Kalksandsteinmaterial ist praktisch vollständig für verschiedene Anwendungsbereiche recyclingfähig, was durch eine Reihe von aufeinander aufbauenden Forschungsprojekten nachgewiesen und bereits teilweise in Normen aufgenommen wurde¹¹. Die Forschungsvereinigung Kalk-Sand e.V. hat in den vergangenen Jahren im Rahmen ihrer Gemeinschaftsforschung insgesamt elf von der *Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V. (BMWi)* und vom *Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR) - ZukunftBau* geförderte Projekte zum Recycling von Kalksandstein und Kalksandsteinmauerwerk erfolgreich durchgeführt. Dabei wurden im Einzelnen folgende Recyclingpfade für KS-Abbruch-Material und Produktionsabfälle untersucht und nachgewiesen¹²:

1. Verwendung von sortenreinem KS-Recyclingmaterial für die erneute Kalksandsteinproduktion
 - a. als grobe Gesteinskörnung, z. B. als Fraktion 2/5 mm als Ersatz für Natursteinsplitt oder
 - b. als fein aufgemahlener Füller mit CO₂-Reduktionspotenzial
2. Einsatz für Tragschichten ohne Bindemittel im Straßen- und Wegebau
3. Verwendung als Gesteinskörnung im Betonbau (bereits genormt)
4. Einsatz als Ökogranulat im Deponiebau, unter Einsatz von Methan abbauenden Mikroorganismen zur Umwandlung von CH₄ in CO₂
5. Verwendung in Vegetationssubstraten für Bäume, Sträucher und Dachbegrünungen
6. Anwendung zur vegetationstechnischen Verbesserung von Böden, z. B. zur Erhöhung der Wasserdurchlässigkeit

⁹ EUROPÄISCHE KOMMISSION: Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Europäischen Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen - Ein neuer Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft - Für ein saubereres und wettbewerbsfähigeres Europa - Brüssel, den 11.03.2020, COM(2020)

¹⁰ BUNDESVERBAND KALKSANDSTEININDUSTRIE E.V.: Kalksandstein Geschäftsberichte 2020/21

¹¹ Für Literaturquellen zu Fußnote 11 siehe bitte 12.1 Quellenverzeichnis ab Seite 107 Literatur zu Diskurs 2 die Quellen [3] bis [12]

¹² Für Literaturquellen zu Fußnote 12 siehe bitte 12.1 Quellenverzeichnis ab Seite 107 Literatur zu Diskurs 2 die Quellen [13] bis [23]

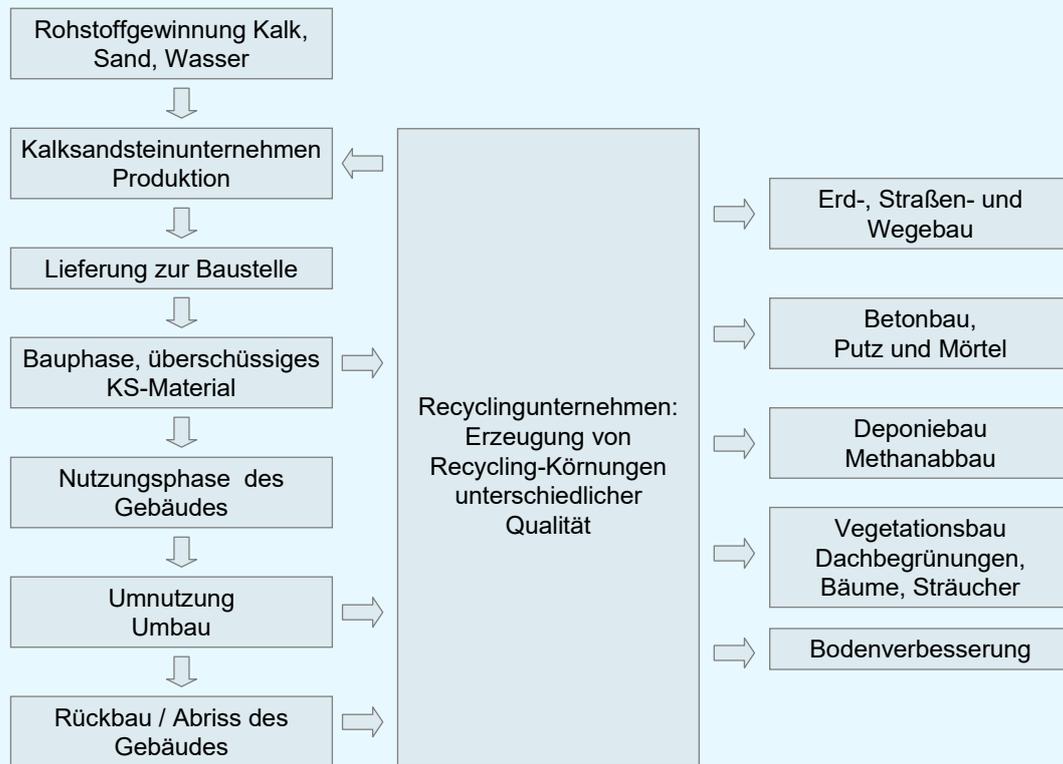


Abbildung 7: Kreislaufführung von Kalksandstein-Material

Mit den nachgewiesenen Verwertungswegen konnte dargelegt werden, dass Kalksandstein-Recycling-Materialien, die als Ausschussware bei der Produktion von Kalksandsteinen (z. B. als Verschnitt) anfallen oder aus dem Rückbau bzw. Abriss von Kalksandsteinmauerwerk stammen, für hochwertige Verwertungswege zur Verfügung stehen. Abbildung 7 zeigt die möglichen Stoffströme für Kalksandsteinmaterial.

– Bundesverband Kalksandsteinindustrie e.V.

4 Methodik und Vorgehensweise

Der Schwerpunkt der Studie liegt auf den Werken der deutschen Kalksandsteinindustrie und den dortigen Herstellungsprozessen. Aufgrund der enormen Bedeutung wird die Vorkette des eingesetzten Branntkalks jedoch mitbetrachtet. Im Rahmen der Roadmap werden drei unterschiedliche Pfade betrachtet, die es erlauben, wesentliche Handlungsfelder zur Erreichung der Treibhausgasneutralität herauszuarbeiten. Dabei werden erforderliche Rahmenbedingungen und akute Hemmnisse identifiziert, sowie die wirtschaftlichen Konsequenzen der unterschiedlichen Handlungsoptionen beleuchtet und miteinander verglichen.

Für externe Einflussfaktoren z. B. Entwicklung von Energie und CO₂-Preisen wurden Annahmen getroffen und keine eigenen Untersuchungen durchgeführt.

4.1 Herangehensweise und Scope der Roadmap

Betrachtet werden die Emissionen der gesamten deutschen Kalksandsteinindustrie mit ihren 76 Werken. Die Emissionen der Werke werden aus den dort eingesetzten Energieträgermengen bestimmt. Darüber hinaus werden auch die Emissionen der eingesetzten Energieträger zum Sandabbau mitberücksichtigt. Dieser ist teilweise direkt an die Werke angegliedert, teilweise wird der Sand extern abgebaut. Emissionen aus dem Transport von Sand, Branntkalk und dem fertigen Produkt Kalksandstein fließen ebenfalls in die Studie ein. Darüber hinaus werden auch die Emissionen aus der Herstellung des Branntkalks betrachtet. Die entstehenden Emissionen können nach den folgenden Scopes unterteilt werden:

- **Scope 1-Emissionen** entstehen durch das Verbrennen fossiler Energieträger in den Werken. Hierzu zählen u. a. das Verbrennen von Erdgas und Heizöl zur Erzeugung von Dampf, Flüssiggaseinsatz bei Verpackungsanlagen sowie der Dieseleinsatz von Staplern. Einige Werke betreiben auch den Sandabbau intern. Die entstehenden Emissionen der Maschinen im Sandabbau sind ebenfalls in Scope 1 berücksichtigt. (Eigener Sand: 1.590.917,6 t; 26 %)
- Der überwiegende Teil des Sandabbaus ist jedoch an **externe Betreiber** ausgelagert (Fremder Sand: 4.470.412,6 t; 74 %) und fällt damit nicht in den betrachteten Scope 1. Der Vollständigkeit halber werden diese Emissionen in Scope 3 berücksichtigt.
- Die **Scope 2-Emissionen** umfassen ausschließlich die Emissionen aus dem Fremdstrombezug der Werke.
- **Scope 3-Emissionen:** Es werden die Anlieferung der Rohstoffe Kalk und Sand sowie der Transport der Kalksandsteine berücksichtigt. Der weitaus größte Anteil der Scope 3-Emissionen entsteht jedoch im Produktionsprozess des zugekauften Branntkalks. Diese Emissionen setzen sich zu ca. einem Drittel¹³ aus energiebedingten Emissionen und zwei Dritteln aus dem Kalkstein stammender CO₂-Emissionen (sogenannter Prozessemissionen) zusammen.

Alle relevanten Parameter sind tabellarisch im Anhang zusammengefasst.

¹³ BVK (2020)

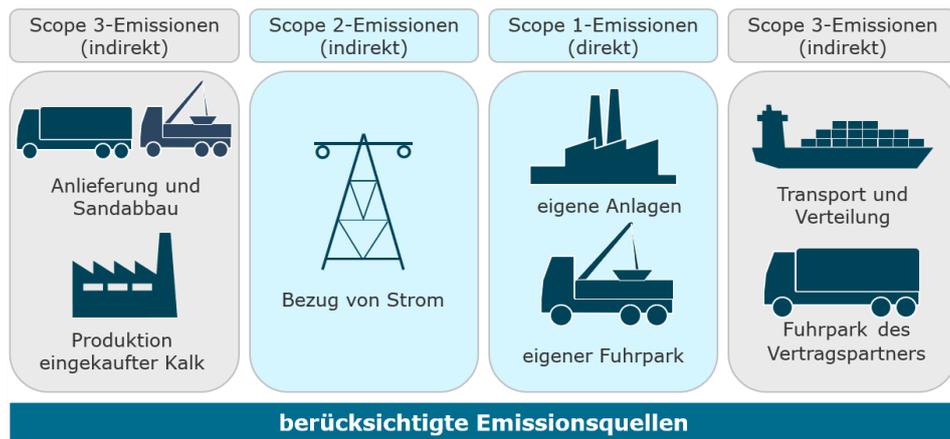


Abbildung 8: Für die Roadmap berücksichtigte Emissionsquellen; Quelle: FutureCamp

4.2 Definition und Skizzierung der drei Pfade

Die Studie gliedert sich im weiteren Verlauf der Betrachtung in drei Pfade, die unterschiedliche Szenarien beschreiben.

Pfad 1 dient als **Referenzpfad**, um einen Vergleichswert für die weiteren Pfade zu definieren. In diesem Pfad kommen keine neuen Technologien und Produktionsprozesse zum Einsatz, sondern es wird von „business as usual“ ausgegangen. Effizienzsteigerungen und notwendiger Anlagentausch (bezüglich der Dampferzeuger) wird abgebildet. Zudem werden bereits heute bekannte externe Rahmenbedingungen zum z. B. der Bezug von klimaneutralem Strom des deutschen Strommixes bis 2045 zugrunde gelegt. Der Referenzpfad schreibt somit den Status quo in der Branche in die Zukunft fort und liefert im Vergleich mit den weiteren Pfaden damit entscheidende Erkenntnisse zu den entstehenden zusätzlichen Belastungen auf dem Weg zur Klimaneutralität für die Branche.

In **Pfad 2** werden größere eigene Anstrengungen unternommen, um dem Ziel der Treibhausgasneutralität näher zu kommen. Allerdings werden noch nicht alle dafür notwendigen Maßnahmen aufgrund bestehender Restriktionen flächendeckend umgesetzt. In einigen Werken werden bereits innovative Änderungen vorgenommen und daher trägt der Pfad den Namen **Pionierpfad**. Dieser unterscheidet sich wie auch Pfad 3 stark vom Referenzpfad. Im Pionierpfad wird neben der allgemeinen Effizienzsteigerung die zunehmende Digitalisierung des Produktionsprozesses modelliert. Ziel des Pionierpfades ist, mit realistischem Mehraufwand den Weg zur Klimaneutralität einzuschlagen, jedoch werden in diesem Pfad noch an der Realität orientierte Limitationen definiert. Daher wird hier das zusätzlich zur Verfügung stehende Investitionsbudget für die Umsetzung von Maßnahmen zum Klimaschutz begrenzt. Neben den Emissionen in den Werken wird in diesem Pfad auch in den Scope 3-Emissionen bereits von einer Verringerung ausgegangen. Dafür wird von einer Teilelektrifizierung des LKW-Verkehrs und einer Minderung der Vorkettenemissionen des Kalks ausgegangen.

In **Pfad 3**, dem **Klimaneutralitätspfad**, wird dagegen auf sämtliche wirtschaftlichen Restriktionen verzichtet. In diesem Pfad wird ermittelt, welche Investitionen nötig sind, um sämtliche notwendigen Maßnahmen zur Klimaneutralität bis 2045 umzusetzen. Dabei wird keine Rücksicht auf die wirtschaftlichen Auswirkungen dieser Entscheidungen genommen, die Reduktion der Emissionen auf Null bis 2045 wird durch Umsetzung von Maßnahmen bis zur Zielerreichung erzwungen. Die dabei entstehenden Kosten werden bestimmt und interpretiert. In diesem Pfad wird der gesamte Produktionsprozess der deutschen Kalksandsteinindustrie auf neue Technologien umgestellt. Auch die Scope 3-Emissionen werden mit Hilfe der Umstellung von Transport und nun auch insbesondere durch Maßnahmen in der Vorkette Kalkproduktion vollständig reduziert.

4.3 Datenbasis

Die Scope 1- und Scope 2-Emissionen der deutschen Kalksandsteinindustrie sind ausschließlich auf die dort genutzten Energieträger zurückzuführen. Daher können sie auf Grundlage der eingesetzten Energieträger über die relevanten Emissionsfaktoren bestimmt werden. Als Basisjahr der Berechnung wird das repräsentative Jahr 2019 gewählt, da hierfür zum einen eine gute Datenlage vorliegt und zum anderen Sondereffekte durch die 2020 beginnende Corona-Pandemie nicht zum Tragen kommen. Die eingesetzten Energieträgermengen gehen auf eine Datenerhebung des Bundesverband Kalksandsteinindustrie e.V. über alle 76 Werke zurück. Relevante Energieträger sind Erdgas, Heizöl EL, Diesel, Flüssiggas und Strom. Die Energieeinsätze für den externen Sandabbau konnten über die Daten zum internen Sandabbau abgeschätzt werden.

Der Rohstoffeinsatz an Sand und Kalk in den Werken ist zurückzuführen auf eine Datenerhebung zur Umwelt-Produktdeklaration (Environmental Product Declaration – EPD). Hieraus ergeben sich auch die Transportentfernungen zu den Werken. Die Transportstrecken für das Produkt lassen sich ebenfalls darauf zurückführen. Über die Transportmengen und -strecken, sowie die durchschnittliche Nutzlast der eingesetzten LKWs wurden die Energieeinsätze und Emissionen für den Transport bestimmt. Die Emissionen aus der Vorkette des eingesetzten Kalks ergeben sich über Einsatzmenge und zugehörigen Emissionsfaktor.

Die Produktionsmenge wurde dem Geschäftsbericht BVKSI 2019/20 entnommen und über eine durchschnittliche Dichte in Tonnen umgerechnet.

4.4 Grundlegende Annahmen und Berechnungsparameter

In jedem der drei Pfade wird der Verlauf der Energieträgereinsätze, Emissionen und damit einhergehender Kosten bis 2045 modelliert. Dafür sind einige grundlegende Annahmen zu treffen, die für alle drei Pfade gleichermaßen gelten. Das ist entscheidend, um die Vergleichbarkeit der Pfade gewährleisten zu können. Bei Annahmen, die zwischen den Pfaden variieren wird explizit darauf hingewiesen.

4.4.1 Annahmen zur deutschen Kalksandsteinindustrie

Produktionsentwicklung

Die Produktionsleistung der deutschen Kalksandsteinindustrie wird bis 2045 konstant auf dem Basisniveau gehalten. Dieses bezieht sich auf die Datenbasis von 2019. Die Annahme ermöglicht aussagekräftige Vergleiche mit dem heutigen Status und sorgt dafür, dass die Entwicklungen in der Produktion ohne verzerrende Effekte dargestellt werden können. Damit wird keinerlei Produktionswachstum oder -rückgang etwa durch Substitutionseffekte aus der Wettbewerbssituation mit anderen Baustoffen berücksichtigt.

Rohstoffeinsatz

Die Einsatzmenge an Kalk wird zwischen den drei Pfaden variiert. Grundlage für diese Studie ist ein Referenzstein, für den pro Tonne Kalksandstein 70 kg Kalk eingesetzt werden. Im Referenzpfad wird dieser Wert konstant gehalten. In den beiden anderen Pfaden wird der Kalkgehalt in unterschiedlichem Ausmaß reduziert. Bereits in der Vergangenheit hat eine Reduktion des Kalkgehalts stattgefunden. Es wird davon ausgegangen, dass eine weitere Reduktion in gewissem Umfang möglich ist, ohne die Funktionalität der Steine zu beeinträchtigen. Hierfür ist jedoch ein gewisser Aufwand an F&E notwendig, der im Rahmen der Studie allerdings nicht tiefer betrachtet wird. Allerdings wird berücksichtigt, dass die Reduktion erst ab einem späteren Zeitpunkt, in diesem Fall 2026, beginnen kann. Ab diesem Zeitpunkt wird sie als linear angenommen. Nicht berücksichtigt wird die darüber hinaus gehende Substitution des Kalks durch andere Bindemittel, die theoretisch denkbar, aber praktisch noch ohne entsprechende Bedeutung ist. Sollten sich jedoch die Vorkettenemissionen im Bereich Kalk nicht entsprechend den Annahmen für die Pfade 2 und 3 verringern, so wird dieses Thema für die Industrie sicherlich an Bedeutung gewinnen.



Abbildung 9: Rohstoffe – Kalk, Sand, Wasser; Bildquelle: © Bundesverband Kalksandsteinindustrie e.V.

In nachfolgender Tabelle sind die hinterlegten Annahmen dargestellt. Im Referenzpfad bleibt der Kalkgehalt unverändert.

Tabelle 5: Kalkeinsatzmengen für Pfad 1 bis Pfad 3

	Referenzpfad (Pfad 1)	Pionierpfad (Pfad 2)	Klimaneutralitätspfad (Pfad 3)
Einsatzmenge Kalk 2021	0,07 t _{kalk} /t _{KS}	0,07 t _{kalk} /t _{KS}	0,07 t _{kalk} /t _{KS}
Einsatzmenge Kalk 2045	0,07 t _{kalk} /t _{KS}	0,06 t _{kalk} /t _{KS}	0,05 t _{kalk} /t _{KS}

Recarbonatisierung

Im Laufe seiner Nutzungszeit nimmt ein Kalksandstein CO₂ auf und bindet es langfristig. Auch nach der Nutzung bleibt dieses CO₂ im Material gebunden und wird nicht wieder freigesetzt. Diese gebundenen Emissionen gilt es gerade im Vergleich zu anderen Baustoffen zu berücksichtigen. Die Menge an CO₂, die ein Kalksandstein aufnehmen kann, hängt vom Kalkgehalt des Steins ab. Wird der Kalkgehalt reduziert, verringern sich auch die Effekte aus der Recarbonatisierung. Parallel zu dieser Roadmap wurden Studien anhand des Referenzsteins und historischer Kalksandsteine durchgeführt, um Umfang und zeitlichen Verlauf der Aufnahme von CO₂ in die Steine zu ermitteln¹⁴.

¹⁴ Für Literaturquellen zu Fußnote 14 siehe bitte 12.1 Quellenverzeichnis ab Seite 106 Literatur zu Diskurs 1 und Diskurs 2

In Tabelle 6 werden die Grundlagen zur Berechnung der gespeicherten CO₂-Mengen für die drei Pfade aufgeführt.

Tabelle 6: Annahmen zur Recarbonatisierung (Bezugsgröße: deutsche Kalksandsteinindustrie)

	Referenzpfad (Pfad 1)	Pionierpfad (Pfad 2)	Klimaneutralitätspfad (Pfad 3)
Recarbonatisierung des Referenzsteins mit 7 % Kalkanteil	50 kg CO ₂ /t _{KS}	50 kg CO ₂ /t _{KS}	50 kg CO ₂ /t _{KS}
Zeitraum in dem Steine CO ₂ aufnehmen	50 Jahre	50 Jahre	50 Jahre
Aufgenommene Menge CO ₂ pro Jahr (Startwert)	0,001 t CO ₂ /t _{KS} /a	0,001 t CO ₂ /t _{KS} /a	0,001 t CO ₂ /t _{KS} /a
Aufgenommene Menge CO ₂ pro Jahr (2045 Wert)	0,001 t CO ₂ /t _{KS} /a	0,00086 t CO ₂ /t _{KS} /a	0,00071 t CO ₂ /t _{KS} /a
Jährliche Produktionsmenge KS	7,1 Mio. t	7,1 Mio. t	7,1 Mio. t

Virtuelles Durchschnittswerk

Die Kalksandsteinindustrie besteht aus einer heterogenen Mischung aus kleineren und größeren Werken mit unterschiedlichen Voraussetzungen. Um im Rahmen der Studie die Entwicklungen in den Werken mit vertretbarem Aufwand modellieren zu können, wurde ein durchschnittliches Kalksandsteinwerk definiert. Das Werk basiert auf den bereits vorgestellten Einsatzmengen und den qualifizierten Einschätzungen der Mitglieder des Begleitkreises.

Das Durchschnittswerk wird mit folgenden Eckdaten modelliert:

- durchschnittliche Produktionsmenge pro Kalksandsteinwerk: 93.450 t
- ein Dampferzeuger: 10 MW thermische Leistung (Basis DLR-Angaben)¹⁵, befeuert mit Erdgas und unterstützend Heizöl
- Werk wird im 2-Schichtbetrieb mit 2 Pressen gefahren.
- Wärmespeicher (Härtekessel als Warmwasserspeicher oder Druckspeicher/Stahlkessel) 30-50 m³
- eine Verpackungsanlage mit einem Verbrauch von rund 0,3 GWh/a (Folienschumpfanlage mit Flüssiggas und Erdgas)
- einem Bestand an dieselbetriebenen Flurförderzeugen die folgendermaßen unterteilt werden können:
 - ein 8-10 Tonner
 - zwei 5 Tonner
 - ein 2,5 Tonner
- 8 Autoklaven
- Maschinen im Sandabbau werden zur Vereinfachung nicht explizit ausgewiesen.

Für die Durchschnittswerke werden Maßnahmen aus betriebswirtschaftlicher Sicht modelliert. Daraus sind Orientierungen, aber keine direkten Schlussfolgerungen für einzelne, reale Anlagen einzelner Unternehmen abzuleiten, da in der Praxis anlagen-spezifische Umstände bei konkreten Entscheidungen zu berücksichtigen sind.

¹⁵ Eden & Steinmann (2010)

Effizienzsteigerung und Investitionen mit Wirkung auf die Energieeffizienz

Die Kalksandsteinindustrie konnte in der Vergangenheit bereits erhebliche Effizienzgewinne in ihren Werken heben. Auch in den nächsten Jahren werden noch deutliche Energieeinsparungen möglich sein. Diese hängen in der Realität stark von den Gegebenheiten der einzelnen Werke ab, unter denen es in Hinblick auf Energieeffizienz erhebliche Unterschiede gibt. Daher sind bei der Einzelbetrachtung eines realen Werks durchaus andere Effizienzgewinne möglich oder wahrscheinlich. Im Rahmen der Studie wird allerdings, basierend auf den Annahmen zum Durchschnittswerk von einer durchschnittlichen Effizienzsteigerung ausgegangen, die somit für alle Werke gleich groß ist. Für alle drei Pfade wird von der gleichen Steigerung der Effizienz ausgegangen, da es sich hierbei um die Fortführung bestehender Aktivitäten handelt, die damit auch unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten attraktiv für die Unternehmen sind. Effizienzgewinne lassen sich u. a. durch den Einsatz von modernen Querschnittstechnologien¹⁶ und die Optimierung bestehender Verfahren erzielen. Daneben sind vor allem auch organisatorische Aspekte maßgeblich. Etwa haben die Art des Schichtbetriebs und die Mitarbeiterqualifikation erheblichen Einfluss auf die Energieverbräuche.

Bei den Energie-Effizienzgewinnen der Bestandsanlagen geht die Studie von einem Startwert von 1 %/a aus, der bis 2040 asymptotisch auf null absinkt (dies entspricht insgesamt in etwa einer Effizienzsteigerung von rund 7 % bis 2040). Diese wird auf die Brennstoff- und die Stromeinsätze angewendet. Abbildung 10 veranschaulicht den Effekt.

Um diese Effizienzsteigerungen zu erreichen sind Investitionen nötig. Es wurden dazu Investitionen von jährlich 125 Tsd. EUR/Werk (9,5 Mio. EUR für die Kalksandsteinindustrie) angenommen. Diese Investitionen dienen nicht allein den Effizienzsteigerungen. Berücksichtigt sind insbesondere auch der Ersatz von Anlagen und damit der Aufrechterhaltung des Betriebs. Auch bei reinen Ersatzinvestitionen sind die neuen Geräte oft effizienter als die Geräte im Bestand (Beispiel Elektromotoren). Die Effizienzsteigerung ist jedoch begrenzt. Die Möglichkeiten der Optimierung durch Querschnittstechnologien und organisatorische Verbesserungen sind nach absehbarer Zeit erschöpft. Allerdings wird davon ausgegangen, dass auch in den Folgejahren noch Ersatzinvestitionen in der gleichen Größenordnung nötig werden, um den Betrieb auf dem bekannten Niveau aufrecht zu erhalten, auch wenn dann keine Effizienzgewinne mehr damit erzielt werden. Die neu verbauten Anlagenteile schaffen mit ihrer Sensorik auch bereits die Grundlage für die weitere Digitalisierung der Werke.

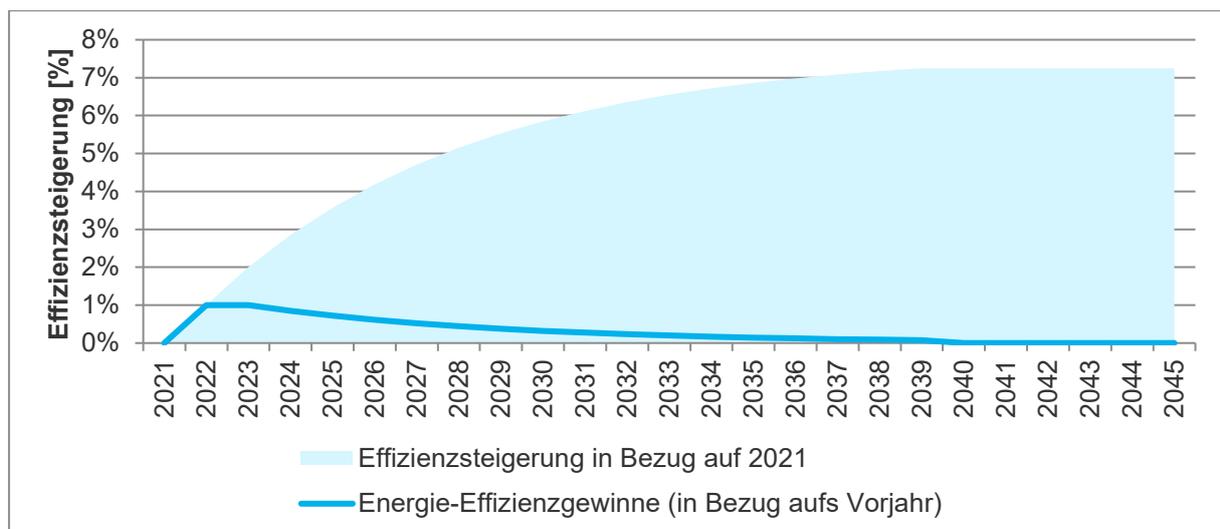


Abbildung 10: Allgemeine Effizienzgewinne Brennstoff- und Stromeinsatz

¹⁶ Beispielhafte Maßnahmen: Energieeffiziente Motoren (z. B. IE3, IE4), Beleuchtung: Umrüstung auf LED, Erneuerung Dampfventile, Erneuerung Wärmerückgewinnung, Economizer zur Nutzung der Wärmeenergie aus dem Abgas, Frequenzumrichter und Sanftanlaufsteuerungen, Modernisierung bzw. Neuanschaffung der Hydraulikpressen, Erneuerung Pressensteuerung, etc.

Neben den oben dargestellten Effizienzsteigerungen ist zudem der Anlagenersatz des Dampferzeugers von Bedeutung. Es wird davon ausgegangen, dass der Dampferzeuger jedes Werks im Betrachtungszeitraum einmal ausgetauscht werden muss, um den Fortbetrieb der Anlage zu gewährleisten. Hierbei wird davon ausgegangen, dass auch neue erdgasbefeuerte Dampferzeuger rund 3,5 % effizienter ggü. dem Vorgänger sind. Diese Effizienzgewinne werden im Modell gesondert berücksichtigt, genau wie die Auswirkungen von alternativen Methoden der Dampferzeugung in den Pfaden 2 und 3.

Für die Pfade 2 und 3 wird neben den genannten allgemeinen Effizienzgewinnen zudem von einer Effizienzsteigerung durch zunehmende Digitalisierung der Verfahrensprozesse ausgegangen. Hinsichtlich weiterer Energie-Effizienzgewinne durch Digitalisierung werden erst in 3-5 Jahren Auswirkungen spürbar sein. Wir gehen daher ab 2025 bis 2040 von einem zusätzlichen Effizienzeffekt i. H. v. 0,75 % p. a. asymptotisch auf 0 sinkend aus.

Auch die zunehmende Digitalisierung der Werke ist mit weiteren Investitionen verbunden. Dafür werden jährlich rund 75 Tsd. EUR/Werk veranschlagt. Somit ergibt sich ab 2025 ein jährliches Investitionsbudget für Effizienzgewinne inkl. Digitalisierung von 200 Tsd. EUR/Werk (15,2 Mio. EUR/a für die Kalksandsteinindustrie) für Pfad 2 und auch Pfad 3.

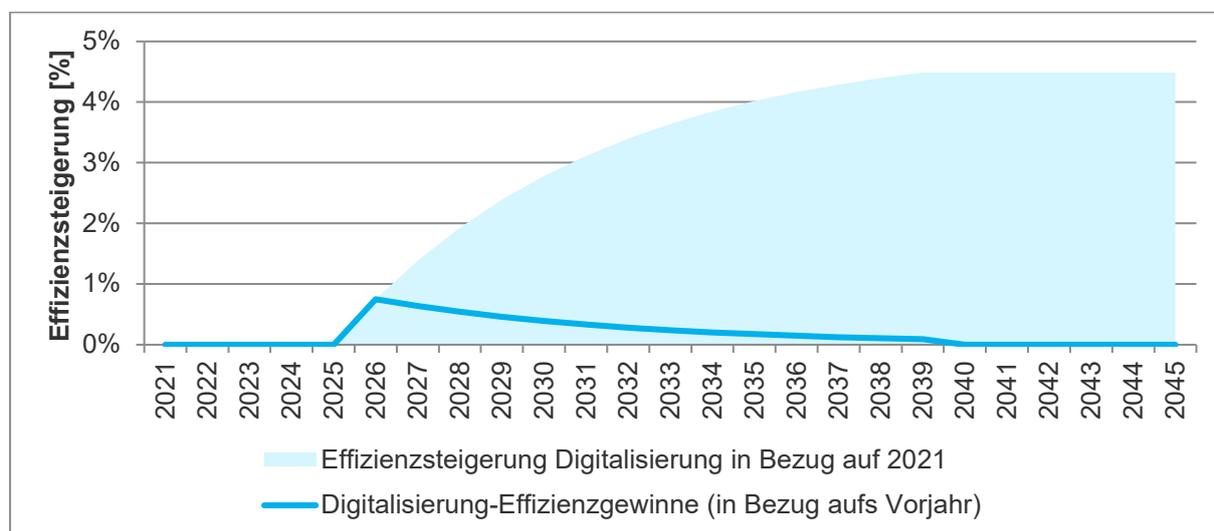


Abbildung 11: Effizienzsteigerung Brennstoff- und Stromeinsatz durch Digitalisierung und Prozessmanagement

4.4.2 Annahmen zu Emissionsfaktoren

Die Emissionsfaktoren der Energieträger beruhen auf den direkten Emissionen verursacht durch die Verbrennung der Brennstoffe. Der Emissionsfaktor Strom ergibt sich auf Basis der spezifischen Emissionsfaktoren für die Stromerzeugung in Deutschland. Emissionen aus der Vorkette zur Bereitstellung der Energieträger bleiben unberücksichtigt.

Erdgas

Aufgrund der Erneuerbaren Energien Richtlinie – RED II wird in der Studie angenommen, dass der Emissionsfaktor Erdgas durch die Beimischung von Biogas oder anderem klimaneutralem Gas im Verlauf absinkt. Er sinkt im zeitlichen Verlauf der Roadmap von 0,056 t CO₂/GJ auf etwa 0,049 t CO₂/GJ ab. Für die Betrachtungen der Studie spielt es keine Rolle, welches klimaneutrale Gas dem Erdgasnetz beigemischt wird.

Tabelle 7: Entwicklung Emissionsfaktor Erdgas

Jahr	Emissionsfaktor in t CO ₂ /GWh Erdgas
2021	201,6
2030	191,5
2040	180,9
2045	175,8

Strom

Für den Emissionsfaktor des deutschen Strommixes wurde ein auf Berechnungen beruhender Pfad hinterlegt, der sich im Anhang findet. Der Emissionsfaktor sinkt bedingt durch die kontinuierlich ausgebaute Einspeisung erneuerbarer Energien und den Verzicht auf den Einsatz von fossilen Energieträgern, insbesondere den Kohleausstieg, bis 2045 auf null. Voraussetzung ist die Umsetzung des Kohleausstiegs nach aktueller Gesetzeslage.

Im Referenzpfad wird direkt mit dem Emissionsfaktor des deutschen Strommix gerechnet. Im Pionierpfad dagegen wird zusätzlich linear der Anteil von zugekauftem Grünstrom erhöht, sodass der bezogene Strom der Industrie bereits 2040 klimaneutral ist. Im Klimaneutralitätspfad wird diese Entwicklung noch beschleunigt und ab 2030 ausschließlich Grünstrom bezogen. Bedingt durch den Zukauf von Grünstrom unterscheiden sich damit die anzuwendenden Emissionsfaktoren zwischen den Pfaden.

Tabelle 8: Entwicklung Emissionsfaktor Strom¹⁷

Jahr	Emissionsfaktor in t CO ₂ /GWh		
	Dt. Strommix	Strommix Pfad 2	Strommix Pfad 3
2021	397,3	397,3	397,3
2030	252,2	132,7	0
2040	72,2	0	0
2045	0,0	0	0

Kalk

Die Entwicklung der Vorkettenemissionen aus der Herstellung des Branntkalks ist von entscheidender Bedeutung für die Gesamtbilanz der Kalksandsteinindustrie.

Im Referenzpfad werden keine nennenswerten Minderungen in der Vorkette erwartet und berücksichtigt. Der Emissionsfaktor bleibt daher konstant auf dem heutigen Niveau. In den anderen beiden Pfaden werden dagegen Minderungen in der Vorkette berücksichtigt. Für den Pionierpfad wird davon ausgegangen, dass es gelingt die energiebedingten Emissionen des Kalkbrennens vollständig zu reduzieren. Dafür ist der Verzicht auf den Einsatz fossiler Brennstoffe notwendig. Der Anteil der energiebedingten Emissionen beträgt etwa ein Drittel der Gesamtemissionen der Kalkherstellung¹⁸. Im Klimaneutralitätspfad werden darüber hinaus auch die entstehenden Prozessemissionen vollständig reduziert. Dies wird ermöglicht durch Carbon Capture and Utilization (CCU) und Carbon Capture and Storage (CCS), wie in der Roadmap der Kalkindustrie beschrieben.

Eventuelle Mehrkosten durch die Emissionsminderungen in der Kalkherstellung sind nicht Bestandteil der Studie. Daher werden keinerlei Mehrkosten in der Kalkproduktion in dieser Hinsicht in der Modellierung berücksichtigt.

¹⁷ In den Pfaden 2 und 3 wird ab einem bestimmten Zeitpunkt der Emissionsfaktor von Strom auf null gesetzt. Zu diesem Zeitpunkt kommt im Werk nur noch Grünstrom zum Einsatz. Dieser kann z. B. durch einen Energieversorger bezogen oder auch durch eigene Anlagen (z. B. PV) erzeugt werden.

¹⁸ Quelle: BVK (2020)

Tabelle 9: Entwicklung Emissionsfaktor Kalk

Jahr	Emissionsfaktor in t CO ₂ /GWh		
	Kalk (Pfad 1) t CO ₂ /t	Kalk (Pfad 2) t CO ₂ /t	Kalk (Pfad 3) t CO ₂ /t
2021	1,17	1,17	1,17
2030	1,17	1,03	1,03
2040	1,17	0,86	0,44
2045	1,17	0,78	0,00

4.4.3 Annahmen zu Energiepreisen und CO₂-Kosten

Historisch gesehen sind Energiepreise höchst volatil und weisen darüber hinaus gegebenenfalls deutliche regionale und unternehmensbezogene Unterschiede auf. Der Fokus dieser Roadmap liegt nicht auf den Entwicklungen am Energiemarkt, sondern auf den Auswirkungen der unterschiedlichen Handlungsoptionen der Kalksandsteinindustrie. Um eine Vergleichbarkeit mit der heutigen Situation zu gewährleisten und aus Gründen der Vereinfachung werden daher konstante Preise für die etablierten Energieträger Strom, Erdgas, Heizöl, Flüssiggas und Diesel hinterlegt. Die hinterlegten Preise orientieren sich am Energiebedarf der Kalksandsteinindustrie.

CO₂-Kostenbestandteile aus dem nationalen Emissionshandel der Brennstoffe wurden nicht in den Energiepreisen berücksichtigt, da diese Kosten separat betrachtet werden. Die hinterlegten Preise basieren auf Werten aus dem Jahr 2019, in denen diese Kosten noch nicht enthalten waren. Der angenommene Strompreis¹⁹ wurde um den CO₂-Anteil aus dem europäischen Emissionshandel bereinigt. Die dort inkludierten CO₂-Kosten werden ebenfalls gesondert betrachtet.

Zusätzlich zu den konventionellen Energieträgern wie Erdgas und Strom wird im Rahmen der Studie der Einsatz von regenerativ produziertem Wasserstoff und Synthesegas betrachtet. Derzeit stehen Herstellung und Vertrieb dieser Alternativen noch am Anfang, aber es wird mit Hochdruck an diesen Themen gearbeitet. Ohne die Bereitstellung klimaneutraler Brennstoffe kann die Klimawende nicht gelingen. Daher werden für die Preise von Wasserstoff und Synthesegas Prognosewerte aus der Literatur verwendet. Hier ist über den Zeitraum, den die Studie abdeckt, ein Rückgang der Preise vorgesehen, da mit zunehmender Etablierung der Prozesse und flächendeckender Marktdurchdringung von sinkenden Herstellungskosten ausgegangen werden kann. Die Energiepreise und Entwicklungen sind im Anhang offengelegt.

CO₂-Kosten

Sämtliche CO₂-Emissionen werden im Rahmen der Studie voll bepreist. Das betrifft damit auch die Scope 3-Emissionen aus der Vorkette. Maßgeblich für die Kosten ist das jeweils überwiegend gültige System. Die Emissionen aus der Branntkalkherstellung und der Stromerzeugung unterliegen damit dem europäischen Emissionshandel (EU-ETS), die übrigen Emissionen dem nationalen Emissionshandel (nEHS). Diese Kosten kommen bei den Energieträgern zusätzlich zu den eigentlichen Energiepreisen zum Tragen und werden gesondert ausgewiesen. Es wird darauf verzichtet, Effekte aus kostenlosen Zuteilungen im Rahmen des EU-ETS zu berücksichtigen. Die Kalkindustrie erhält zwar derzeit einen Teil ihrer notwendigen Emissionszertifikate kostenlos zugeteilt, aber der Ausstattungsgrad kann zwischen den Werken erheblich variieren²⁰. Darüber hinaus lässt sich nicht feststellen, ob die Einsparungen (vollständig) an die Kunden weitergegeben

¹⁹ Neben den Kosten für Beschaffung, Vertrieb und Netzentgelte sind auch sämtliche Umlagen und Steuern im Preis enthalten.

²⁰ Gleiches gilt im übertragenen Sinne für mögliche teilweise finanzielle Kompensationen zu Kosten aus dem nationalen Emissionshandelssystem in Deutschland.

werden. Außerdem muss man davon ausgehen, dass die kostenlosen Zuteilungen im zeitlichen Verlauf des hier betrachteten Zeithorizonts bis 2045 weiter absinken bzw. auslaufen. Diese Annahme wird auch durch die im Juli 2021 veröffentlichten Vorschläge der EU-Kommission u. a. zu Änderungen in der EU-Richtlinie zum Emissionshandel bekräftigt. Daher wird auch aus Gründen der Vergleichbarkeit darauf verzichtet, Effekte aus der kostenlosen Zuteilung miteinzubeziehen. Für die Stromerzeugung werden bereits jetzt keine kostenlosen Zertifikate mehr zugeteilt.

Ambitionssteigerungen der deutschen und europäischen Klimapolitik führen folglich absehbar zu weiter steigenden realen Preisen für Treibhausgasemissionen. Dies betrifft die beiden genannten Systeme. Daher wird in der Roadmap ein Preisanstieg für Emissionsberechtigungen bzw. Emissionen hinterlegt. Für den Preis aus dem EU-ETS wird ein linearer Verlauf von einem Startwert von 50 EUR/EUA (Anfang 2021) auf 125 EUR/EUA (2045) angesetzt. Der Preis aus dem nEHS unterliegt in den ersten fünf Jahren definierten Festpreisen (Startwert 2021 25 EUR/t CO₂, 2026 max. 65 EUR/t CO₂). Nach der Festpreisphase wird davon ausgegangen, dass sich die beiden Preise angleichen. Dies gilt unabhängig davon, ob es auch nach 2025 bei einem nationalen System bleibt oder aber, wie im Juli 2021 von der EU-Kommission vorgeschlagen, ein zweites europäisches Handelssystem für Kraftstoffe und Brennstoffe eingeführt wird.

Zur Wirkung auch möglicherer höherer Preise wird hier auf die später folgenden Sensitivitätsanalysen hingewiesen.

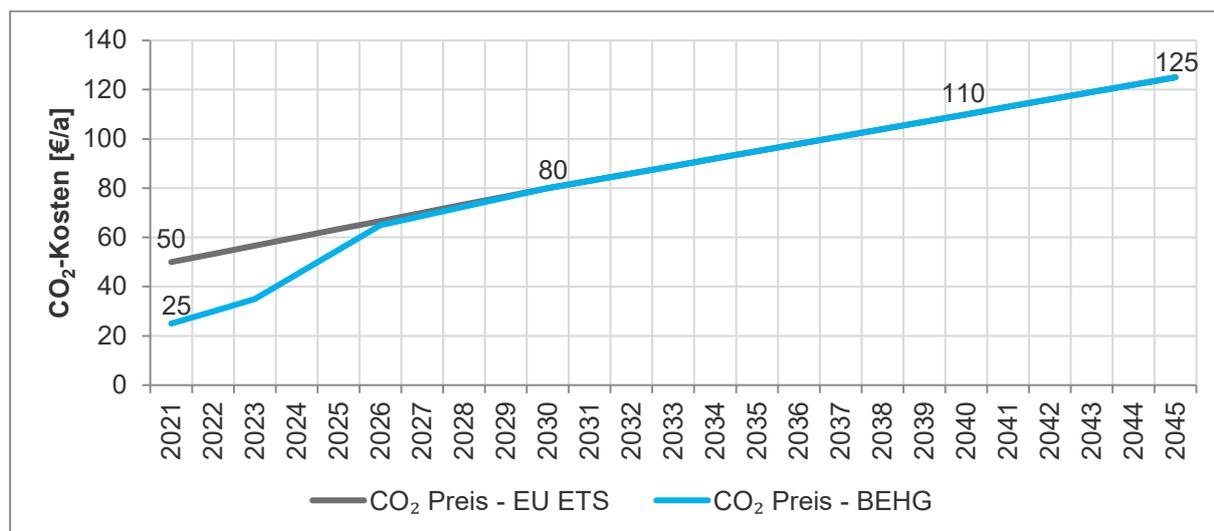


Abbildung 12: Annahmen zum Verlauf der CO₂-Preise aus dem EU ETS und nEHS

Stromherkunft

Im Referenzpfad wird für die Stromherkunft der deutsche Strommix hinterlegt. Laut Zielsetzung der Bundesregierung wird dieser bis 2045 zu 100 % aus Grünstrom bestehen. Um ein schnelleres Absinken der Emissionen zu erreichen, ist der frühere Einsatz von Grünstrom denkbar und wird für die Pfade 2 und 3 entsprechend modelliert (siehe Tabelle 8).

Der Bezug von Grünstrom kann grundsätzlich über unterschiedliche Wege realisiert werden (z. B. Grünstrom vom Stromversorger mittels Herkunftsnachweisen (HKN), Power Purchase Agreements (PPA) oder den Bau eigener Anlagen). Es ist davon auszugehen, dass sich die Stromkosten der verschiedenen Alternativen im Mittel über die Branche nicht nennenswert unterscheiden. Für die Roadmap wird daher zur Vereinfachung nur der Ansatz über Stromversorger und HKN für die Bestimmung des Strompreises gewählt.

Nicht näherer Untersuchungsgegenstand der Studie ist der Einsatz von eigenen Anlagen und unter welchen Umständen dies wirtschaftlich sinnvoll wäre. Grundsätzlich wird dies aber nicht ausgeschlossen und kann natürlich insbesondere auf bereits bestehenden Grundstücks oder Dachflächen durchaus interessant sein.

Zur (teilweisen) Deckung des Grünstrombedarfs ist es denkbar, eigene regenerative Anlagen zu betreiben. Hierbei kann zum Beispiel Photovoltaik (PV) geeignet sein, um einen Großteil der Grundlast zu decken. Die Bedarfsdeckung ist abhängig von der Größe des Kalksandsteinwerks sowie dem Standort und der Größe der PV-Anlage. Eine komplette Deckung des Grünstrombedarfs kann z. B. bei kleinen Werken gegeben sein. Bei mittleren und großen Werken hingegen reicht eine PV-Anlage oftmals nicht aus. Zudem kann eine Ergänzung aus eigenen Windkraftanlagen sinnvoll sein. Windkraftanlagen haben in der Regel eine deutlich höhere Leistung und können oftmals mehr Grünstrom als PV-Anlagen liefern. Zudem ergeben sich aus der Kombination von PV- und Windkraftanlagen Ausgleichseffekte, die wetterbedingte Ertragsausfälle verringern oder sogar vermeiden können. Da die Photovoltaik sowie die Windenergie zu den fluktuierenden erneuerbaren Energien gehören, wäre für die Deckung des Strombedarfs ein Energiespeicher notwendig, welcher mit enormen Investitionen einhergeht.

Der Bau einer Windkraftanlage sowie der Bau von v. a. größeren und Floating PV-Anlagen sind oftmals mit deutlichen Hemmnissen u. a. in der Planung, Genehmigung und Umsetzung verbunden. Von der Planung bis zur tatsächlichen Lieferung des Stroms vergehen oftmals mehrere Jahre. Daher sollte dafür gesorgt werden, dass das Genehmigungsverfahren beschleunigt wird.

Beispiel PV-Anlage: Bei einer Dachfläche von 300 bis 1.000 m² kann sich der Einsatz einer PV-Anlage für ein Durchschnitts-Kalksandsteinwerk lohnen. Geeignete Solarmodule weisen inzwischen eine Leistung unter Standard-Testbedingungen von 300-400 W_P/Modul (bei einer Modulfläche von etwa 1,7-1,8 m²) auf. In der Regel liegt dann die Amortisationszeit zwischen 10 und 15 Jahren und die Investitionskosten liegen pro Kilowatt-Peak zwischen 700 bis 900 €. Zu berücksichtigen ist jedoch, dass die Statik des Daches die Anlage tragen muss. Insbesondere bei den älteren Dächern (20-30 Jahre alt) müssten die Dächer unter Umständen erneuert werden, was wiederum mit hohen Kosten verbunden ist.

Somit muss für jeden Einzelfall geprüft werden, ob der Einsatz von eigenen regenerativen Anlagen (PV und auch Windkraft) für den Standort des Kalksandsteinwerks in Frage kommt.

– Bundesverband Kalksandsteinindustrie e.V.

4.4.4 Annahmen zur Wirtschaftlichkeit

Kosten

Die Roadmap liefert keine vollständige Kostenbetrachtung der deutschen Kalksandsteinindustrie. Betrachtet werden ausschließlich die Kosten, die direkt mit dem Thema Treibhausgasneutralität verknüpft sind und daher von den untersuchten Entwicklungen maßgeblich beeinflusst werden. Das betrifft:

- Kosten für Energieträger
- CO₂-Kosten
- Kapitalkosten für im Rahmen der Roadmap betrachtete Investitionen
- Betriebskosten für betrachtete Anlagenteile (inkl. zusätzliche Personalkosten, beispielsweise für neue Technologien)

- zusätzliche Betriebskosten durch konkrete Minderungsmaßnahmen

Wenn im weiteren Verlauf der Studie von Gesamtkosten die Rede ist, sind ausschließlich die hier betrachteten Kosten gemeint.

Sämtliche Kosten werden über die gesamte Studie in heutigen Preisen ausgewiesen. Es wird keine Inflation hinterlegt. Dies gewährleistet die direkte Vergleichbarkeit mit der heutigen Situation. Das Einbeziehen eines allgemeinen Faktors für die Inflation würde darüber hinaus an den Aussagen der Studie nichts ändern. Natürlich würden die Kosten entsprechend ansteigen, aber das Verhältnis zwischen gewissen Alternativen bliebe auch in diesem Fall gewahrt.

Investitionen

Im Rahmen der Studie wird eine Reihe von notwendigen Investitionen betrachtet. Diese umfassen Investitionen in Effizienzsteigerung und Ersatzinvestitionen mit Effizienzauswirkungen (inklusive Ersatz des Dampferzeugers), Investitionen in die Digitalisierung der Produktionsprozesse und Investitionen in spezifische Emissionsminderungsmaßnahmen. Weitere Investitionen der Kalksandsteinindustrie sind nicht Bestandteil der Studie. Die tatsächlichen Investitionen der Branche im betrachteten Zeitraum fallen damit natürlich höher aus. Insbesondere gilt es festzuhalten, dass die Investitionen in Digitalisierung und Minderungsmaßnahmen einen deutlichen Mehrbedarf an Investitionsmitteln bedeuten.

Investitionsumfang und Begrenzungen sind in den Pfaden dabei unterschiedlich hinterlegt. Die nachfolgend dargelegten jährlichen Investitionen und Investitionsbudgets wurden im Begleitkreis erarbeitet.

- Jährliche Investitionen für Effizienzsteigerungsmaßnahmen: 125 Tsd. EUR/Werk (9,5 Mio. EUR/a für die Kalksandsteinindustrie), entspricht dem Budget für Pfad 1
- Jährliche Investitionen in die zur Digitalisierung der Produktionsprozesse notwendige Hard- und Software/ Systemsteuerung 75 Tsd. EUR/Werk. Somit ergibt sich ab 2025 ein jährliches Investitionsbudget für Effizienzgewinne inkl. Digitalisierung von 200 Tsd. EUR/Werk (15,2 Mio. EUR/a für die Kalksandsteinindustrie)
- Annahme eines jährlichen Investitionsbudgets für Effizienzgewinne inkl. Digitalisierung und spezifische Maßnahmen in Pfad 2:
 - Effizienzsteigerung ohne Digitalisierung (2021-2024): 9,5 Mio. EUR
 - Effizienzgewinne inkl. Digitalisierung (ab 2025): 15,2 Mio. EUR
 - Spezifische Maßnahmen: 1,9 Mio. EUR für Pioniermaßnahmen
- Im Klimaneutralitätspfad werden keine Restriktionen hinsichtlich der verfügbaren Investitionsmittel gesetzt. Es wird mit Hilfe des Modells bestimmt, welche Investitionen nötig sind, um die Klimaneutralität zu erreichen.

Kapitalkosten

Aufbauend auf den betrachteten Investitionen werden Kapitalkosten berechnet. Es werden ausschließlich Kapitalkosten für im Rahmen der Roadmap betrachtete Investitionen ausgewiesen. Die Kapitalkosten werden mit einem festgesetzten Zinssatz²¹ von 8 % berechnet.

Der Abschreibungszeitraum unterscheidet sich hinsichtlich der Art der Investitionen:

- Allgemeine Effizienzgewinne, Digitalisierung: 7 Jahre
- Größere Investitionen (z. B. Dampferzeuger): 12 Jahre

²¹ Bei dem hier genannten Zinssatz handelt es sich nicht um Fremdkapitalzinsen sondern um die interne Verzinsung. Hier sind Risikoaufschläge eingepreist, die bei den noch relativ unerprobten Minderungsmaßnahmen entsprechend hoch ausfallen.

Die verwendeten Werte für den Abschreibungszeitraum entsprechen einem Mittelwert für die relevanten Anlagen der Branche.

4.5 Betrachtete Technologien und Maßnahmen

Zur Erreichung der Klimaneutralität müssen neue Technologien zum Einsatz kommen. Dies kann z. B. auch einen Brennstoffwechsel (u. a. Wasserstoff, synthetische Kraftstoffe, Synthesegas, elektrische Energie) bei bereits etablierten Prozessen bedeuten. Gerade für die Kalksandsteinindustrie ist dieser Ansatz von besonderer Bedeutung, da die Dampferzeuger maßgeblichen Anteil an den eigenen Emissionen haben.

Grundsätzlich wäre auch der Einsatz von Altholz als Brennstoff denkbar. Nach Angabe von Betreibern steht dieses z. T. dezentral zur Verfügung. Diese Option wird jedoch im Rahmen der Studie nicht näher betrachtet, da hier in Hinblick auf die gesamte Branche erhebliche Verfügbarkeitsprobleme bestehen. Zudem müssen bei dem Thema Altholz genehmigungsrechtliche Aspekte berücksichtigt werden. Es wird nicht ausgeschlossen, dass dies eine valide Option für einzelne Werke darstellen kann, aber ein flächendeckender Einsatz ist nicht denkbar und wird daher ausgeschlossen.

Im Rahmen des Begleitkreises wurden Annahmen zu relevanten Emissionsminderungsmaßnahmen, deren Kosten und Energieeinsätzen erarbeitet.



Abbildung 13: Produktion – Härtekessel; Bildquelle: © Bundesverband Kalksandsteinindustrie e.V.

4.5.1 Ausgewählte Minderungsmaßnahmen

Dampferzeuger

Der Dampferzeuger stellt den wichtigsten Hebel zur Vermeidung von Emissionen in den Werken dar. Dementsprechend liegt auf diesem auch besonderes Augenmerk. Es wurden vier Möglichkeiten identifiziert, die für Investitionen in diesem Bereich in Frage kommen. Da die Dampferzeuger in den Werken im Betrachtungszeitraum der Studie aus Altersgründen einmal ausgetauscht werden müssen, werden auch moderne Erdgaskessel als Referenztechnologie einbezogen, obwohl diese natürlich nicht zur Klimaneutralität führen. Für den Klimaneutralitätspfad kommen daher auch nur Dampferzeuger in Frage, die mit Wasserstoff oder Synthesegas befeuert oder aber elektrisch betrieben werden.

Maßnahmen zur Wärmeeinsparung

Neben der Erzeugung der Wärme bietet auch die Nutzung derselben weitere Einsparpotenziale. Dabei sind verschiedene Ansatzpunkte denkbar, die sich in der Realität je nach Werk stark unterscheiden können. Für die Roadmap wurden Durchschnittswerte festgelegt, die auf das virtuelle Durchschnittswerk abgestimmt sind. Je nach Anlagensituation können Einsparungen und Kosten der genannten Alternativen abweichen. Betrachtet werden:

- Wärmespeicher zur besseren Nutzung bereits vorhandener Wärme etwa zur Abfederung des Spitzenbedarfs nach dem Wochenende
- Schutz der Rohlinge vor Auskühlung (Vorwärmung oder Dämmung)
- Optimiertes Wärmemanagement (z. B. mehrstufige Wärmerückgewinnung, Erhöhung der Speisewassertemperatur, Anpassung Betriebsweise, etc.)
- Optimierte Nutzung der Autoklaven (z. B. durch kontinuierliche Beschickung, volle Ausnutzung des Raumangebots, häufiges Überlassen, etc.)

Stapler

In den Werken kommen Stapler unterschiedlicher Größenordnung zum Einsatz. Derzeit werden diese mit Diesel betrieben. Aus Gründen der Vereinfachung werden die Stapler modelltechnisch beim Ersatz zu einer Gruppe zusammengefasst. Als klimafreundliche Alternativen werden elektrische Stapler und Stapler, die mit synthetischen Kraftstoffen betrieben werden, im Rahmen der Roadmap beleuchtet.

Verpackungsanlage

Derzeit werden auch die Verpackungsanlagen in den Werken überwiegend mit fossilen Brennstoffen betrieben. Auch wenn diese nur einen sehr geringen Anteil an den gesamten Emissionen der Branche haben, ist ein Ersatz notwendig, um die Emissionen vollständig zu reduzieren. Als Alternative stehen elektrisch betriebene Folienstretchanlagen zur Verfügung.

Maschinen im Sandabbau

Diese liegen nicht im Fokus der Studie und es wird darauf verzichtet hier Investitionen für neue Maschinen zu betrachten. Allerdings wird in Pfad 3 der notwendige Treibstoff durch klimaneutrale Alternativen ersetzt.

Transport

Analog zum Sandabbau wird auch hier davon abgesehen auf notwendige Investitionen zum Ersatz der derzeitig eingesetzten LKWs einzugehen. Diese befinden sich ohnehin oftmals im Besitz von externen Partnern. Darüber hinaus wird sich die Kalksandsteinindustrie den allgemeinen Entwicklungen zur Mobilitätswende anschließen, diese jedoch nicht maßgeblich beeinflussen können. Daher wird angenommen, dass in Pfad 2 ein Teil des Transports auf elektrische LKWs umgestellt wird, während in Pfad 3 bis 2045 der gesamte Transport auf klimaneutrale Lösungen setzt. Neben der Batterieelektrischen Variante kommt hier dann auch die Brennstoffzelle zum Einsatz. Gemäß Transport & Environment (2020) erreichen die klimaneutralen Alternativen noch im Betrachtungszeitraum Kostenparität mit den klassischen dieselbetriebenen LKWs und qualifizieren sich damit auch wirtschaftlich für einen flächendeckenden Einsatz.

Im Referenzpfad erfolgt der Transport weiterhin auf Basis von Diesel.

4.5.2 Annahmen zu Technologieverfügbarkeiten und Einsatzzeitpunkte

Der flächendeckende Einsatz klimaneutraler Energieträger ist an eine entsprechende Verfügbarkeit und das Vorhandensein der dafür notwendigen Infrastruktur gekoppelt. Anpassungsbedarf der Infrastruktur in den Werken ist bei den jeweiligen Maßnahmen berücksichtigt, regionale Infrastruktur muss allerdings bereitgestellt werden und wird für die Modellierung vorausgesetzt. Um zu berücksichtigen, dass eine entsprechende Infrastruktur für Wasserstoff noch nicht gegeben ist, wird der Einsatz von Wasserstoff erst ab dem Jahr 2027 in Betracht gezogen. Restriktionen für die verfügbaren Mengen an klimaneutralem Wasserstoff, Synthesegas und Strom werden nicht gesetzt.

Batterieelektrische LKWs werden im Rahmen der Studie in den relevanten Pfaden ab 2030, LKWs mit Brennstoffzelle im Klimaneutralitätspfad ab 2040 eingesetzt.

4.6 Vorgehen zur Modellierung

Zur Modellierung des Referenzpfads wird der Status quo in die Zukunft fortgeschrieben. Die Dampferzeuger werden gleichmäßig im Betrachtungszeitraum ausgetauscht und sorgen gemeinsam mit den relevanten Effizienzsteigerungen für einen Rückgang der Energiekosten. Aufbauend auf den Energie- und Rohstoffeinsätzen, sowie den Investitionen werden mit den dargelegten Emissionsfaktoren und Preisen Emissionen und Kosten des Referenzpfads bestimmt.

Für Pfad 2 und Pfad 3 erfolgt ein etwas anderes Vorgehen. Die allgemeinen Effizienzsteigerungen, wie auch diejenigen durch Digitalisierung verringern gemäß dargelegtem Verlauf den Energieverbrauch in den Werken. Darüber hinaus werden in diesen beiden Pfaden spezifische Minderungsmaßnahmen umgesetzt. Grundlage dafür sind die Vermeidungskosten der Maßnahmen. Es wird immer die Maßnahme umgesetzt, die eine Tonne CO₂ zu den geringsten Kosten einspart. Natürlich wird darauf Rücksicht genommen, dass bestimmte Maßnahmen nur unter bestimmten Bedingungen und nur in gewisser Anzahl umgesetzt werden können. Beispielsweise verfügen die 76 virtuellen Werke in der Modellierung zusammen über 76 erdgasbefeuerte Dampferzeuger. Es können also insgesamt auch nur 76 Dampferzeuger durch neue Alternativen ersetzt werden.

Im Pionierpfad werden nur so viele Maßnahmen umgesetzt, wie das verfügbare Investitionsbudget zulässt. Es wird berücksichtigt, dass auch in diesem Pfad jeder Dampferzeuger erneuert werden muss.

Im Klimaneutralitätspfad werden alle Maßnahmen umgesetzt, die zur Erreichung der Klimaneutralität erforderlich sind. Die dafür notwendigen Investitionen werden bestimmt.

Sowohl in Pfad 2 als auch 3 werden die Auswirkungen der durchgeführten Maßnahmen auf die Energieeinsätze der Branche bestimmt. Darauf aufbauend werden analog zum Referenzpfad Emissionen und Kosten berechnet.

5 Ausgangsbasis

Wie bereits beschrieben wird als Basis das Ausgangsniveau von 2019 verwendet. Dieses Jahr ist repräsentativer als 2020 auf Grund der Sondereffekte durch die Corona-Pandemie. Die Werte von 2019 werden damit in das Basisjahr 2021 der Roadmap übernommen.

5.1 Energieeinsatz und -träger

Der direkte Energieeinsatz durch die deutsche Kalksandsteinindustrie innerhalb ihrer Werksgrenzen wird dominiert durch den Einsatz von Erdgas, der 80 % des Gesamtenergieeinsatzes übersteigt. Damit entfallen etwa 625 GWh der insgesamt eingesetzten 775 GWh auf diesen Energieträger. Der überwiegende Teil des Erdgases wird in den Dampferzeugern der Werke eingesetzt, ein geringer Anteil auch in den Verpackungsanlagen. Eine vernachlässigbar geringe Menge Erdgas kommt darüber hinaus in Heizungsanlagen zum Einsatz. Diese Menge ist verschwindend gering und wird nicht im Detail betrachtet. Zusätzlich kommen in der Dampferzeugung auch noch 45 GWh Heizöl zum Einsatz. Kohle spielt in der Industrie keine Rolle mehr, hier wurden entsprechende Schritte zur Reduktion der Emissionen bereits umgesetzt.

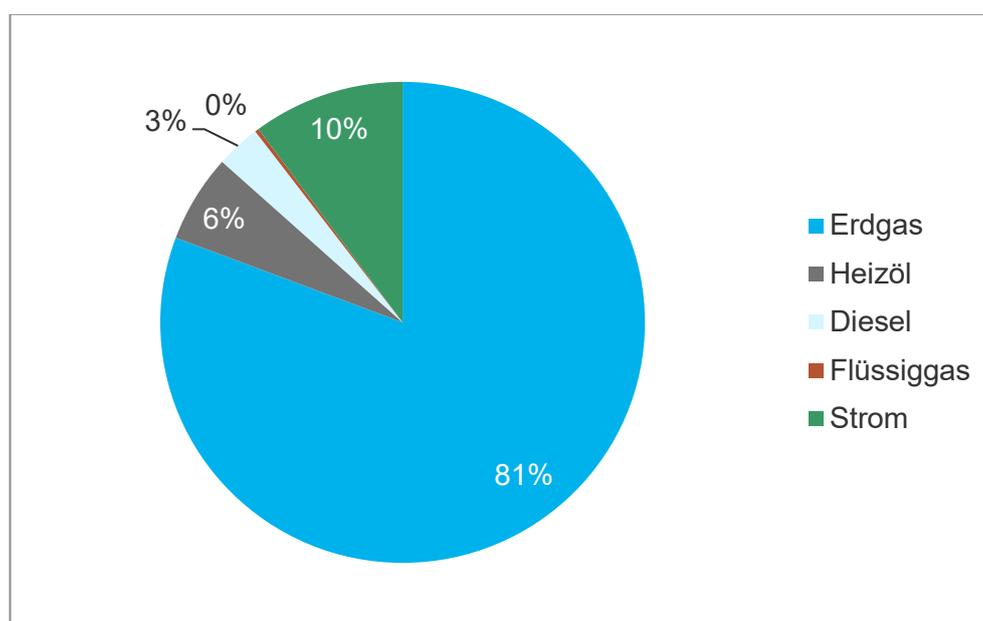


Abbildung 14: Aufteilung Energieträger deutsche Kalksandsteinindustrie (Bezug Scope 1 und Scope 2) im Basisjahr 2021

Der zweitwichtigste Energieträger nach Erdgas ist Strom. Davon werden jährlich rund 78 GWh in den Werken eingesetzt. Große Verbraucher sind etwa Pressen, Mischer und Wasseraufbereitungsanlagen. Darüber hinaus werden noch 23 GWh Diesel für Stapler und Maschinen im Sandabbau eingesetzt. Zu einem sehr geringen Anteil, mit einer Einsatzmenge von etwa 2 GWh, spielt auch noch Flüssiggas eine Rolle in der Industrie. Flüssiggas wird in Verpackungsanlagen eingesetzt.

Nimmt man noch den zusätzlichen Energieverbrauch für Transport und externen Sandabbau hinzu, steigt der Gesamtverbrauch um ca. ein Viertel. Die Menge ist damit durchaus relevant und wird daher auch im weiteren Verlauf betrachtet. Beim externen Verbrauch dominiert Diesel durch den Transport. Insgesamt beträgt die Höhe des externen Verbrauchs etwa 190 GWh jährlich. Bei Gesamtbetrachtung ist damit weiterhin Erdgas der führende Energieträger. Allerdings sinkt der Anteil dann auf etwa 65 %.

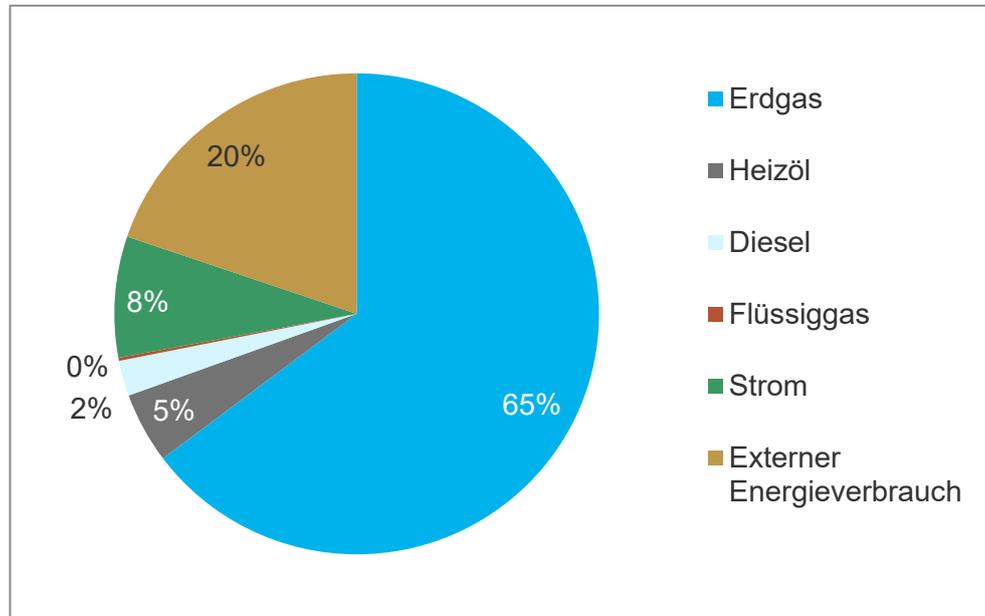


Abbildung 15: Aufteilung Energieträger deutsche Kalksandsteinindustrie inkl. Transport und externer Sandabbau (Bezug Scope 1 bis Scope 3) im Basisjahr 2021

5.2 Emissionen

Wichtigste Treiber der Emissionen sind, im Gegensatz zu vielen anderen Industrien, jedoch nicht die oben dargelegten Energieverbräuche, sondern die Scope 3-Emissionen aus der Vorkette. Diese werden durch den hohen Emissionsfaktor des zugekauften Branntkalks bedingt. Die gesamten Scope 3-Emissionen machen mit rund 634 kt CO₂ etwa 79 % der Emissionen der Branche aus. Nur etwa ein Fünftel der Emissionen geht damit auf die eigenen Produktionsprozesse in den Werken zurück. Hier entfallen 133 kt CO₂ auf Scope 1-Emissionen und 31 kt CO₂ auf Scope 2-Emissionen. Da diese Emissionen direkt von der Industrie beeinflusst werden können, liegt der Fokus der Roadmap dennoch auf diesem Bereich.

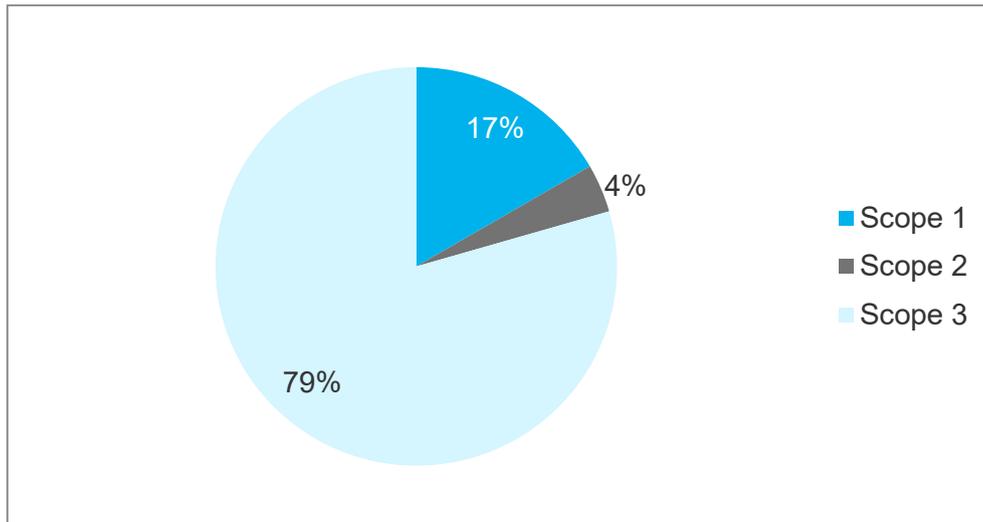


Abbildung 16: Aufteilung der CO₂-Emissionen im Basisjahr 2021 nach Scopes

Betrachtet man nun in Abbildung 17 nur die Emissionen aus Scope 1 und 2 ergibt sich wieder ein ähnliches Bild wie in Abbildung 14 beim Energieeinsatz. Auch die Emissionen der Werke werden vom Erdgas dominiert. Allerdings sinkt der Anteil durch den, für fossile Brennstoffe verhältnismäßig geringen Emissionsfaktor, auf 70 % ab.

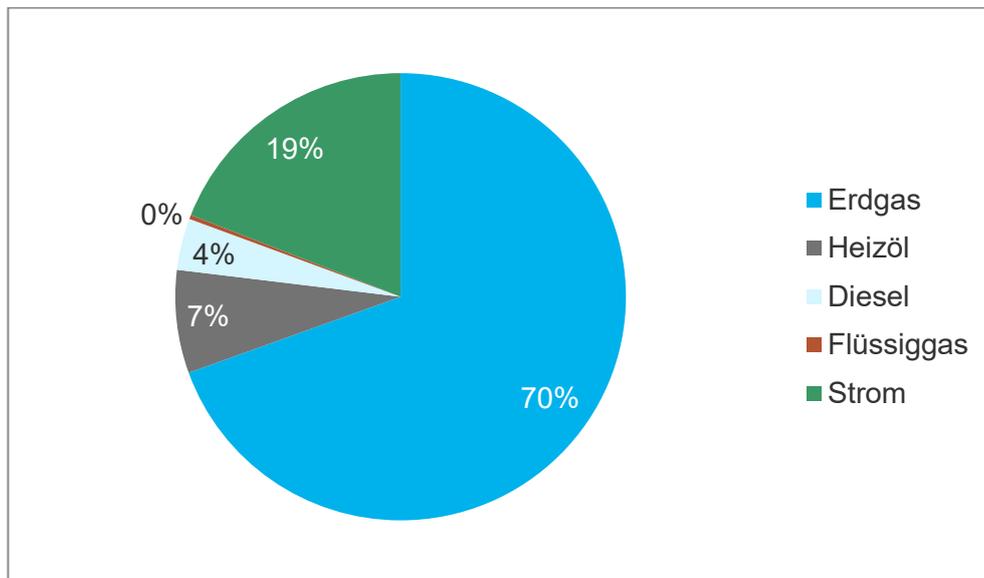


Abbildung 17: Aufteilung der CO₂-Emissionen im Basisjahr 2021 - Scope 1 und Scope 2

Der Erdgaseinsatz ist damit für 114 kt CO₂ verantwortlich. Im Gegensatz dazu steigt der Anteil von Strom durch den aktuell noch hohen Anteil fossiler Brennstoffe in der deutschen Stromerzeugung. Die gesamten Scope 2-Emissionen von 31 kt CO₂ entfallen auf den Einsatz von Strom. Die anderen Energieträger sind von deutlich geringerer Bedeutung auf Flüssiggas entfallen in der gesamten Industrie etwa nur rund 500 t CO₂.

Bei einem detaillierten Blick auf die Scope 3-Emissionen der Branche wird die über-
 ragende Bedeutung der Vorketten Emissionen deutlich. Die Scope 3-Emissionen setzen
 sich aus den Emissionen des externen Sandabbaus, Transport der Rohstoffe Sand und
 Kalk zum Werk, Transport der Kalksandsteine zum Kunden und den Emissionen aus dem
 eingekauften Kalk zusammen.

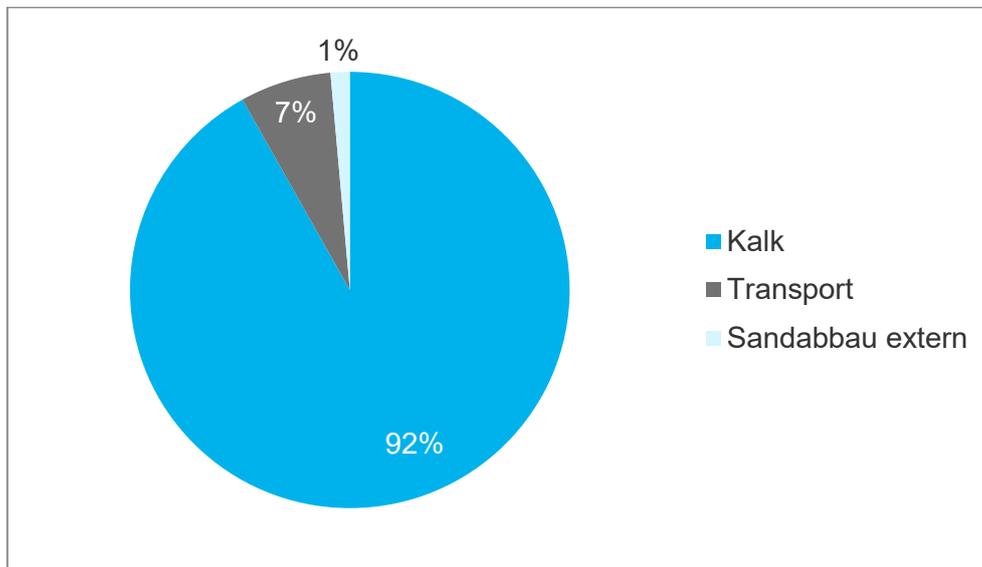


Abbildung 18: Aufteilung der CO₂-Emissionen im Basisjahr 2021 - Scope 3

Wie in Abbildung 18 zu sehen ist, machen die Emissionen aus der Kalkherstellung 92 %
 der Scope 3-Emissionen der Branche aus. Auf die Kalkherstellung allein entfallen damit
 583 kt CO₂ der insgesamt 738 kt CO₂ aus der Kalksandsteinbranche. Der Transport
 schlägt innerhalb Scope 3 mit 43 kt CO₂ respektive 7 % zu Buche. Der externe
 Sandabbau steht nur für 1 % der Emissionen oder etwa 9 kt CO₂.

5.3 Energiebezogene Kosten

Die Verteilung der gesamten betrachteten Kosten im Basisjahr wird aus Abbildung 19
 ersichtlich. Knappe 50 % der Kosten entstehen direkt durch die eingesetzten Energie-
 träger. Die Summe beläuft sich auf 60,4 Mio. EUR. Davon entfallen wiederum etwa 60 %
 auf den Energieträgereinsatz in den Werken. Die Kosten für den externen Einsatz von
 Energieträgern fallen für Transport und Sandabbau an. Auf einem ähnlichen Niveau wie
 die internen Energiekosten liegen die gesamten CO₂-Kosten. Diese belaufen sich auf
 35,4 Mio. EUR im Basisjahr und zeigen sich damit ebenfalls für beinahe 30 % der
 betrachteten Kosten verantwortlich. Der bei weitem überwiegende Teil entfällt dabei auf
 die Kosten für Emissionen aus der Kalkherstellung.

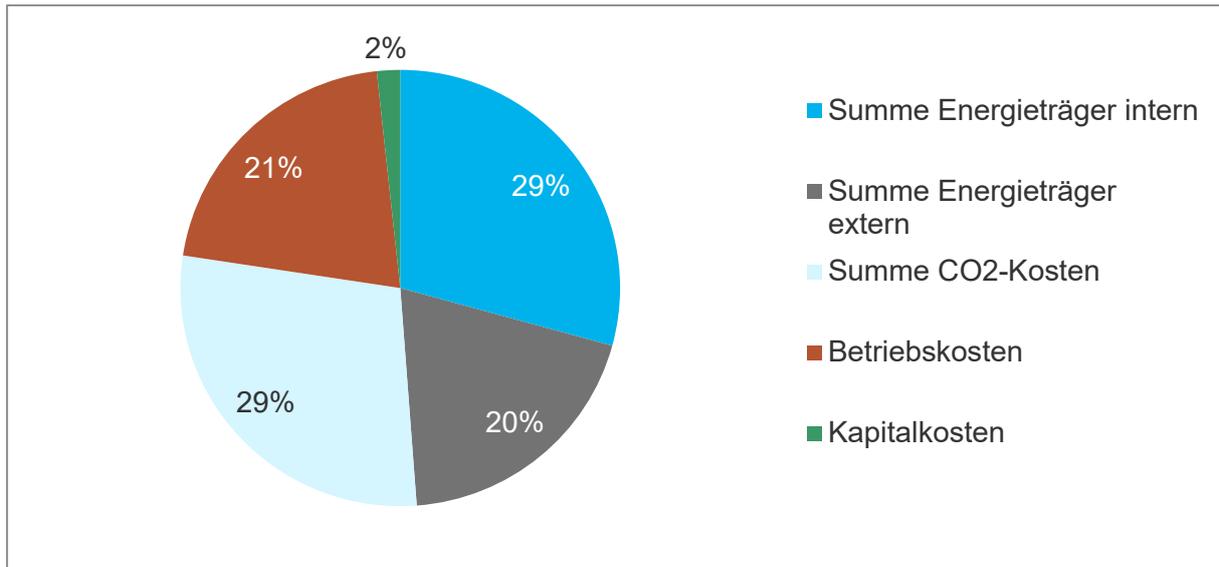


Abbildung 19: Aufteilung der energiebezogenen Kosten im Basisjahr 2021

Mit 21 % oder 25,8 Mio. EUR stellen auch die Betriebskosten einen relevanten Teil der betrachteten Kosten da. Hierunter summieren sich im Basisjahr Kosten für den Betrieb des Dampferzeugers und der vor- und nachgelagerten Wärmeinfrastruktur, der Autoklaven, der Stapler und der Verpackungsanlage. Darin enthalten sind etwa Instandhaltung, Wartung, Personal, Kleinreparaturen und Betriebsmittel. Die betrachteten Betriebskosten sind ausdrücklich nicht mit den gesamten Betriebskosten der Kalksandsteinindustrie gleichzusetzen.

Insgesamt belaufen sich die betrachteten Kosten im Basisjahr damit auf rund 123,7 Mio. EUR.

Da die CO₂-Kosten für Kalk extern indirekt anfallen und die direkten CO₂-Kosten der Branche, ähnlich wie bei den Emissionen überlagern, zeigt Abbildung 20 die Gesamtkosten ohne diesen Anteil. Hier spielen die CO₂-Kosten dann im Basisjahr eine untergeordnete Rolle und belaufen sich nur noch auf 6,2 Mio. EUR. Die übrigen Kosten, insbesondere der Energieträger fallen damit entsprechend mehr ins Gewicht.

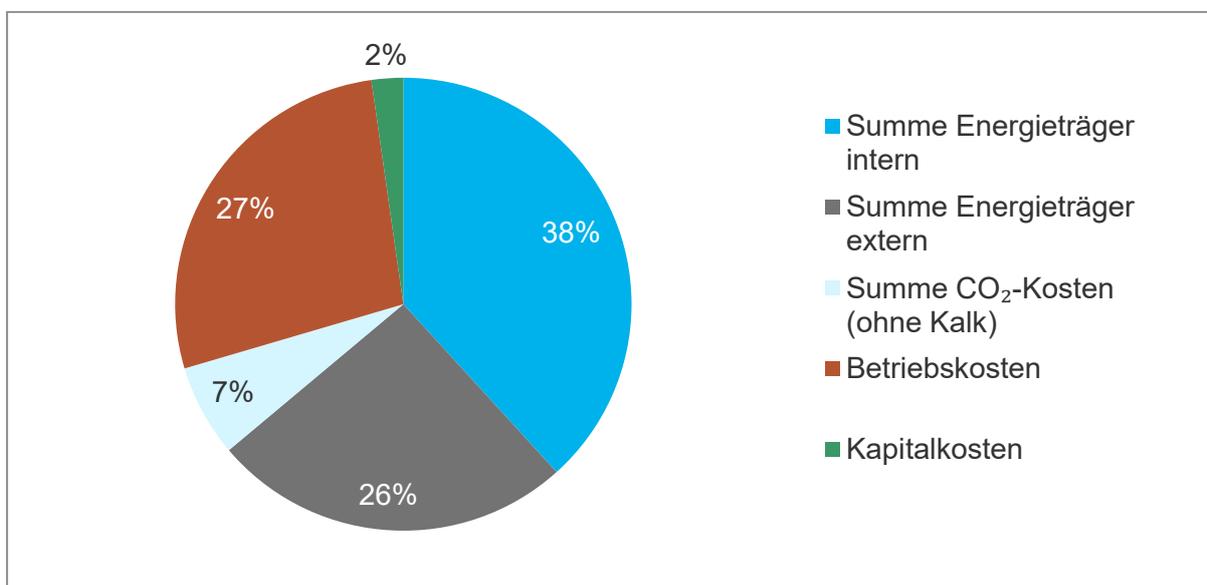


Abbildung 20: Aufteilung der energiebezogenen Kosten im Basisjahr 2021 (ohne CO₂-Kosten aus der Emissionsfracht Kalk)

6 Referenzpfad (Pfad 1)

Der Referenzpfad bildet den derzeitigen Stand der Technik und bereits bekannte Entwicklungen der äußeren Rahmenbedingungen ab. Er zeigt somit auf, welche Emissionen und Kosten entstehen, wenn heutige Rahmenbedingungen fortgeführt werden würden. Damit liefert er auch über den zeitlichen Betrachtungshorizont einen realistischen Vergleichswert für die anderen beiden Pfade.

6.1 Maßnahmen

Im Referenzpfad werden die Emissionsminderungen abgebildet, die sich im Modus „business as usual“ noch erreichen lassen. Dazu tragen vor allem jährliche Investitionen mit Auswirkungen auf die Effizienz der bestehenden Anlagen bei. Dafür werden 9,5 Mio EUR pro Jahr veranschlagt. In diesem Betrag sind darüber hinaus auch die notwendigen Investitionen für den Austausch der Dampferzeuger in den Werken enthalten. Über den Betrachtungszeitraum wird auf diese Weise eine allgemeine Effizienzsteigerung von etwa 7 % erwartet und abgebildet. Dazu kommen noch die Auswirkungen durch den fortlaufenden Austausch der Dampferzeuger. Hier wird davon ausgegangen, dass durch die neuen Anlagen 3,5 % Brennstoff eingespart werden können. Allerdings werden auch die neuen Kessel weiterhin mit Erdgas befeuert. Die Dampferzeuger werden gleichmäßig nach und nach erneuert, sodass bis 2045 jedes Werk mit einem neuen Dampferzeuger ausgestattet ist.

Weitere Minderungsmaßnahmen fließen in diesen Pfad nicht ein, daher wird auch insgesamt nur eine überschaubare Reduktion der Emissionen erreicht. Aber es wirken sich zusätzlich noch einige externe Faktoren positiv auf die Emissionsentwicklung aus. Das betrifft vor allem die Entwicklung der Emissionsfaktoren für die beiden wichtigsten Energieträger in den Werken, also Erdgas und Strom. Während der Emissionsfaktor von Erdgas durch Beimischung von klimaneutralem Gas von aktuell 0,056 t CO₂/GJ auf etwa 0,049 t CO₂/GJ absinkt, wird der deutsche Strommix bis 2045 komplett auf erneuerbare Energien umgestellt und damit fallen hier keinerlei Emissionen mehr an. Über den Zeitraum sinken die Emissionen hier kontinuierlich und sorgen für einen spürbaren Rückgang.



Abbildung 21: Kalksandsteinlager; Bildquelle: © Bundesverband Kalksandsteinindustrie e.V.

6.2 Entwicklung des Energieeinsatzes

Im Referenzpfad sinkt der gesamte Energiebedarf der 76 Kalksandsteinwerke von 738 GWh auf 697 GWh. Ausschlaggebend dafür sind die genannten Effizienzmaßnahmen. Dies entspricht einem Rückgang ggü. 2021 um 10 %. Das Verhältnis der Energieträger verändert sich nicht relevant. Die allgemeinen Effizienzsteigerungsmaßnahmen wirken bis 2040. Abbildung 22 zeigt das Abflachen der Einsparungen infolge der Ausschöpfung der größten Effizienzpotenziale in den nächsten Jahren. Das Absinken bis 2045 ist auf den erforderlichen Austausch der Dampferzeuger zurückzuführen.

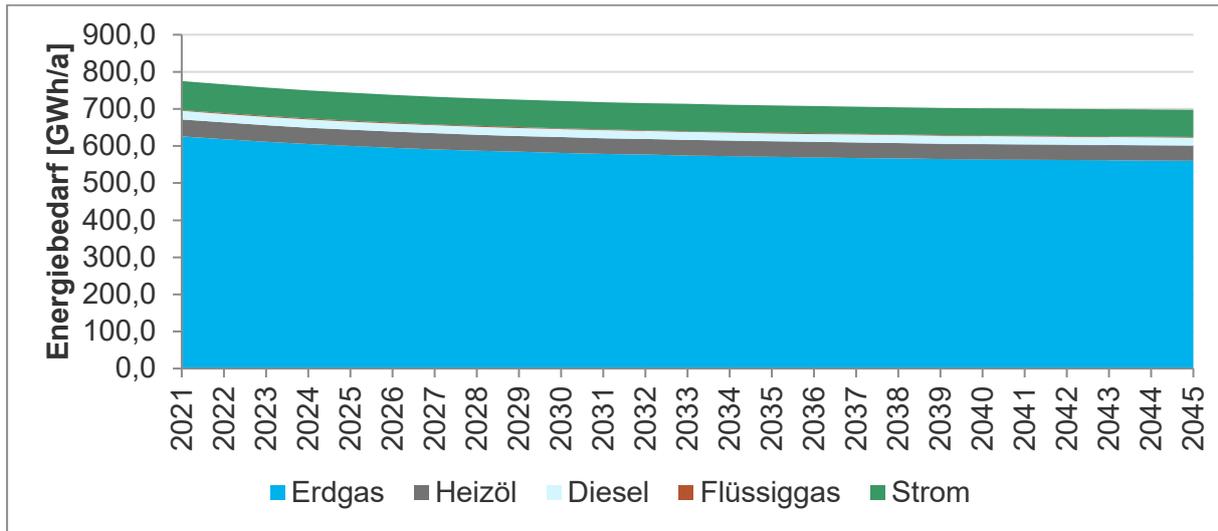


Abbildung 22: Entwicklung des Energieträgereinsatzes der Kalksandsteinwerke bis 2045 im Referenzpfad

Beim externen Energieeinsatz für Transport und Maschinen im Sandabbau sind kaum Veränderungen zu vermerken. Dieser beträgt 2021 rund 191 GWh und sinkt um ca. 1 % auf 189 GWh.

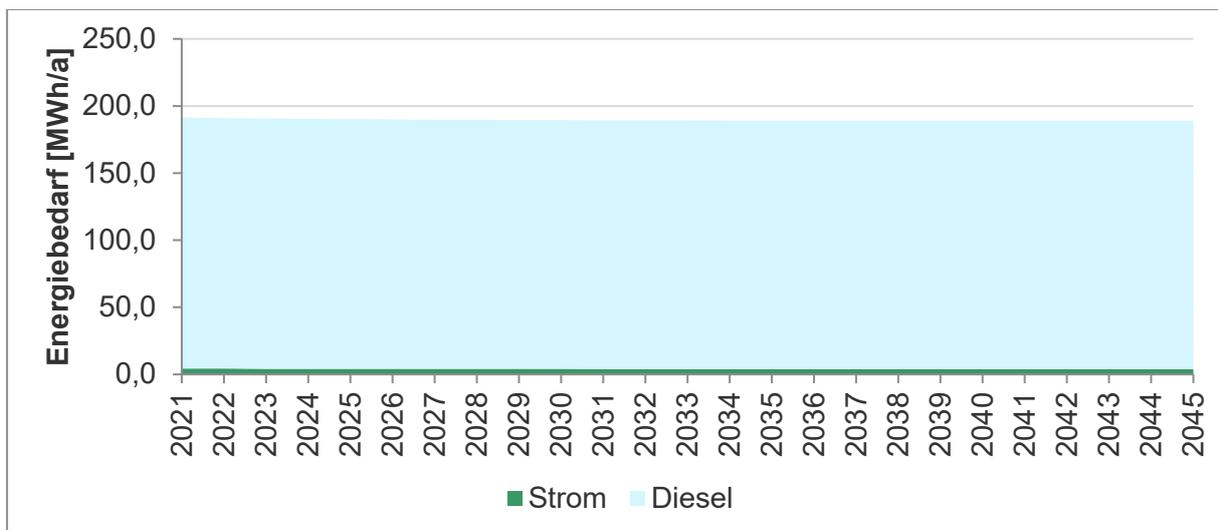


Abbildung 23: Entwicklung des Energieträgereinsatzes Transport und externer Sandabbau bis 2045 im Referenzpfad (Bezugsgröße: deutsche Kalksandsteinindustrie)

6.3 Entwicklung der CO₂-Emissionen

Wie bereits beschrieben, überlagern die Emissionen aus der Kalkherstellung die direkten Emissionen der Kalksandsteinindustrie deutlich. Um dennoch die relevanten Veränderungen innerhalb der von der Branche beeinflussten Emissionen gut erkennbar darstellen zu können, werden die Entwicklungen differenziert nach den Scopes aufgezeigt. Die positiven Effekte durch die Recarbonatisierung werden ebenfalls zusätzlich betrachtet. Dies gilt auch für die anderen beiden Pfade.

Gesamte Emissionen ohne Recarbonatisierungseffekte

Insgesamt gelingt im Referenzpfad bis 2045 eine Emissionsminderung um ca. 8 %. Von einem Ausgangsniveau von 798 kt CO₂ gelangt man auf ein Niveau von 738 kt CO₂. Knapp die Hälfte der Reduktion gelingt bereits bis 2030, sodass in dem Jahr noch 770 kt CO₂ ausgestoßen werden. Da kaum Reduktionen bei den Scope 3-Emissionen stattfinden, insbesondere keinerlei Reduktionen bei der Kalkherstellung, sinken die Emissionen weniger stark als der Energieeinsatz. Auffällig in Abbildung 24 ist die vollständige Reduktion der Scope 2-Emissionen. Da in Scope 2 nur die Emissionen aus dem Strombezug fallen und dieser 2045 komplett regenerativ erzeugt wird, fallen 2045 hier keine Emissionen mehr an.

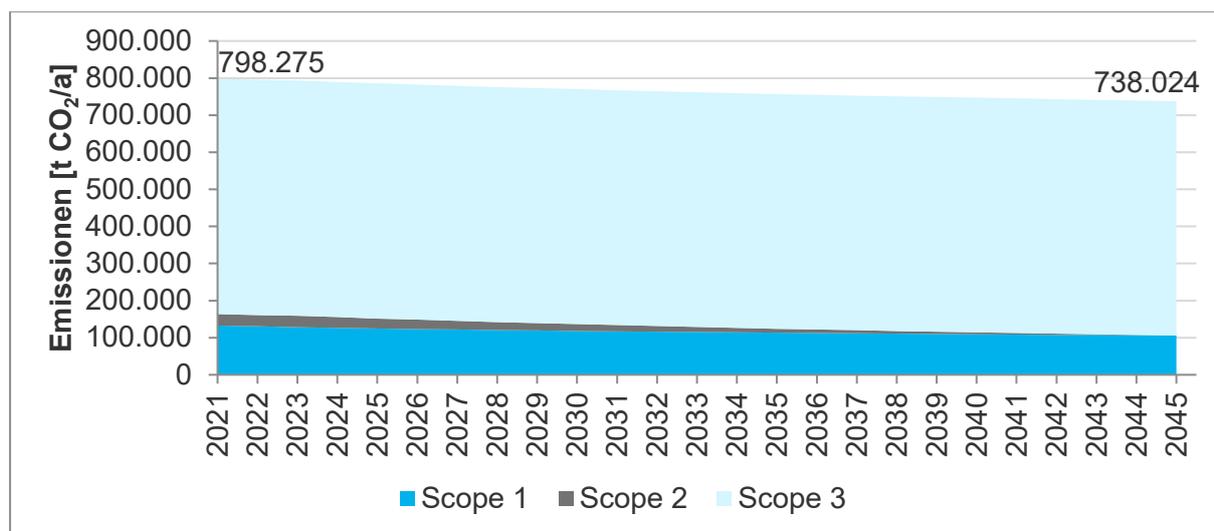


Abbildung 24: Entwicklung der CO₂-Emissionen der Kalksandsteinindustrie bis 2045 im Referenzpfad

Scope 1- und Scope 2-Emissionen

Betrachtet man nur die Scope 1- und Scope 2-Emissionen, ist ein stärkerer Rückgang der Emissionen zu bemerken. Hier kommt der Beitrag der Branche durch Austausch und/oder Modernisierung eigener Anlagen zur Geltung. In Scope 1 und 2 kommt es zu einem Rückgang der Emissionen von rund 164 kt CO₂ auf 106 kt CO₂ bis zum Zieljahr 2045. Dies entspricht in etwa einem Rückgang um 35 %. Bis 2030 können die Emissionen auf 137 kt CO₂ (um 17 %) reduziert werden.

Neben den Effizienzgewinnen durch die Anstrengungen der Kalksandsteinindustrie wirkt sich hier besonders der Rückgang der Emissionsfaktoren Strom und Erdgas aus. Diese sind Haupttreiber für die Emissionsminderungen im Referenzpfad. Durch die vollständige Minderung der strombedingten Emissionen nimmt der Anteil der Emissionen aus Erdgas in der Gesamtbetrachtung der Emissionen der Werke von einem hohen Niveau aus noch weiter zu, wie Abbildung 25 verdeutlicht. Die besondere Bedeutung von Wärmeerzeugung und -nutzung für die Klimaziele der Industrie wird damit unterstrichen.

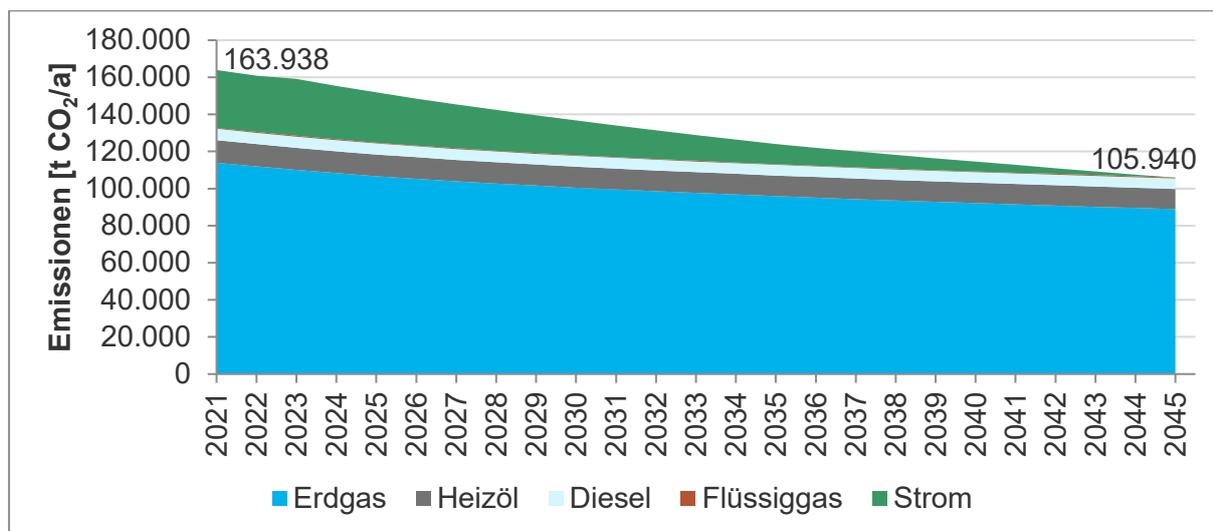


Abbildung 25: Entwicklung der CO₂-Emissionen aus Scope 1 und Scope 2 bis 2045 im Referenzpfad (Bezugsgröße: deutsche Kalksandsteinindustrie)

Scope 3-Emissionen

Die Scope 3-Emissionen machen im Basisjahr mehr als 80 % der Gesamtemissionen der Branche aus. Davon entfallen wiederum über 90 % auf die Emissionsfracht des zugekauften Kalks.

Beim Blick auf die Entwicklung der Scope 3-Emissionen in Abbildung 26 ergibt sich ein deutlich anderes Bild als für Scope 1 und 2. Hier ist im Referenzpfad kein nennenswerter Rückgang zu erkennen, da insbesondere die Emissionen aus dem Kalk unverändert bleiben. Diese sind also auch im zeitlichen Verlauf des Referenzpfads für den Großteil der Emissionen verantwortlich. Insgesamt werden die Scope 3-Emissionen nur unwesentlich von 634 kt CO₂ auf 632 kt CO₂ reduziert. Durch den hohen Anteil der Scope 3-Emissionen dämpft dieser geringe Rückgang auch die Minderungen beim Blick auf die Gesamtemissionen der Branche.

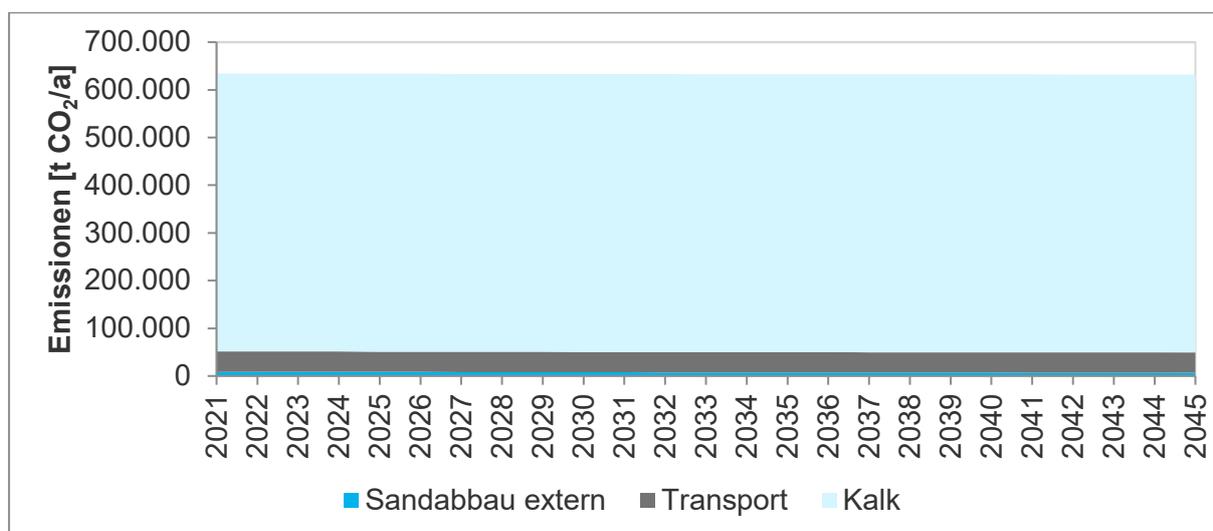


Abbildung 26: Entwicklung der CO₂-Emissionen aus Scope 3 bis 2045 im Referenzpfad (Bezugsgröße: deutsche Kalksandsteinindustrie)

Lässt man die Emissionen aus der Vorkette Kalk für eine weitere Betrachtung der Scope 3-Emissionen in Abbildung 27 außen vor, kann man einen geringen Rückgang erkennen. Dieser wird bedingt durch Effizienzgewinne im Sandabbau und den geringeren Emissionsfaktor Strom, der sich ebenfalls bei den dort eingesetzten Maschinen auswirkt.

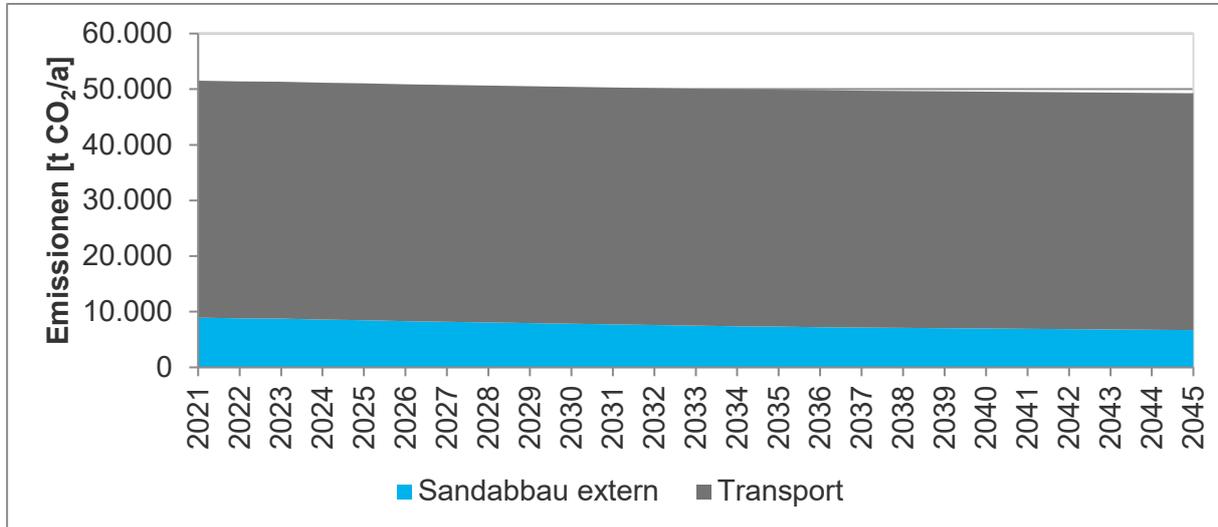


Abbildung 27: Entwicklung der CO₂-Emissionen aus Scope 3 ohne Kalk bis 2045 im Referenzpfad (Bezugsgröße: deutsche Kalksandsteinindustrie)

Gesamte Emissionen mit Recarbonatisierungseffekten

Der Blick auf die gesamten ausgestoßenen CO₂-Emissionen der Branche liefert allerdings noch nicht das gesamte Bild. Durch die bereits beschriebene Recarbonatisierung nehmen Kalksandsteine während ihrer Nutzung CO₂ aus der Umgebung auf und lagern es dauerhaft ein, ohne dadurch ihre Eigenschaften zu verlieren. Diese dauerhafte Entnahme von CO₂ aus der Umwelt muss den entstehenden Emissionen gegenübergestellt werden, um die realen Emissionseffekte der Kalksandsteinproduktion abzubilden. Im Rahmen der Roadmap werden jeweils nur die Recarbonatisierungseffekte abgebildet, die auf die im Betrachtungszeitraum produzierten Steine entfallen. Da Recarbonatisierung ein langjähriger Prozess ist, steigen die Effekte im Laufe der Zeit an und wirken auch noch über 2045 hinaus.

Abbildung 28 zeigt die Entwicklung der Gesamtemissionen unter Berücksichtigung der Recarbonatisierung bis 2045. Unter Berücksichtigung dieser Effekte findet eine Minderung der Emissionen von 798 kt CO₂ auf 568 kt CO₂ statt. Dies entspricht einer Reduktion um 29 %. Bis 2030 können die Emissionen so um 12 % gesenkt werden.

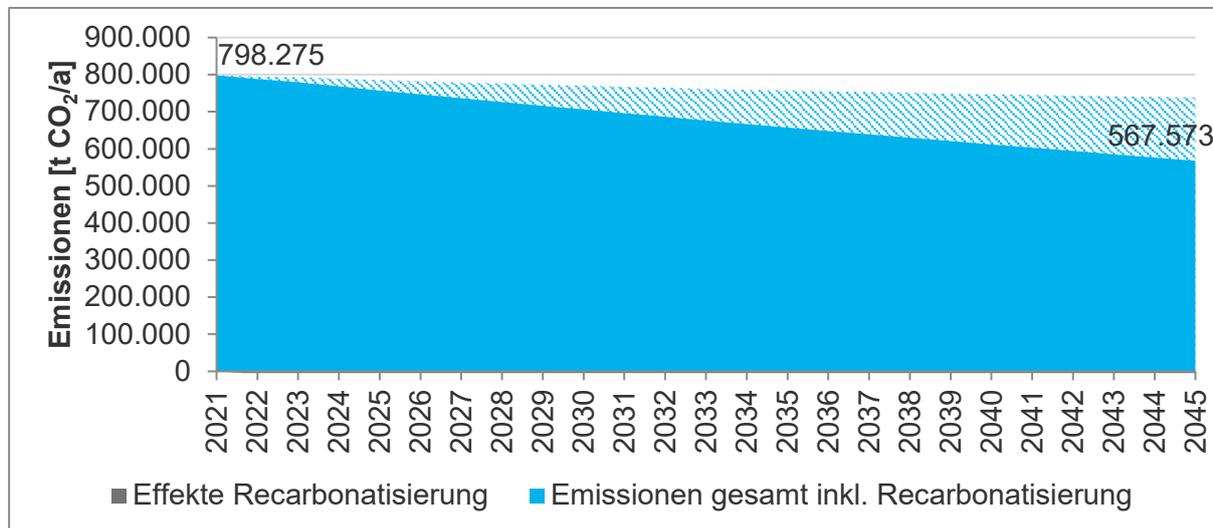


Abbildung 28: Entwicklung der CO₂-Emissionen bis 2045 im Referenzpfad inkl. Recarbonatisierungseffekten der produzierten Kalksandsteine im Zeitraum 2021 bis 2045 (Bezugsgröße: deutsche Kalksandsteinindustrie)

Recarbonatisierungseffekte

Wie bereits angedeutet, wirkt die Recarbonatisierung über den eigentlichen Zeithorizont der Studie hinaus. Da jedoch die gesamte Bilanz, der in diesem Zeitraum produzierten Steine, betrachtet werden soll, werden diese Effekte auch über 2045 hinaus dargestellt. Da der Prozess der Recarbonatisierung etwa 50 Jahre dauert, nehmen die bis 2045 produzierten Steine noch bis 2095 CO₂ aus der Umwelt auf.

Die vollständigen Effekte sind in Abbildung 29 dargestellt. Insgesamt können die produzierten Steine 8,9 Mio. t CO₂ binden. Bei der Gesamtmenge der verursachten Emissionen von 19,2 Mio. t CO₂ entspricht das rund 46 %.

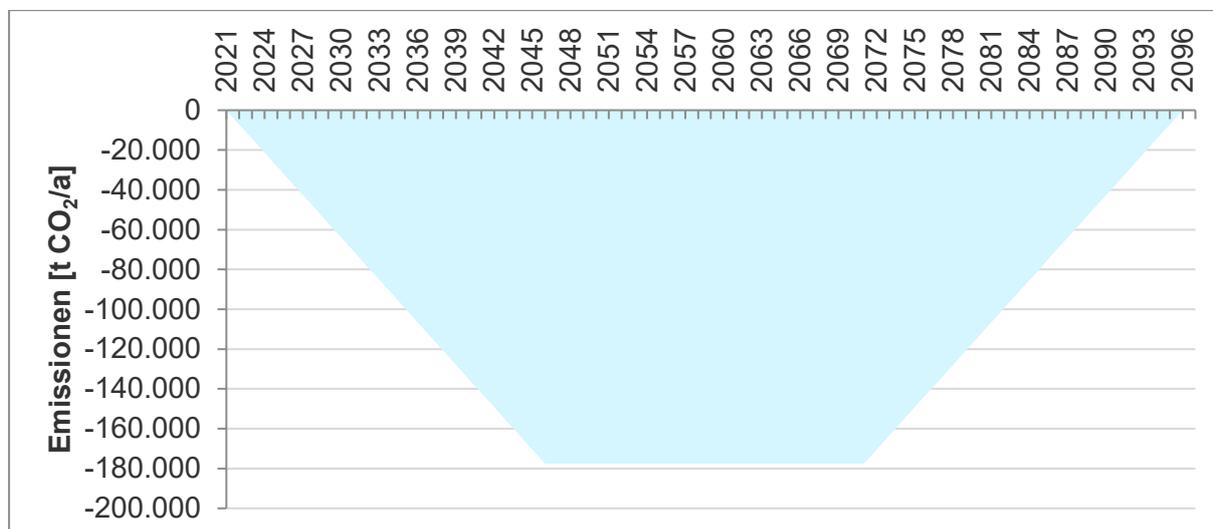


Abbildung 29: Recarbonatisierungseffekt der im Betrachtungszeitraum 2021 bis 2045 produzierten Kalksandsteine – Referenzpfad (Bezugsgröße: deutsche Kalksandsteinindustrie)

Tabelle 10: Ergebnisse zur Recarbonatisierung im Referenzpfad
(Bezugsgröße: deutsche Kalksandsteinindustrie)

Recarbonisierungseffekte der produzierten Mengen (2021–2045)	8,9 Mio. t CO ₂
Gesamte Emissionen im Zeitraum 2021 bis 2045	19,2 Mio. t CO ₂
Emissionen nach gesamten Recarbonisierungseffekt	10,3 Mio. t CO ₂
Anteil wieder aufgenommenen Emissionen durch Recarbonatisierung	46 %

6.4 Entwicklung der betrachteten Kosten

Auch im Referenzpfad steigen die betrachteten Kosten im Vergleich zum Basisjahr deutlich spürbar an, wie Abbildung 30 verdeutlicht. Trotz sinkender Emissionen steigen die jährlichen Kosten durch den steigenden CO₂-Preis insbesondere beim Bezug von Kalk. Auch der Anstieg der Kapitalkosten macht sich hier bemerkbar.

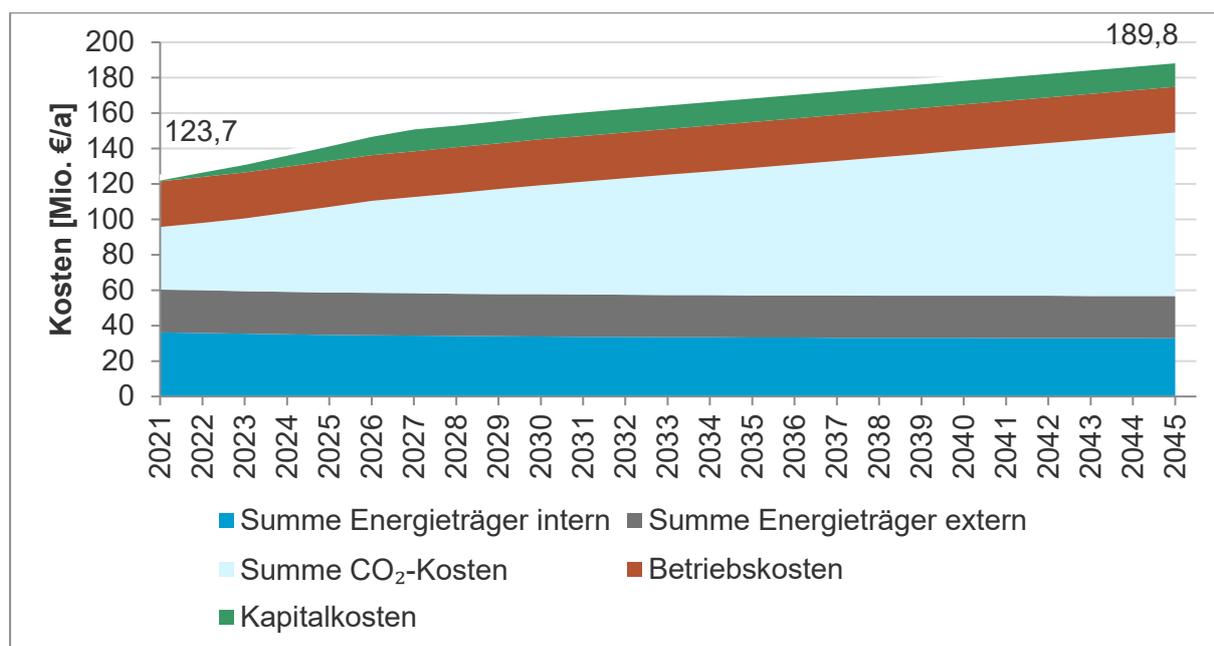


Abbildung 30: Entwicklung der Kosten im Referenzpfad (Bezugsgröße: deutsche Kalksandsteinindustrie)

Alle anderen Kosten bleiben weitgehend konstant. Insgesamt ergibt sich ein deutlicher Kostenanstieg.

Von Kosten im Basisjahr in Höhe von 123,7 Mio. EUR/a steigen die Kosten auf 189,8 Mio. EUR/a im Jahr 2045. Das entspricht einem Anstieg von ca. 54 %, wohl-gemerkt ohne Inflation. Die mittleren Kosten liegen im Betrachtungszeitraum bei 163 Mio. EUR/a. Insbesondere in den kommenden Jahren ist ein rapider Kostenanstieg v. a. auf Grund steigender CO₂-Preise abzusehen, danach wachsen die Kosten langsamer, aber stetig weiter.

Die angenommene Preisentwicklung der CO₂-Emissionen überwiegt die erzielten Kosteneinsparungen durch Minderungen bei weitem. Auch die steigenden Kapitalkosten durch die Investitionen in Effizienzmaßnahmen und Dampferzeugertausch tragen zu den

höheren Gesamtkosten bei. Dieser Anstieg kann durch den leichten Rückgang bei den Energiekosten nicht abgefangen werden. Die Betriebskosten bleiben im Referenzpfad konstant.

Die gesamten Investitionen liegen im Referenzpfad bei 237,5 Mio. EUR. Davon werden 53,2 Mio. EUR für den Dampferzeugertausch benötigt.

Abbildung 31 verzichtet im Vergleich zu Abbildung 30 auf die Darstellung von Kapital- und Betriebskosten und weist dafür neben den einzelnen Energieträgern die CO₂-Kosten getrennt nach den Scopes aus.

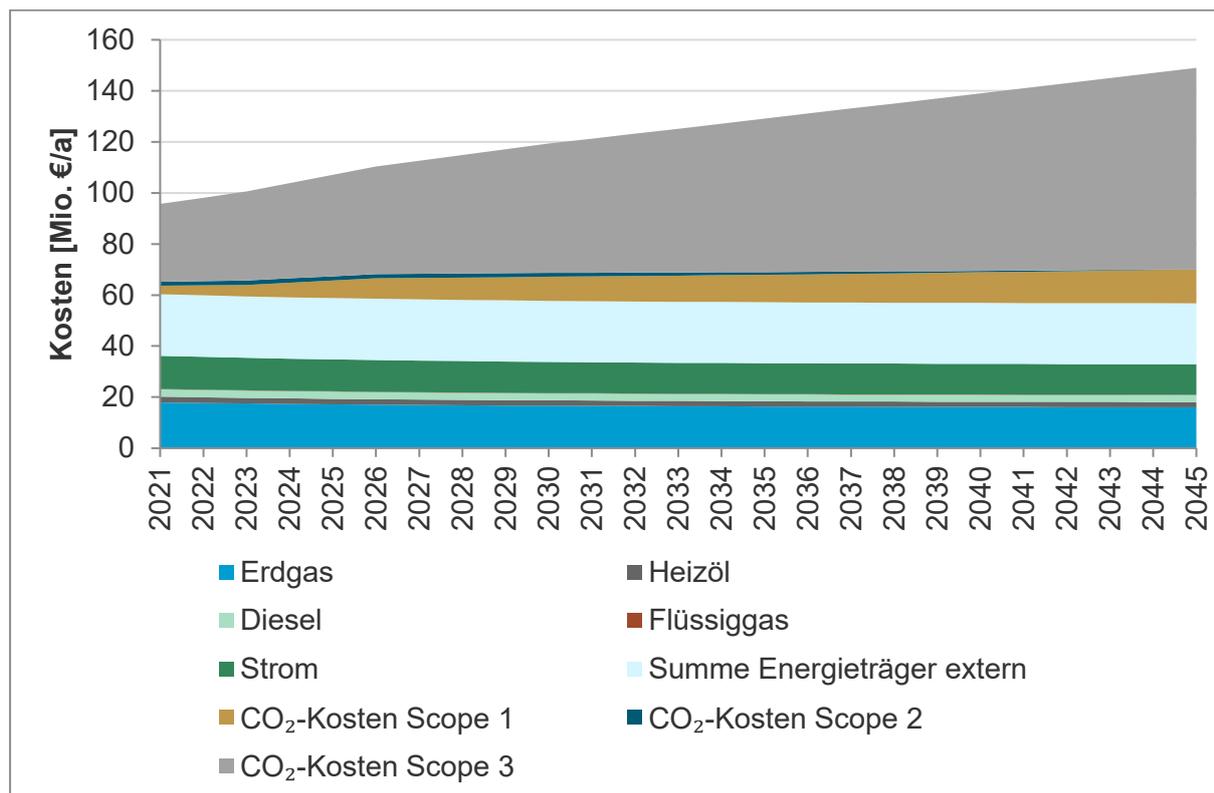


Abbildung 31: Entwicklung der energiebezogenen Kosten im Referenzpfad
(Bezugsgröße: deutsche Kalksandsteinindustrie)

Hier wird deutlich, dass der Anstieg der CO₂-Kosten und damit auch der Gesamtkosten, überwiegend auf den Scope 3 zurückzuführen ist. Zwar erfolgt auch in Scope 1, bedingt durch den deutlichen Anstieg der Preise im nEHS, ein rapides Wachstum der CO₂-Kosten. Aber die Kosten in Scope 3 überwiegen hier aus Gesamtsicht deutlich.

Betrachtet man in Abbildung 32 die Kosten exklusive der CO₂-Kosten für die Kalkherstellung, ergibt sich eine deutlich moderatere Entwicklung. Die Kosten steigen dann von 94,5 Mio. EUR/a auf 117,0 Mio. EUR/a an, was aber immer noch einem Anstieg von 24 % entspricht. Die mittleren Kosten liegen dann bei 112 Mio. EUR/a. Hier ist dann auch der Rückgang der Kosten für den Energieträgereinsatz in den Werken zu erkennen, aber der Effekt wird von den gestiegenen CO₂- und Kapitalkosten überlagert.

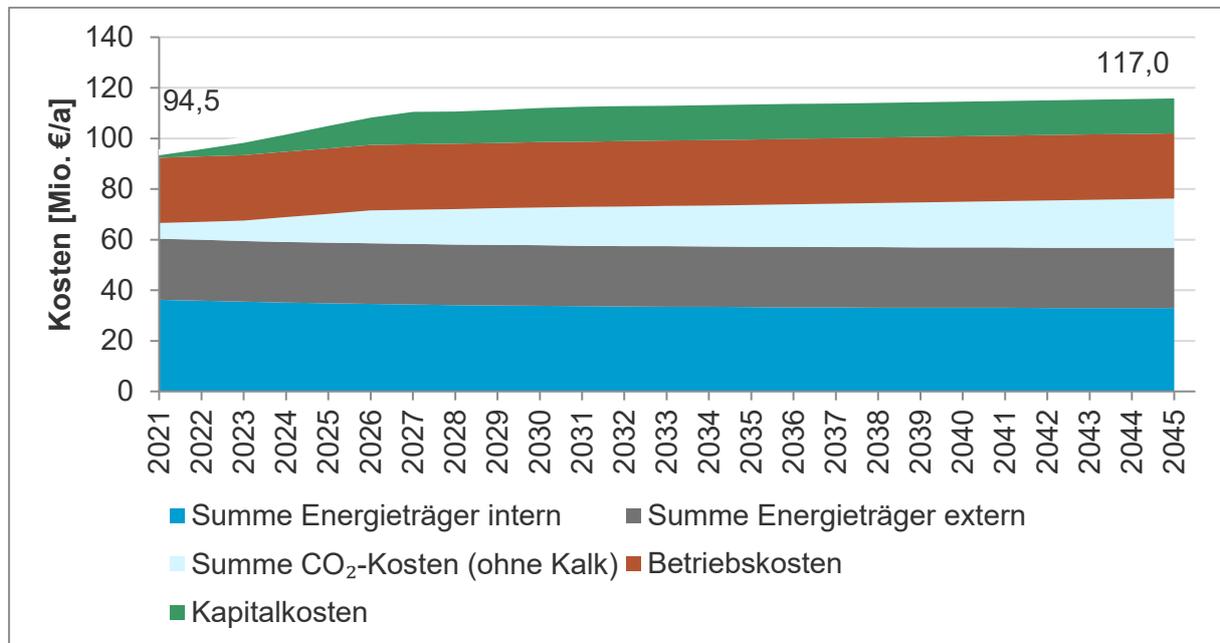


Abbildung 32: Entwicklung der Kosten im Referenzpfad - ohne CO₂-Kosten Kalk
(Bezugsgröße: deutsche Kalksandsteinindustrie)

6.5 Wesentliche Erkenntnisse

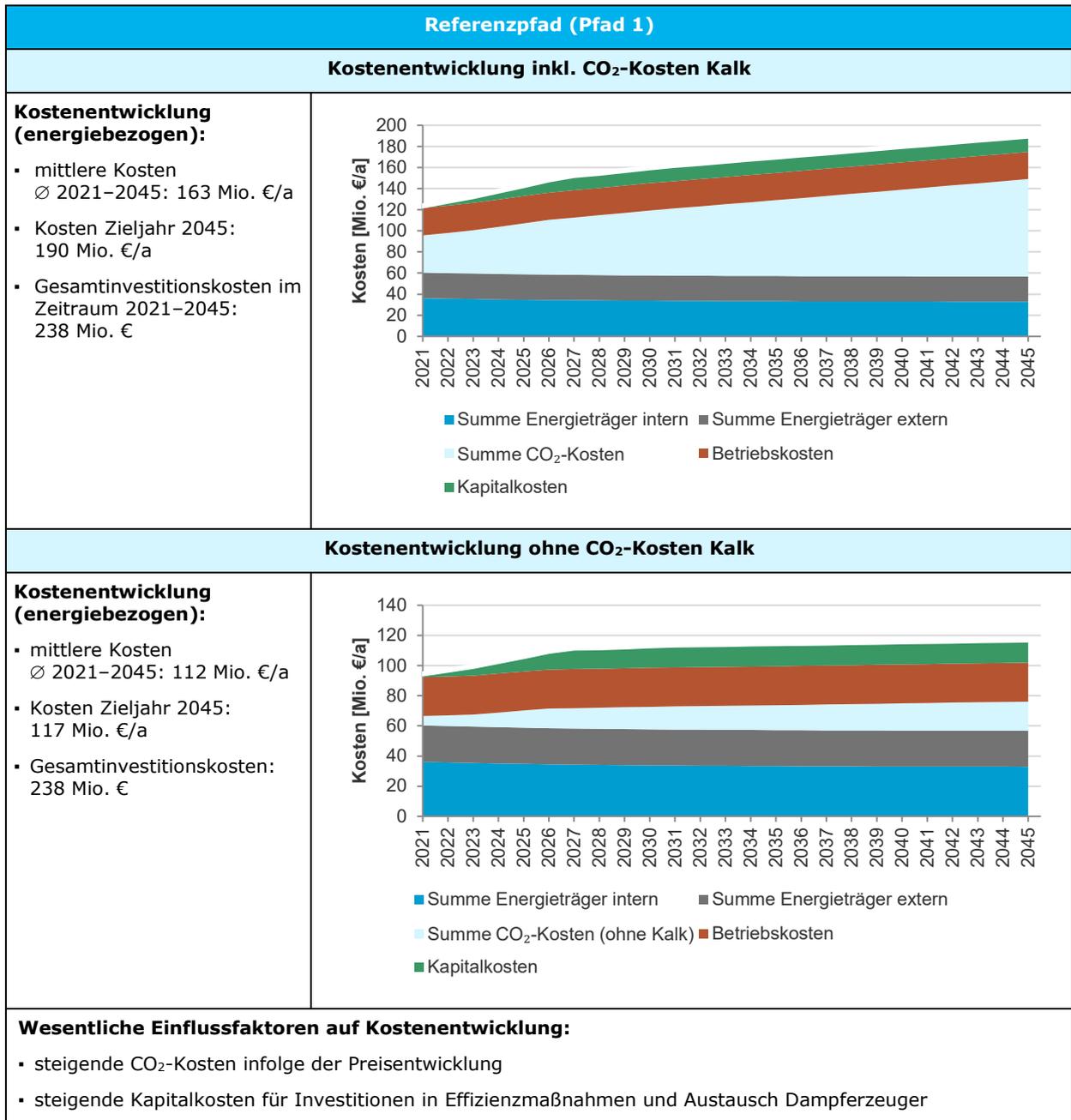
Insgesamt gelingt auch im Referenzpfad in Scope 1 und 2, also den Bereichen, die direkt von der Kalksandsteinindustrie verantwortet werden, ein beachtlicher Rückgang der Emissionen um rund 35 %. Bis 2030 sind bereits 17 % Minderung erreicht. Bei Betrachtung der gesamten Emissionen inklusive des Scopes 3 fällt die Minderung mit 8 % erheblich geringer aus. Haupttreiber der Minderungen sind sinkende Emissionsfaktoren und Effizienzgewinne in den Werken. Die Kosten steigen in diesem Pfad bereits massiv an, in erster Linie getrieben durch steigende CO₂-Preise, die sich vor allem beim Kalk auswirken. Der Preisanstieg überwiegt somit bei Weitem den Rückgang der Emissionen.

Die relevanten Kostenanstiege machen damit deutlich, dass auch wirtschaftlicher Handlungsdruck besteht, die Emissionen zu senken. Allerdings sorgt der rapide Anstieg in den nächsten Jahren auch für eine Einengung des finanziellen Spielraums der Industrie. Hier müssen geeignete Rahmenbedingungen geschaffen werden, damit die Branche höhere Beiträge, auch bereits bis 2030, leisten kann. Darüber hinaus zeigt sich, dass vor allem eine erhebliche Reduzierung der Vorkettenemissionen notwendig ist, um die Branche Richtung Klimaneutralität zu bewegen und erhebliche Kostenanstiege abzufedern.

6.6 Steckbrief Referenzpfad (Pfad 1)

Tabelle 11: Steckbrief Referenzpfad (Bezugsgröße: deutsche Kalksandsteinindustrie)

Referenzpfad (Pfad 1)	
Beschreibung Maßnahmen	<ul style="list-style-type: none"> kontinuierliche Effizienzsteigerung beim Einsatz der Energieträger (interner Einflussfaktor) Austausch aller Dampferzeuger durch effizientere erdgasbefeuerte Dampferzeuger Reduktion Emissionsfaktoren Strom und Erdgas (externer Einflussfaktor)
Emissionsentwicklung ohne Recarbonisierungseffekte	
Emissionsentwicklung bis 2030: <ul style="list-style-type: none"> Senkung auf 769 Tsd. t CO₂ Emissionsentwicklung bis 2045: <ul style="list-style-type: none"> Senkung auf 738 Tsd. t CO₂ 	
Emissionsentwicklung mit Recarbonisierungseffekten	
Emissionsentwicklung bis 2030: <ul style="list-style-type: none"> Senkung auf 706 Tsd. t CO₂ Emissionsentwicklung bis 2045: <ul style="list-style-type: none"> Senkung auf 568 Tsd. t CO₂ 	
Wesentliche Einflussfaktoren auf Emissionsentwicklung: <ul style="list-style-type: none"> Reduktion Emissionsfaktor Strom Reduktion Emissionsfaktor Erdgas Effizienzsteigerung beim Einsatz von Energieträgern 	



7 Pionierpfad (Pfad 2)

Der Pionierpfad baut auf den Annahmen des Referenzpfads auf, jedoch werden zusätzliche Anstrengungen unternommen, um die Emissionen der Branche zu reduzieren. Neben den bekannten allgemeinen Effizienzsteigerungen wird ab 2025 zusätzlich in die Digitalisierung der Werke zur Hebung weiterer Effizienzpotentiale investiert. Außerdem kommt eine Reihe weiterer Maßnahmen zum Tragen, um die Emissionen der Branche weiter abzusenken. In diesem Pfad wird betrachtet, wie sich die Emissionen bei ambitioniertem Engagement gegen den Klimawandel entwickeln, ohne die Wirtschaftlichkeit der Anlagen aus den Augen zu verlieren.

Aus heutiger Sicht sind allerdings entscheidende Reduktionsmaßnahmen in den Werken unter den getroffenen Annahmen nicht wirtschaftlich umsetzbar. Dennoch wird auch in diesem Pfad bereits davon ausgegangen, dass eine limitierte Anzahl solcher Maßnahmen umgesetzt wird. Neben den betrachteten Kosten- und Nutzenaspekten der Maßnahmen können weitere Faktoren sich positiv auf eine Investitionsentscheidung zugunsten der Umsetzung auswirken. Dazu gehören:

- Absicherung gegen weiter steigende Energie- und CO₂-Preise, durch Investitionen zur Reduzierung des Energieverbrauchs oder fossiler Energieträger;
- Höhere Zahlungsbereitschaft eines Teils der Kunden für klimafreundliche Produkte bis hin zur Erschließung von Nischenmärkten (Bauträger und Architekten mit besonders hohen Anforderungen an die Nachhaltigkeit der eingesetzten Baustoffe; Änderungen im öffentlichen Beschaffungsrecht mit Novelle des Klimaschutzgesetzes);
- Vortreiben von Innovationen, um wettbewerbsfähig zu bleiben.

Klimafreundliche Investitionen können sich daher lohnen, wenn Faktoren einbezogen werden, die im Rahmen dieser Roadmap nicht quantifiziert werden können. Im Rahmen von Pfad 2 wird daher berücksichtigt, dass einige „Pioniere“ derartige Entscheidungen treffen und entsprechende Maßnahmen umsetzen. Das Budget für derartige Investitionen ist allerdings begrenzt.



Abbildung 33: Produktionsstrasse in einem Kalksandsteinwerk; Bildquelle: © Bundesverband Kalksandsteinindustrie e.V.

7.1 Maßnahmen

Die Maßnahmen in den Werken sind auch im Pionierpfad mit Investitionen verbunden. Für die Effizienzmaßnahmen werden von 2021–2024 9,5 Mio. EUR/a und ab 2025 inklusive der zusätzlichen Digitalisierung 15,2 Mio. EUR/a veranschlagt. Zusätzlich werden spezifische Maßnahmen betrachtet. Da Pfad 2 einen auch unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten und derzeitigen Rahmenbedingungen realistischen Weg darstellen soll, werden für die oben beschriebenen Pioniermaßnahmen enge Budgetgrenzen gesetzt. Jährlich stehen hier 1,9 Mio. EUR zur Verfügung. Die Modellierung findet geeignete Maßnahmen, die im Pionierpfad unter den genannten Rahmenbedingungen umgesetzt werden. Durchschnittlich werden davon 1,5 Mio. EUR/a abgerufen, was insgesamt in Investitionen in spezifische Maßnahmen von 37,8 Mio. EUR/a im Betrachtungszeitraum resultiert.

Grundsätzlich besteht auch hier weiterhin die Bedingung, dass alle Dampferzeuger einmal im Betrachtungszeitraum ausgetauscht werden müssen. Im Gegensatz zum Referenzpfad sind allerdings bereits Brennstoffwechsel denkbar. Es müssen also nicht alle bestehenden Dampferzeuger durch einen neuen Erdgaskessel ersetzt werden. Dieser stellt allerdings unter den gegebenen Bedingungen die wirtschaftlichste der betrachteten Alternativen dar, weshalb er auch im Pionierpfad überwiegend zum Zug kommt.

- Jährlich wurden nach der Modellierung Investitionen in der Höhe von durchschnittlich 13,7 Mio. EUR getätigt. Dies umfasst sämtliche Effizienzmaßnahmen, Digitalisierung und spezifische Maßnahmen.
- Mehrinvestition ggü. Referenzpfad: 4,2 Mio. EUR/a

Insgesamt werden im Referenzpfad bis 2045 Investition in Höhe von 341,8 Mio. EUR getätigt, um die dortigen Emissionsminderungen herbeizuführen.

Entwicklungen im Kalksandsteinwerk

Um die Emissionsreduktion in den Werken zu beschleunigen, wird der Bezug von Grünstrom linear ausgebaut, sodass bereits 2040 und damit fünf Jahre früher als im deutschen Strommix rein regenerativ erzeugter Strom bezogen wird. Zusätzlich werden über die Modellierung spezifische Maßnahmen in den Werken umgesetzt:

- 66 neue erdgasbefeuerte Dampferzeuger bis 2045
- 10 Wasserstoff befeuerte Dampferzeuger ab 2035 (siehe auch Abbildung 34)
- Wärmemanagementmaßnahmen bis 2034 für alle Werke

Abbildung 34 zeigt den Stand der Dampferzeugertechnik in den Werken im Verlauf der Zeit. Während zu Beginn ausschließlich neue Erdgaskessel verbaut werden, kommen ab Mitte der 2030er Jahre auch Dampferzeuger mit Wasserstoff zum Einsatz. Weitere Alternativen spielen im Pionierpfad keine Rolle.

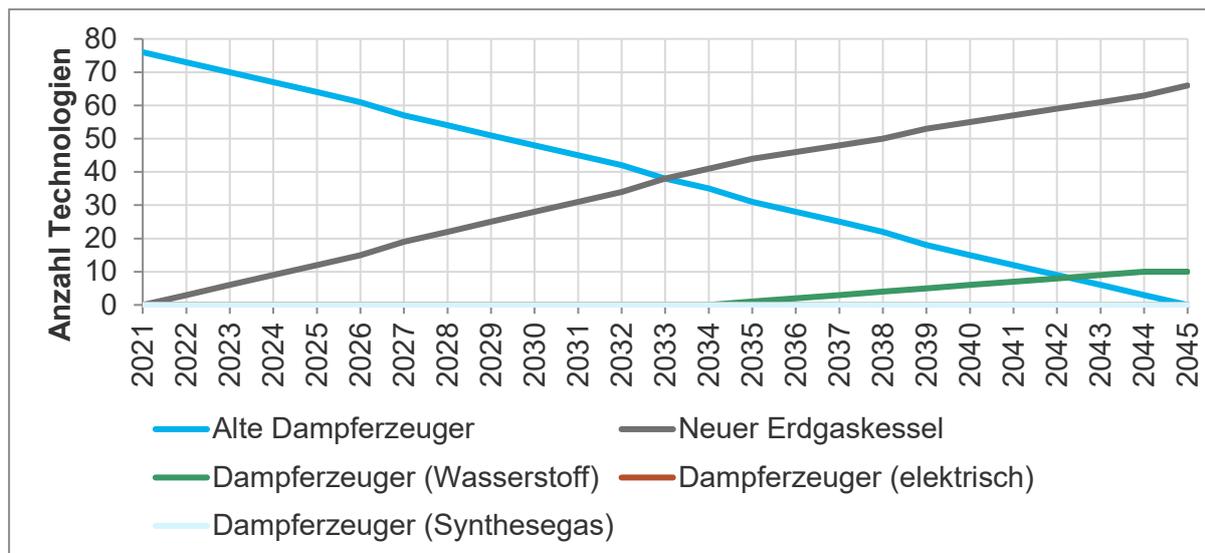


Abbildung 34: Modellierter Austausch der Dampferzeuger im Pionierpfad

Kalkgehalt im Kalksandstein

Um auch in der Vorkette Emissionen einzusparen, werden im Pionierpfad Bestrebungen umgesetzt, den Kalkgehalt in den Steinen zu reduzieren. Hierfür wird noch Forschungs- und Entwicklungsbedarf gesehen, der im Rahmen der Roadmap nicht quantifiziert wird. Allerdings wird berücksichtigt, dass die Minderung erst zu einem späteren Zeitpunkt, hier 2026, beginnt. Ab dann wird der Kalkgehalt in den Steinen linear von 7 % auf 6 % abgesenkt. Neben der nötigen Forschung bedarf es hier auch der zügigen Anpassung von Baunormen und anderer rechtlicher Vorschriften, damit die Minderung umgesetzt werden kann. Aktuell übererfüllen die Steine oftmals die tatsächlichen Anforderungen für ihren Einsatzzweck bei weitem. Hier muss ein Umdenken bei den Bauträgern erfolgen.

Emissionsfaktor Kalk

Im Pionierpfad wird angenommen, dass die Kalkindustrie erhebliche Anstrengungen zur Reduktion ihrer Emissionen unternimmt. Es wird davon ausgegangen, dass es ihr gelingt, ihre gesamten brennstoffbedingten Emissionen bis 2045 auf null zu reduzieren. Dies entspricht in etwa 1/3 der Emissionen der Industrie und der ersten Säule der von der Kalkindustrie identifizierten Minderungsmaßnahmen²².

Transport und Maschinen im Sandabbau

Bereits im Pionierpfad wird davon ausgegangen, dass die Mobilitätswende im Verkehrssektor immer weiter voranschreitet und mittelfristig auch im Transportwesen auf der Straße Veränderungen bewirkt. Daher wird angenommen, dass ein Teil des LKW-Transports im Laufe des Betrachtungszeitraums elektrifiziert wird. Ab 2031 steigt der Anteil elektrischer LKWs linear auf 50 % bis 2045. LKWs mit Brennstoffzelle kommen in diesem Pfad noch nicht zum Einsatz. Im Sandabbau werden noch keine Maßnahmen ergriffen.

²² Quelle: BVK (2020)

7.2 Entwicklung des Energieeinsatzes

Der Pionierpfad führt zu merklichen Veränderungen im Energieeinsatz der Kalksandsteinwerke über die bekannten Veränderungen aus dem Referenzpfad hinaus. Diese Entwicklung ist in Abbildung 35 aufgeschlüsselt nach den Energieträgern dargestellt.

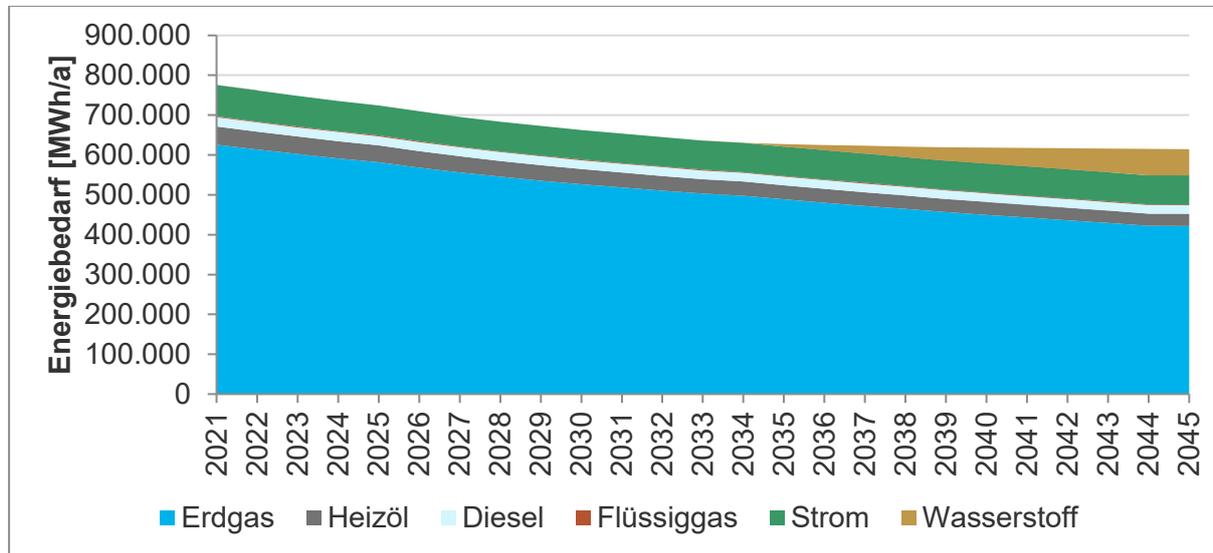


Abbildung 35: Entwicklung des Energieträgereinsatzes der Kalksandsteinwerke bis 2045 im Pionierpfad (Bezugsgröße: deutsche Kalksandsteinindustrie)

Hier ist bis Mitte der 2030er Jahre ein deutlicher Rückgang des gesamten Energieeinsatzes zu vermerken. Durch die zusätzlichen Wärmemanagementmaßnahmen kann der Energieeinsatz im Betrachtungszeitraum von 775 GWh/a auf 615 GWh/a verringert werden. Dies entspricht einem Rückgang von 21 %. Bis 2030 sind bereits 15 % erreicht. Ab 2035 wird dann zunehmend Wasserstoff in einigen Werken eingesetzt, wodurch der Erdgaseinsatz weiter zurückgedrängt werden kann.



Abbildung 36: Härtekessel; Bildquelle: © Bundesverband Kalksandsteinindustrie e.V.

Aber nicht nur in den Werken, sondern auch beim externen Energieeinsatz sind Minderungen zu verzeichnen. Hier ist der Rückgang sogar noch deutlicher. Dieser Rückgang ist vor allem auf die Elektrifizierung des Transports ab 2030 zurückzuführen. Durch die deutlich effizienteren Motoren können hier relevante Energieeinsparungen erzielt werden. Der Energiebedarf 2045 liegt in diesem Bereich damit sogar 28 % unter dem Niveau von 2021.

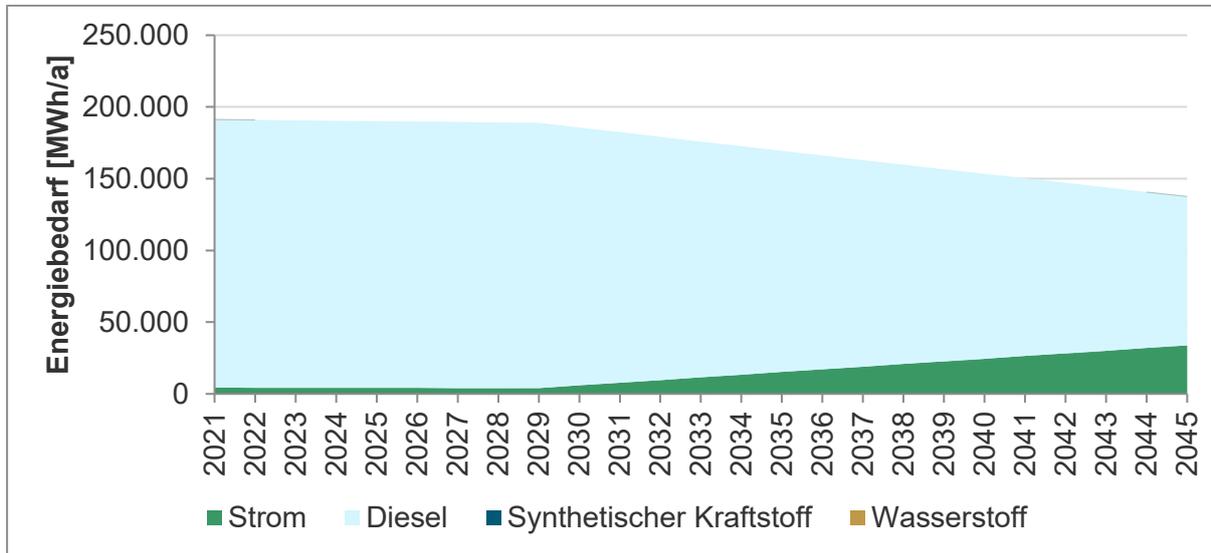


Abbildung 37: Entwicklung des Energieträgereinsatzes Transport und externer Sandabbau bis 2045 im Pionierpfad (Bezugsgröße: deutsche Kalksandsteinindustrie)

7.3 Entwicklung der CO₂-Emissionen

Dank der beschriebenen Maßnahmen gelingen der Kalksandsteinindustrie relevante Emissionsminderungen im Pionierpfad. Diese werden nun in der bekannten Unterteilung weiter betrachtet.

Gesamte Emissionen ohne Recarbonatisierungseffekte

Die gesamten ausgestoßenen Emissionen der Branche können durch oben genannte Maßnahmen um 45 % auf 442 kt CO₂ gemindert werden. Somit können 2045 rund zusätzliche 296 kt CO₂ ggü. dem Referenzpfad eingespart werden. Bis 2030 erfolgt eine Reduktion um 18 % ausgehend vom Basisjahr. Anders als im Referenzpfad sinken im Pionierpfad auch die Scope 3-Emissionen in relevantem Umfang. Dennoch dominieren diese Emissionen weiterhin das Gesamtbild (siehe Abbildung 38) und stehen auch 2045 noch für über 80 % der betrachteten Emissionen.

Die Scope 2-Emissionen verschwinden durch den vorgezogenen Bezug von Grünstrom bis 2040 vollständig. Auch davor sind sie bereits von untergeordneter Bedeutung.

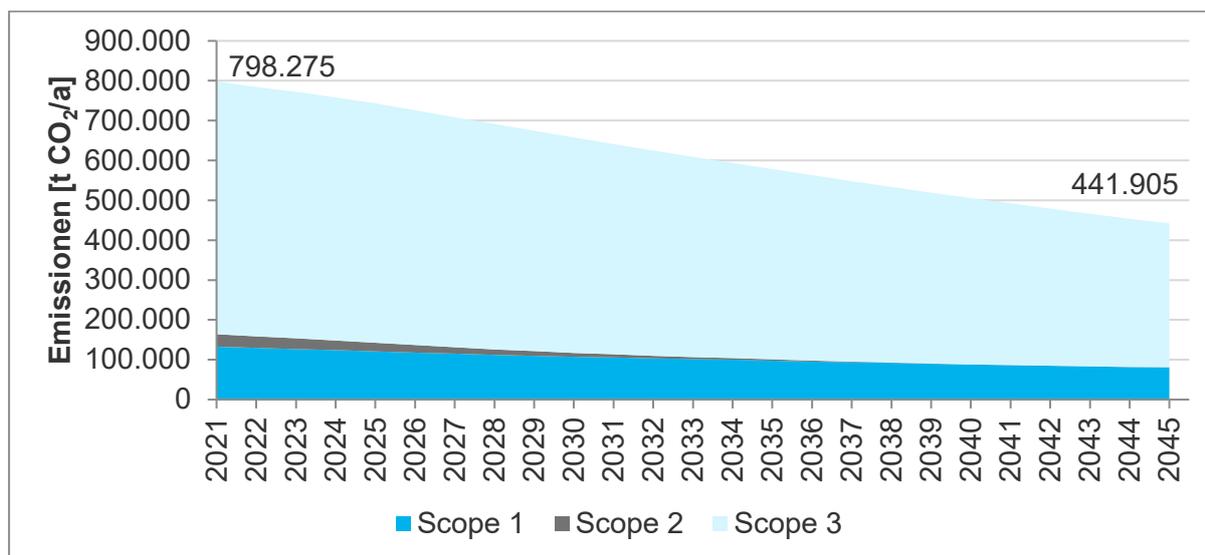


Abbildung 38: Entwicklung der CO₂-Emissionen bis 2045 im Pionierpfad
(Bezugsgröße: deutsche Kalksandsteinindustrie)

Scope 1- und Scope 2-Emissionen

Beim Blick auf die Emissionen der Kalksandsteinwerke in Abbildung 39 bleibt Erdgas, wenig überraschend, weiterhin tonangebend. Dennoch gelingt bis 2045 eine Reduktion der Emissionen um die Hälfte auf 81 kt CO₂. Die Gründe dafür sind vielfältig. Vor allem in den ersten Jahren schlagen die Effizienzsteigerungen bei allen eingesetzten Energieträgern zu Buche. Der Effekt wird durch die zunehmende Digitalisierung gegenüber dem Referenzpfad noch verstärkt. Bei Erdgas und Heizöl machen sich darüber hinaus bis 2035 die Verbesserungen im Wärmemanagement der Werke bemerkbar. Danach sorgt der Einsatz von Wasserstoff in der Dampferzeugung bei diesen beiden Energieträgern weiter für einen spürbaren Rückgang. Der kontinuierliche Ausbau des Grünstrombezugs führt darüber hinaus zu einer raschen Minderung der strombedingten Emissionen, die bereits in den 2030er Jahren kaum mehr zu Buche schlagen. Abgesehen vom Strom reicht die Reduzierung der Emissionen je Energieträger von 7 % (Diesel) bis 41 % (Erdgas). Durch den begründeten Fokus auf die Wärmebereitstellung und -nutzung ist die Reduktion bei den dafür eingesetzten Energieträgern am größten, bei Heizöl werden hier immerhin noch 33 % eingespart, was ausschließlich auf Maßnahmen in den Werken zurückzuführen ist.

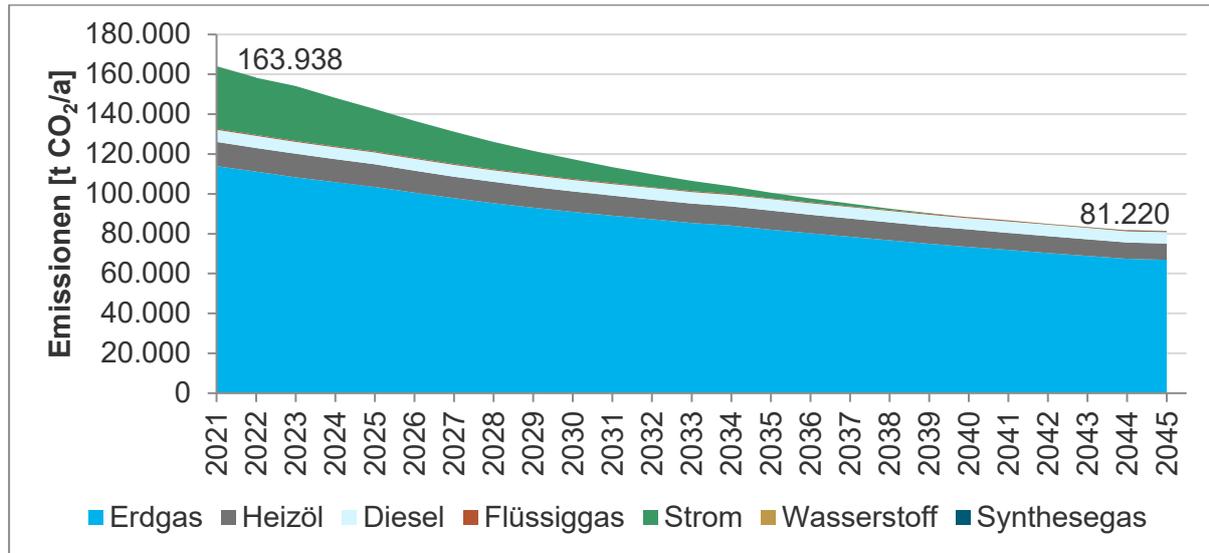


Abbildung 39: Entwicklung der CO₂-Emissionen aus Scope 1 und Scope 2 bis 2045 im Pionierpfad (Bezugsgröße: deutsche Kalksandsteinindustrie)

Mit Blick auf die wichtigen 2030er-Ziele leistet die Kalksandsteinindustrie hier einen relevanten Beitrag und reduziert ihre Emissionen vom heutigen Niveau aus um 28 % auf 117 kt CO₂.

Scope 3-Emissionen

Auch die Scope 3-Emissionen sinken im Pionierpfad bereits sehr deutlich. Ausgehend von 634 kt CO₂ erfolgt eine Minderung auf 361 kt CO₂ bis 2045. Maßgeblicher Treiber dafür ist die Reduzierung der Vorkettenemissionen Kalk. Dies wird sowohl durch den geringeren Kalkeinsatz in den Steinen als auch den sinkenden Emissionsfaktor für den Kalk erreicht. Die Kalksandsteinindustrie trägt damit auch durch ihr eigenes Handeln zur Senkung dieser Emissionen relevant bei.

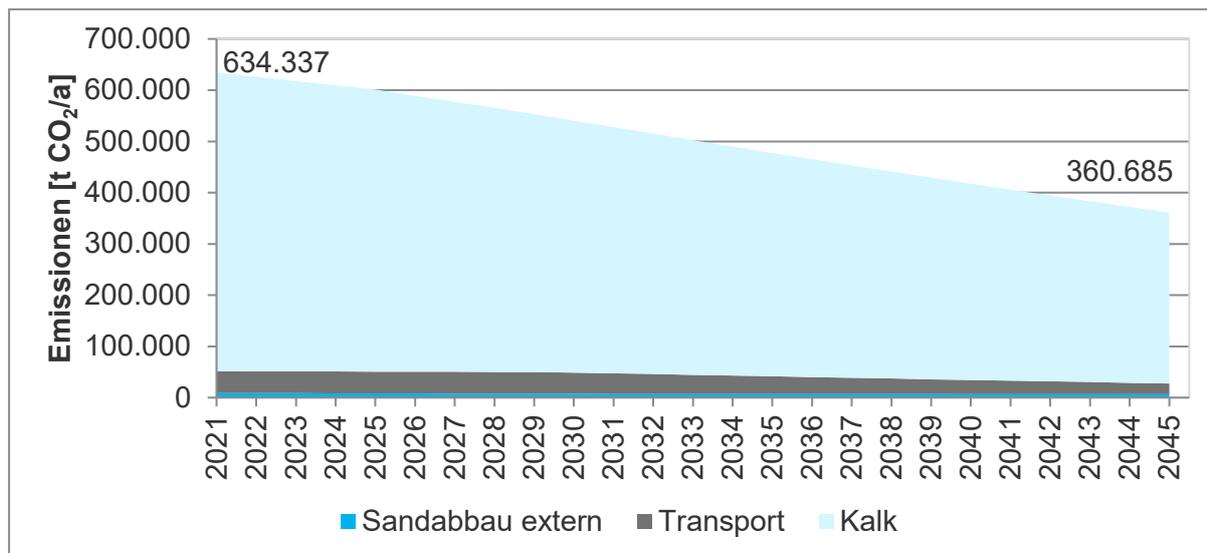


Abbildung 40: Entwicklung der CO₂-Emissionen aus Scope 3 bis 2045 im Pionierpfad (Bezugsgröße: deutsche Kalksandsteinindustrie)

Neben den Emissionen aus dem Kalk tragen auch Entwicklungen im Transportwesen zum Rückgang der Scope 3-Emissionen bei. Damit dieser Beitrag deutlicher wird, sind die Scope 3-Emissionen in Abbildung 41 noch einmal ohne kalkbedingte Emissionen dargestellt. Auch hier zeigt sich ein deutlicher Rückgang, bedingt durch die Teilelektrifizierung des Transports. Dort kommen gleich zwei Effekte zum Tragen. Zum einen haben die Elektromotoren einen deutlich höheren Wirkungsgrad als traditionelle Dieselmotoren, weshalb der Energieeinsatz sinkt. Zum anderen ist der Emissionsfaktor für Strom, auch bedingt durch den Einsatz von Grünstrom, zum Zeitpunkt der Umstellung bereits günstiger als der von Diesel. Insgesamt können die Transportemissionen um 50 % gesenkt werden.

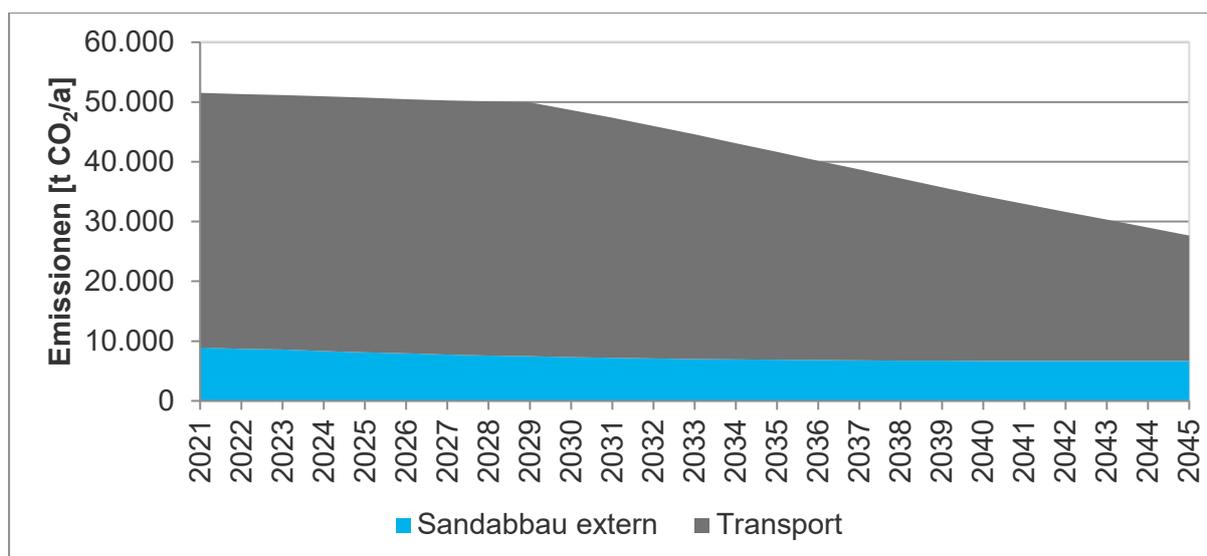


Abbildung 41: Entwicklung der CO₂-Emissionen aus Scope 3 ohne Kalk bis 2045 im Pionierpfad (Bezugsgröße: deutsche Kalksandsteinindustrie)

Auch im Sandabbau werden die strombedingten Emissionen bis 2040 reduziert, wodurch Einsparungen von etwa 25 % erzielt werden. Sämtliche in Abbildung 41 nach 2040 ausgewiesenen Emissionen beruhen dann noch auf dem Einsatz von Diesel in den beiden Bereichen.

Gesamte Emissionen mit Recarbonatisierungseffekten

Auch im Pionierpfad trägt die Recarbonatisierung noch wesentlich dazu bei, die Emissionslast der Steine zu verringern. Für das Jahr 2045 ergeben sich unter Berücksichtigung dieser Effekte noch Emissionen von 282 kt CO₂. Dies entspricht einer Minderung von bemerkenswerten 65 % gegenüber dem Basiswert aus dem Jahr 2021.

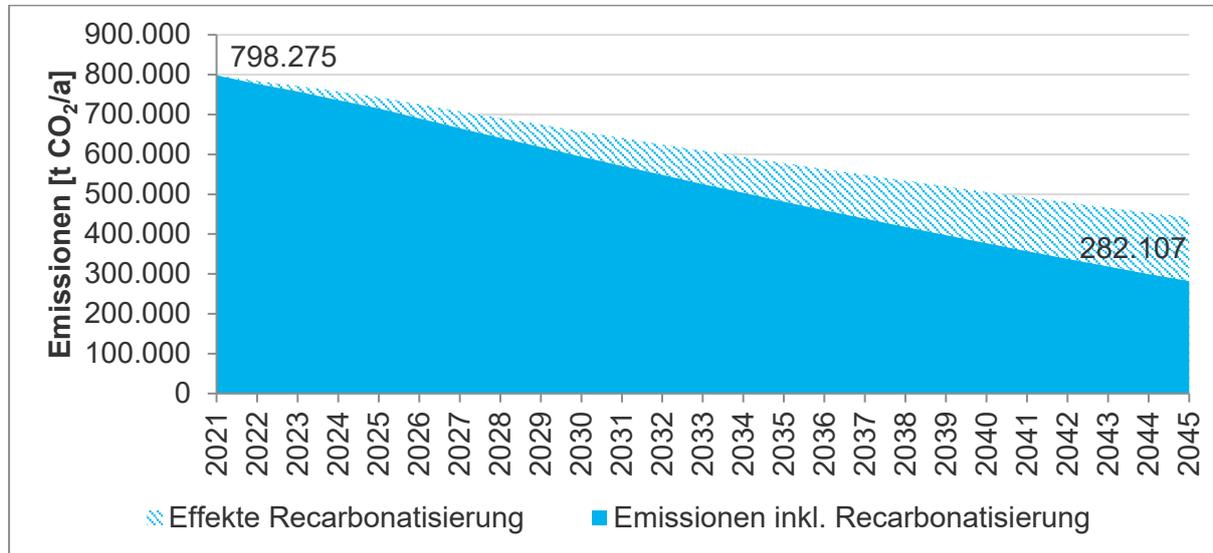


Abbildung 42: Entwicklung der CO₂-Emissionen bis 2045 im Pionierpfad inkl. Recarbonatisierungseffekte der produzierten Kalksandsteine im Zeitraum 2021 bis 2045 (Bezugsgröße: deutsche Kalksandsteinindustrie)

Recarbonatisierungseffekte

Analog zum Referenzpfad nehmen die im Betrachtungszeitraum produzierten Steine auch nach 2045 noch CO₂ auf. Insgesamt werden so 8,2 Mio. t CO₂ wieder in den Steinen gespeichert. Bei der Produktion der Steine im betrachteten Zeitrahmen entstehen im Pionierpfad insgesamt 15,4 Mio. t CO₂. Mehr als die Hälfte davon wird somit wieder in den Kalksandsteinen eingelagert und der Umwelt dauerhaft entzogen.

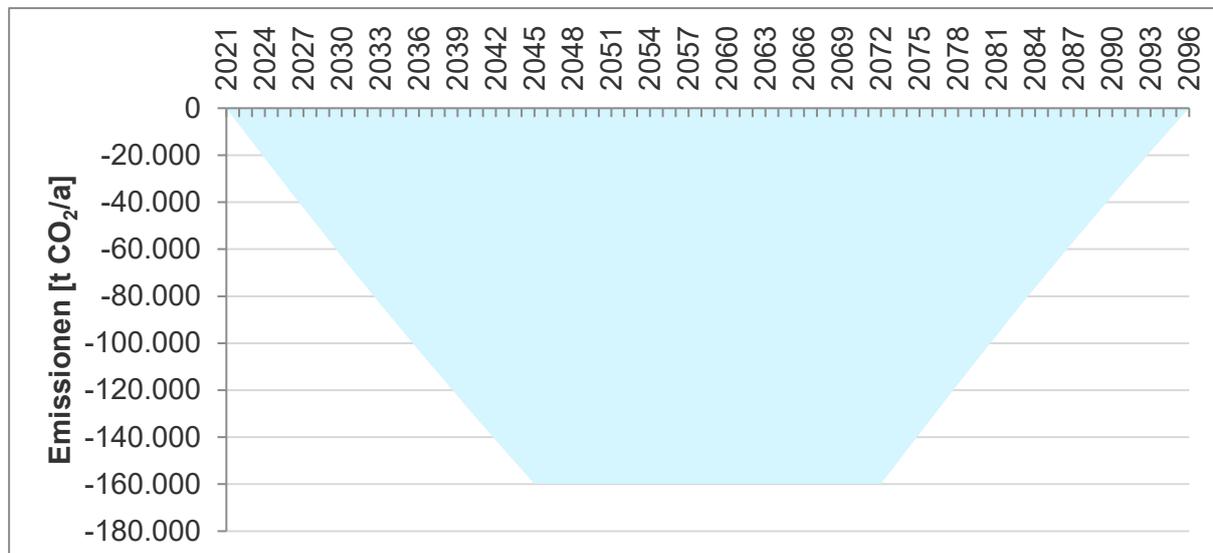


Abbildung 43: Recarbonatisierungseffekt der im Betrachtungszeitraum 2021 bis 2045 produzierten Kalksandsteine – Pionierpfad (Bezugsgröße: deutsche Kalksandsteinindustrie)

Tabelle 12: Ergebnisse zur Recarbonatisierung im Pionierpfad
(Bezugsgröße: deutsche Kalksandsteinindustrie)

Recarbonisierungseffekte der produzierten Mengen (2021-2045)	8,1 Mio. t CO ₂
Gesamte Emissionen im Zeitraum 2021 bis 2045	15,4 Mio. t CO ₂
Emissionen nach gesamten Recarbonisierungseffekt	7,2 Mio. t CO ₂
Anteil wieder aufgenommenen Emissionen durch Recarbonatisierung	53 %

7.4 Entwicklung der energiebezogenen Kosten

Auch der Pionierpfad führt durch die gegebenen Rahmenbedingungen und die ergriffenen Maßnahmen zu einem relevanten Anstieg der betrachteten Gesamtkosten. Haupttreiber hierfür sind vor allem steigende Kapital- und – trotz der erreichten Minderungen – CO₂-Kosten. Insgesamt steigen die Kosten von 123 Mio. EUR/a auf 164 Mio. EUR/a. Dies entspricht einem Anstieg um etwa ein Drittel. Besonders in den ersten zehn Jahren kommt ein rapider Kostenanstieg auf die Branche zu. Daher liegen auch die mittleren Kosten im Betrachtungszeitraum schon bei 154 Mio. EUR/a.

Allerdings liegen die Gesamtkosten damit 2045 um rund 26 Mio. EUR/a unter den Kosten des Referenzpfads. Dies ist bedingt durch die deutlich geringeren CO₂-Kosten infolge der erheblichen Einsparungen in allen Scopes. Im Referenzpfad machen die CO₂-Kosten noch rund 50 % der Kosten aus, im Pionierpfad nur noch 34 %. Jedoch gilt dieses Ergebnis nur unter der Annahme, dass die Emissionsminderungen in der Kalkherstellung nicht zu einer deutlichen Mehrbelastung der Abnehmer führen.

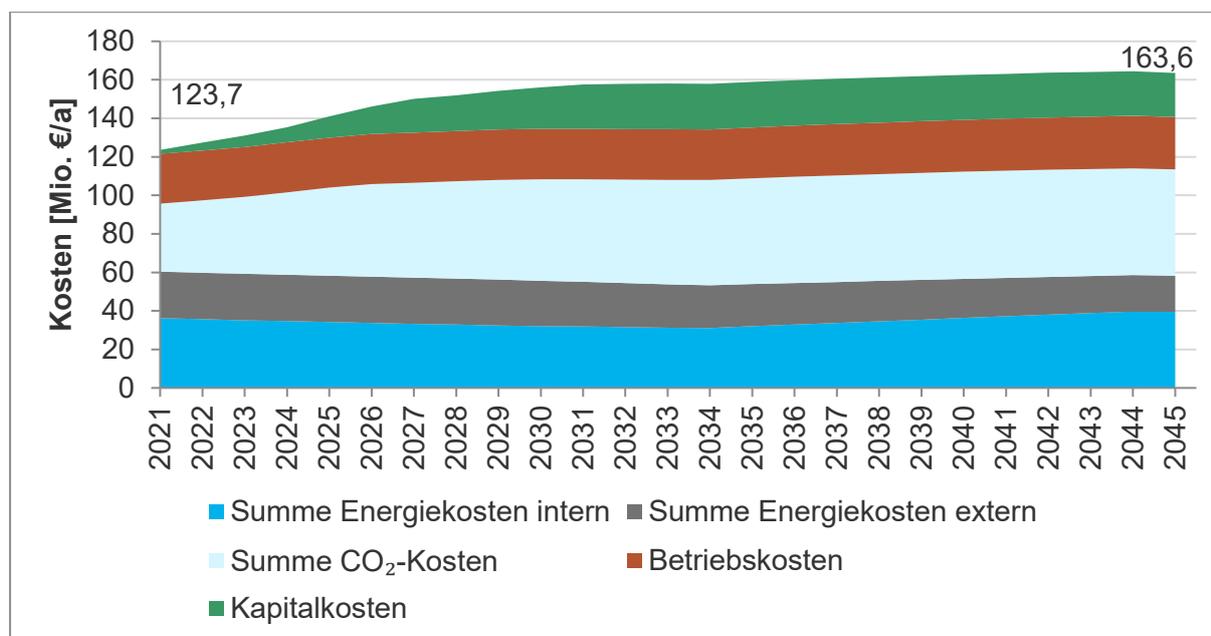


Abbildung 44: Entwicklung der Kosten im Pionierpfad (Bezugsgröße: deutsche Kalksandsteinindustrie)

Interessant ist auch der Verlauf der internen Energiekosten in Abbildung 44. Bedingt durch Effizienzgewinne und Einsparmaßnahmen sinken diese bis 2035 kontinuierlich ab. Ab dort macht sich dann der teilweise Wechsel auf den teuren Energieträger Wasserstoff

in der Dampferzeugung bemerkbar, welcher auch in Abbildung 45 gut erkennbar ist. Insgesamt steigen diese Energiekosten im Verlauf nur moderat an. Bei den externen Energiekosten findet über den zeitlichen Verlauf sogar ein kontinuierlicher Rückgang statt, obwohl das Transportvolumen 2045 zur Hälfte elektrifiziert bewältigt wird und damit auf den im Vergleich zu Diesel teureren Energieträger Strom umgestellt wurde.

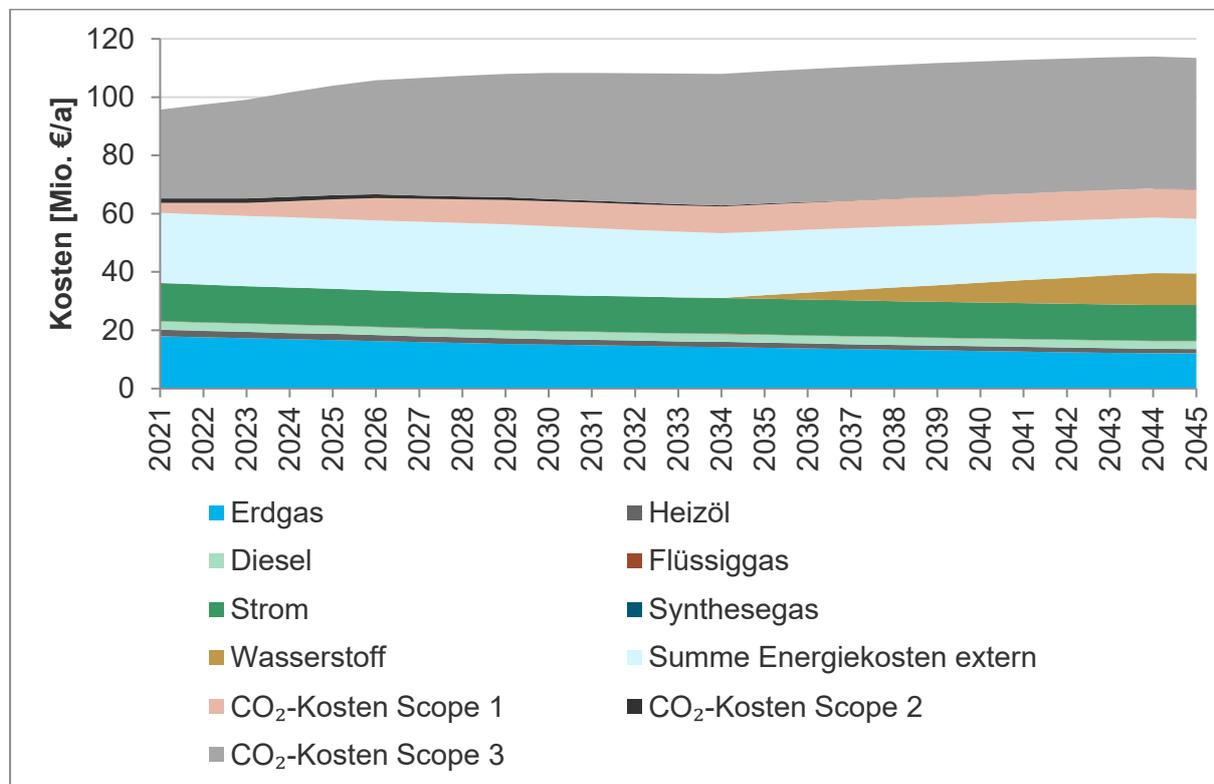


Abbildung 45: Entwicklung der energiebezogenen Kosten im Pionierpfad (Bezugsgröße: deutsche Kalksandsteinindustrie)

Abbildung 45 zeigt anschaulich die abnehmende Tendenz bei den eingesetzten Energieträgern, ausgenommen Wasserstoff. Die direkten CO₂-Kosten in den Werken steigen trotz der erheblichen Einsparungen stark an. Auch hier überwiegt also der Preisanstieg noch die Emissionsminderungen deutlich. Überlagert wird das allerdings noch immer vom Anstieg der Kosten für die Scope 3-Emissionen, die auch in diesem Pfad für eine erhebliche Belastung der Branche sorgen.

Betrachtet man in Abbildung 46 die Entwicklung der Kosten ohne CO₂-Kosten für Kalk, so ändert sich das Bild im Verhältnis zum Referenzpfad.

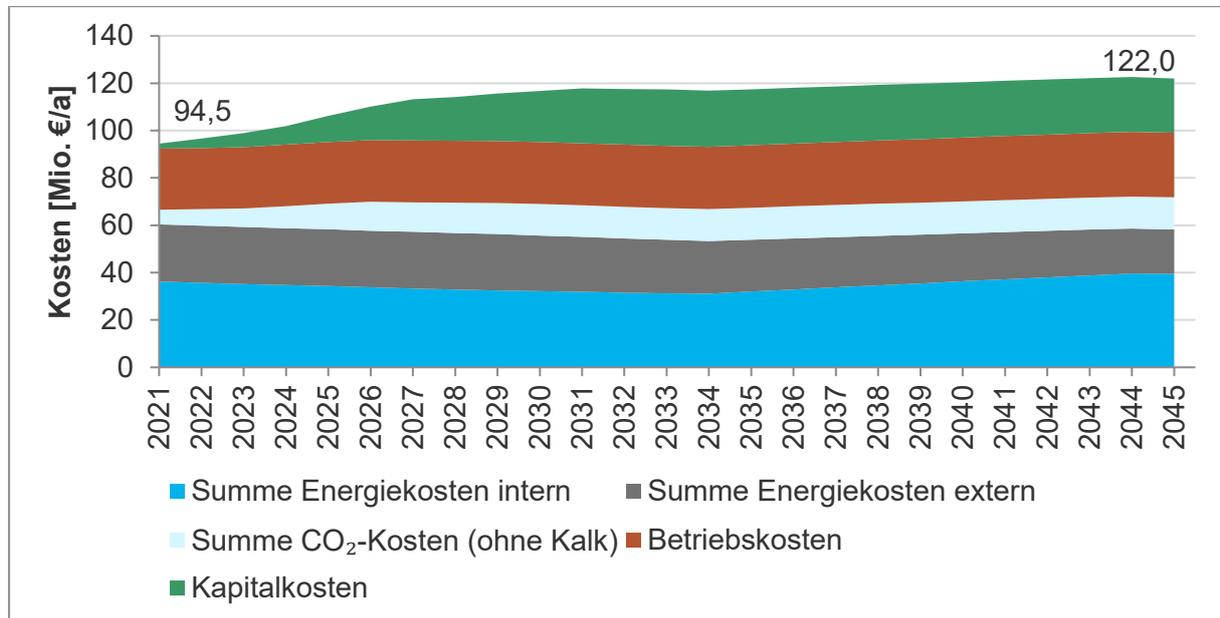


Abbildung 46: Entwicklung der Kosten im Pionierpfad – ohne CO₂-Kosten Kalk (Bezugsgröße: deutsche Kalksandsteinindustrie)

Von ursprünglich etwa 95 Mio. EUR/a steigt das Kostenniveau auf rund 122 Mio. EUR/a an. Dies entspricht einem Anstieg von 29 %. Die Mehrkosten am Ende des Betrachtungszeitraums gegenüber dem Referenzpfad betragen bei diesem Fokus moderate 5 Mio. EUR/a. Aber die direkten Kosten für die Kalksandsteinindustrie steigen damit im Verhältnis zum Referenzpfad doch an. Ohne den Anteil Kalk machen die CO₂-Kosten nur noch 8 % der betrachteten Kosten 2045 aus und sind daher intern von deutlich geringerer Bedeutung. Die mittleren Kosten liegen bei 114 Mio. EUR/a und auch hier ist im ersten Jahrzehnt ein beschleunigter Anstieg auszumachen.



Abbildung 47: Kalksandsteine nehmen im Laufe ihrer Lebenszeit CO₂ aus ihrer Umgebung auf und tragen erheblich zur Senkung von CO₂-Emissionen bei; Bildquelle: © Bundesverband Kalksandsteinindustrie e.V

7.5 Sensitivitäten

Die Entwicklung von Kosten und Emissionen in Pfad 2 sowie Pfad 3 hängt stark von den getroffenen Annahmen (u. a. Energie- und CO₂-Preisen) ab. Externe Rahmenbedingungen sind schwer vorhersehbar und können in der Realität von den Annahmen der Studie abweichen. Daher wird in diesem Kapitel betrachtet, welche Änderungen sich ergeben, wenn bestimmte Parameter variieren. Daraus lassen sich auch Indikationen ableiten, welche Rahmenbedingungen sich ändern müssen, um Emissionsminderung zu fördern.

Maßgeblich für die CO₂-Entwicklungen in Pfad 2 ist das definierte Investitionsbudget für gezielte Minderungsmaßnahmen. Welche Maßnahmen umgesetzt werden, ergibt sich aus den Vermeidungskosten der in Frage kommenden Maßnahme im betrachteten Jahr, wie bereits in Kapitel 4.6 beschrieben. Die relevanten neuen Maßnahmen sind der Dampferzeuger (Wasserstoff, elektrisch) und das Wärmemanagement. Deren Vermeidungskosten sind in Abbildung 48 zu sehen.

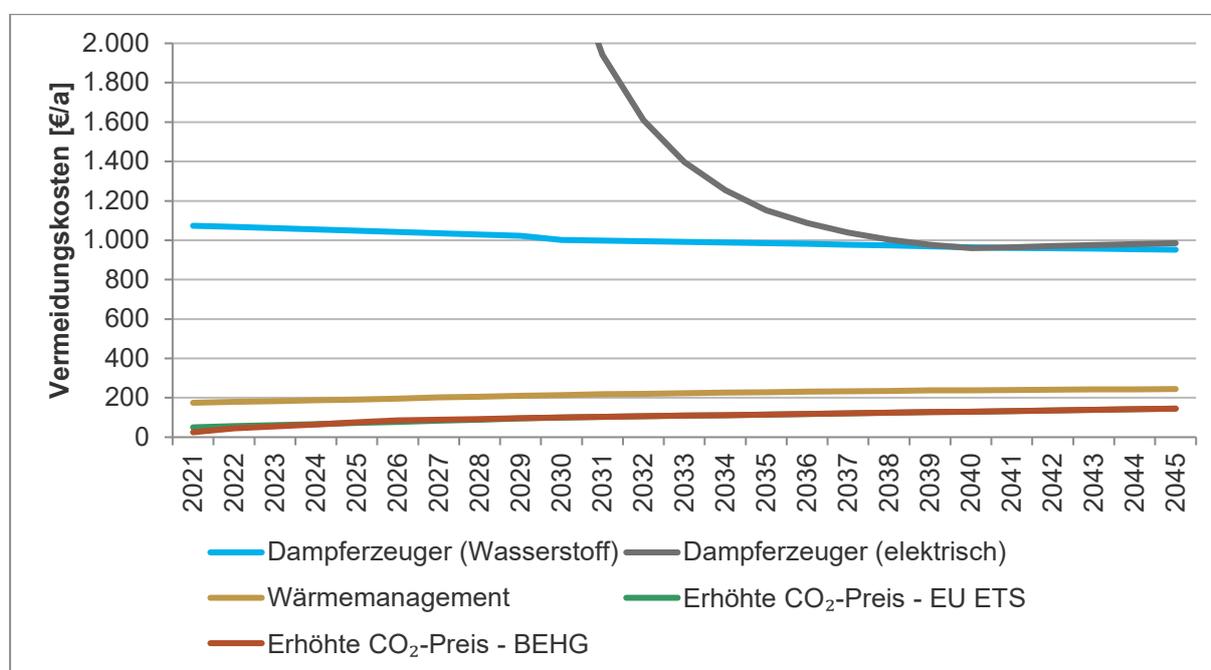


Abbildung 48: Vergleich der Vermeidungskosten ausgewählter Maßnahmen unter den Annahmen von Pfad 2 zu den CO₂-Preisen

Die Vermeidungskosten des elektrischen Dampferzeugers liegen bis ca. 2035 noch deutlich über den Vermeidungskosten des wasserstoffbefeierten Dampferzeugers, nähern sich im zeitlichen Verlauf jedoch an und liegen zeitweise sogar darunter. Mit dem angenommenen Strommix ergeben sich bis 2027 für den elektrischen Dampferzeuger noch keine CO₂-Einsparungen ggü. dem derzeitigen Dampferzeuger. Für diese Jahre gibt es daher auch keine Vermeidungskosten.

Wie leicht zu erkennen ist, liegen die angenommenen CO₂-Preise weit unter den Vermeidungskosten der Maßnahmen. Lediglich das Wärmemanagement kommt verhältnismäßig nah an den Preisverlauf mit Vermeidungskosten um 200 EUR/t CO₂. Die Vermeidungskosten der Dampferzeuger liegen deutlich über 800 EUR/t CO₂.

7.5.1 Sensitivität – höhere CO₂-Preise

In der Politik ist bereits in der Diskussion, die Preise im nationalen Emissionshandel gegenüber den derzeit definierten Festpreisen im Gesetz zu erhöhen. Um Auswirkungen höherer CO₂-Preise auf den Verlauf der Emissionen und Kosten zu untersuchen, wurden die CO₂-Preise um 20 EUR/t CO₂ erhöht.

Abbildung 49 zeigt den Verlauf der erhöhten CO₂-Preise. Weitere Änderungen werden nicht vorgenommen.

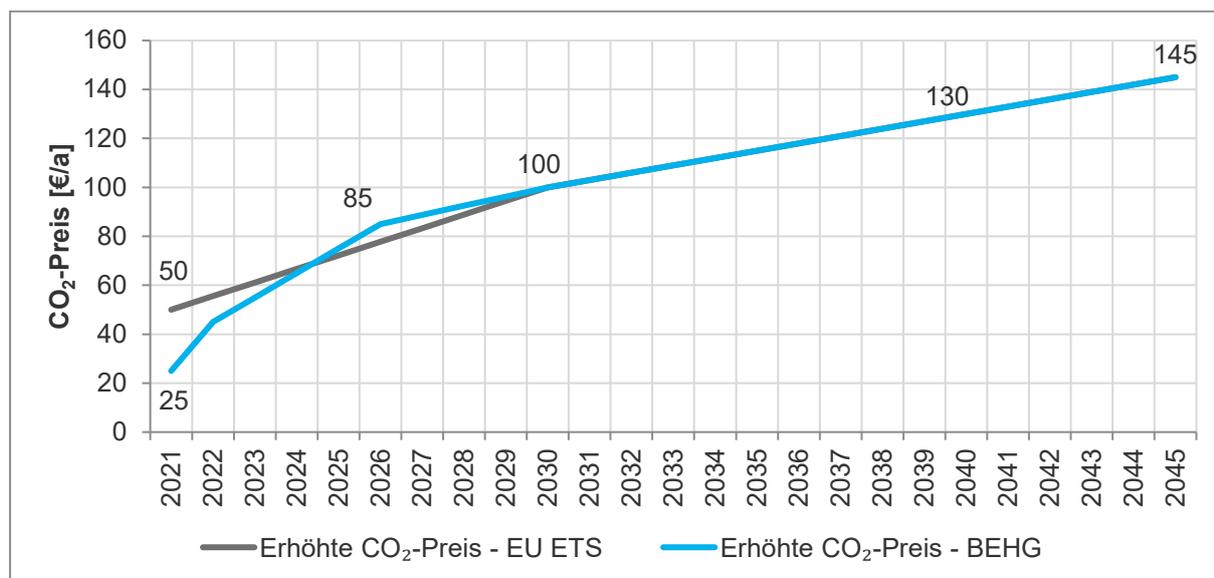


Abbildung 49: Verlauf der erhöhten CO₂-Preise

Die Modellierung zeigt deutlich, dass die erhöhten Preise keinerlei Auswirkungen auf die Umsetzung von Maßnahmen haben. Der Preisverlauf liegt immer noch weit unter den Vermeidungskosten der betrachteten Maßnahmen. Insbesondere der Einsatz von klimaneutralen Dampferzeugern bleibt weiter unwirtschaftlich. Für die Unternehmen entsteht dadurch kein zusätzlicher Anreiz, in Minderungsmaßnahmen zu investieren. Somit bleibt auch der Verlauf der CO₂-Emissionen in Pfad 2 unverändert. Die einzigen Änderungen, die sich aufgrund der erhöhten CO₂-Preise ergeben, sind die steigenden Kosten für die Kalksandsteinindustrie.

2030 erhöhen sich die CO₂-Kosten um 20 % gegenüber den Kosten aus Pfad 2. 2045 belaufen sich die Mehrkosten auf 13,8 %. Werden die gesamten Kosten betrachtet, ergeben sich für 2030 Steigerungen um rund 7,8 % und 2045 um rund 5,1 % gegenüber Pfad 2 (siehe auch Tabelle 13).

Das Anheben der CO₂-Preise ohne flankierende Maßnahmen ist damit kein geeignetes Mittel, um eine schnellere Reduktion der Emissionen herbeizuführen.

Die Vermeidungskosten der wichtigsten Minderungsmaßnahmen belaufen sich auf ein Vielfaches der aktuellen Preise. Ein Anheben der CO₂-Preise auf dieses Niveau ist aus politischen und wirtschaftlichen Gründen völlig unrealistisch. Daher muss an anderer Stelle angesetzt werden, um die Vermeidungskosten der Maßnahmen zu senken.

Tabelle 13: Übersicht zu den prozentualen Veränderungen der Kosten (aus Sensitivität mit erhöhten CO₂-Preisen) ggü. Pfad 2

Kosten Erhöhungen/Einsparungen ggü. Pfad 2	2030	2045
Energiekosten intern	0,0 %	0,0 %
CO₂-Kosten	20,0 %	13,8 %
Betriebskosten	0,0 %	0,0 %
Kapitalkosten	0,0 %	0,0 %
Summe ohne Kalk	2,8 %	1,8 %
Summe	7,8 %	5,1 %
Gesamte Investition	0,0 %	

7.5.2 Sensitivität – höhere CO₂-Preise und Verringerung der EEG-Umlage

Sollte es zu einer Erhöhung der CO₂-Preise kommen, ist es denkbar, dass diese Mehreinnahmen durch die Politik zur Entlastung bei der EEG-Umlage eingesetzt werden. Um die Auswirkungen eines niedrigeren Strompreises auf die Vermeidungskosten der betrachteten Maßnahmen zu ermitteln, wurde die EEG-Umlage in der Modellierung linear bis 2030 auf null gesenkt.

Die Absenkung der Stromkosten hat zur Folge, dass die Vermeidungskosten des elektrischen Dampferzeugers deutlich sinken. Diese nähern sich dem erhöhten CO₂-Preis an, liegen aber immer noch deutlich über den CO₂-Preisen (vgl. Abbildung 50).

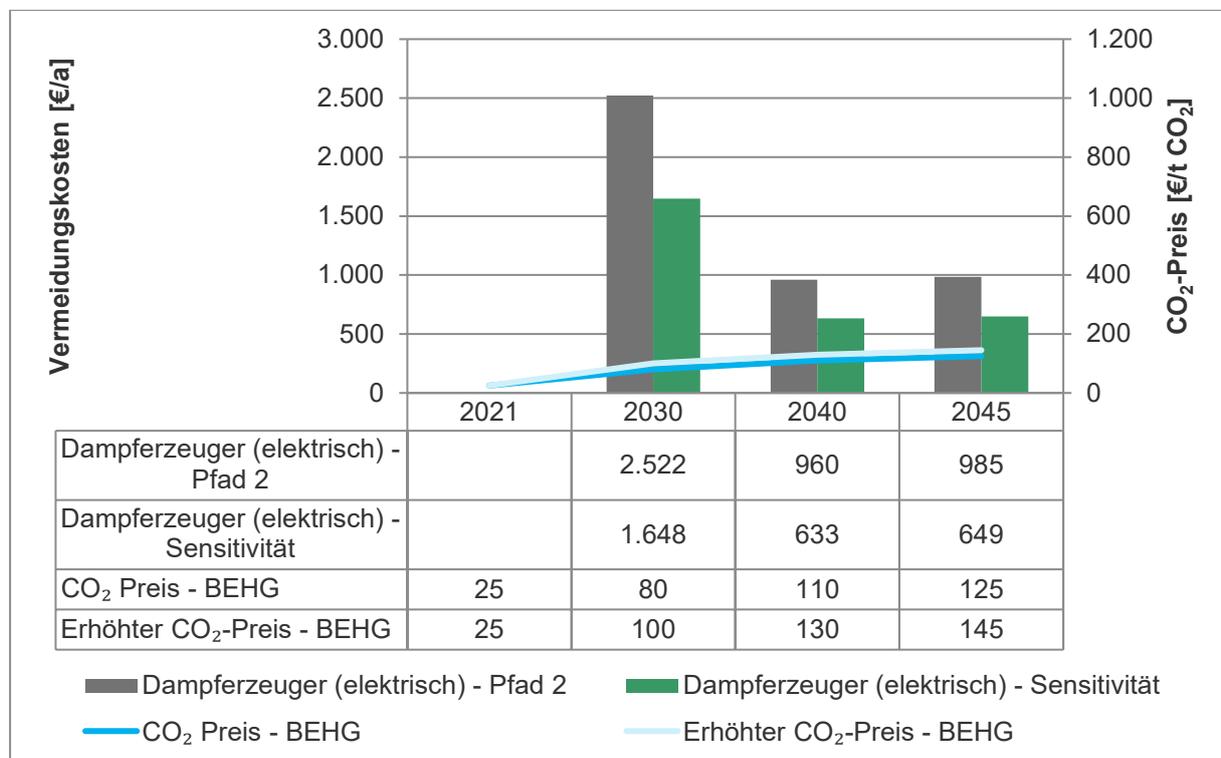


Abbildung 50: Gegenüberstellung der Vermeidungskosten des elektrischen Dampferzeugers unter Annahmen von Pfad 2 und der betrachteten Sensitivität (höhere CO₂-Preise und Verringerung der EEG-Umlage)

Mit den verringerten Vermeidungskosten liegt der elektrische Dampferzeuger ab 2033 unterhalb der Vermeidungskosten des Dampferzeugers Wasserstoff (siehe Abbildung 51) und wäre somit die attraktivere Variante für die Kalksandsteinindustrie. Allerdings liegen die Vermeidungskosten immer noch weit über den CO₂-Preisen. Selbst die Kombination eines höheren CO₂-Preises mit der vollständigen Abschaffung der EEG-Umlage bietet damit immer noch keinen wirtschaftlichen Anreiz für die Umsetzung.

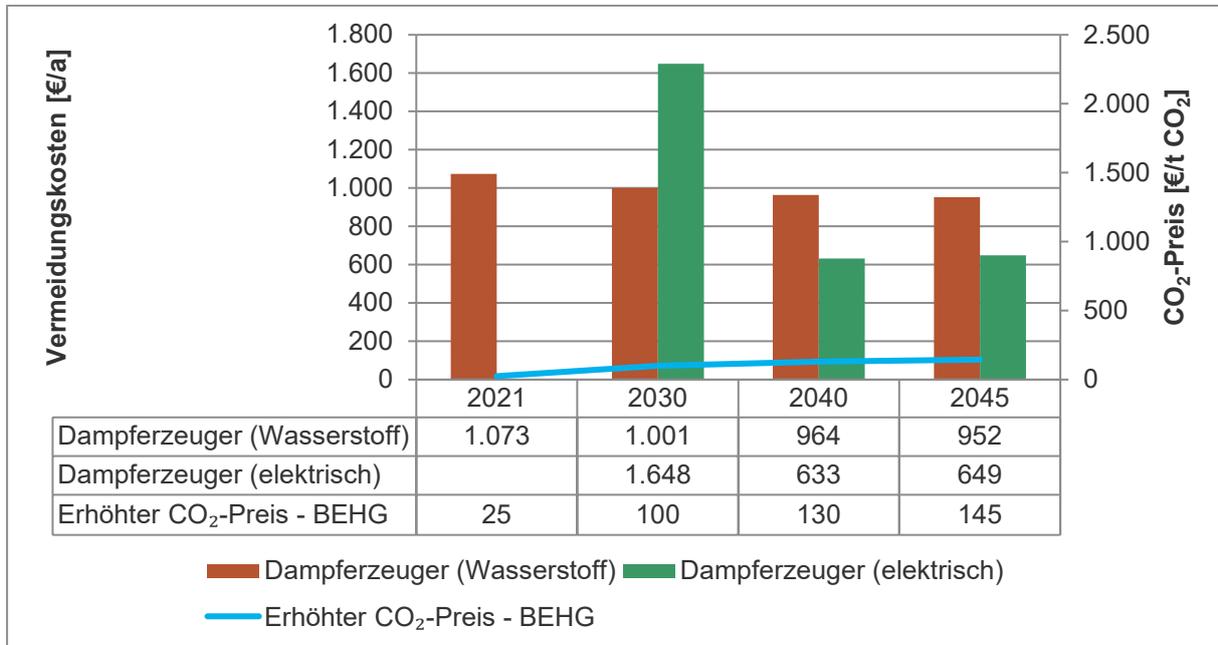


Abbildung 51: Gegenüberstellung der Vermeidungskosten des elektrischen und Wasserstoff-Dampferzeugers unter Annahmen der betrachteten Sensitivität (höhere CO₂-Preise und Verringerung der EEG-Umlage)

7.6 Wesentliche Erkenntnisse

Im Pionierpfad gelingt bis 2045 eine beachtliche Reduktion der gesamten betrachteten Emissionen um 45 %. Die eigenen Scope 1 und Scope 2-Emissionen werden sogar etwa halbiert. Haupttreiber der erfolgreichen Minderungen sind

- forcierte Effizienz in den Werken,
- erster Einsatz von klimaneutralen Brennstoffen (hier Wasserstoff) in einigen Pionieranlagen,
- Optimierungen der Rezeptur zur Verringerung des emissionsintensiven Kalkeinsatzes und
- sinkende Emissionsfaktoren.

Analog zum Referenzpfad dominieren auch hier weiterhin die Emissionen aus der Kalkherstellung das Gesamtbild. In Scope 1 und 2 bleibt Erdgas der Hauptverursacher.

Die modellierten Kosten steigen im Betrachtungszeitraum deutlich an, getrieben durch Kapital- und CO₂-Kosten. Die internen Energiekosten steigen dagegen nur moderat, da Effizienzgewinne einen Teil des Wechsels auf teurere Energieträger kompensieren. Der Industrie stehen dennoch erhebliche Zusatzbelastungen bevor, die eine erfolgreiche Transformation erschweren.

Die deutsche Kalksandsteinindustrie kann unter geeigneten Voraussetzungen dennoch erhebliche Emissionsminderungen umsetzen. Steigende Kosten müssen an Kunden weitergegeben werden können. Dazu ist unbedingt ein angemessener Carbon Leakage Schutz notwendig. Dieser muss für fairen Wettbewerb mit emissionsintensiver Konkurrenz, die keinem CO₂-Preis unterliegt, sorgen. Im Vergleich mit anderen Baustoffen muss die Recarbonatisierung bei Lebenszyklusbetrachtungen in angemessener Weise berücksichtigt werden können, da ein relevanter Teil der ausgestoßenen Emissionen wieder eingelagert wird.

Hier nicht angenommene Fördermittel können zu weiteren und schnelleren Reduktionen beitragen. Höhere CO₂-Preise allein sind kein geeignetes Mittel, um weitere Reduktionen zu bewirken.



Abbildung 52: Abkühlen der Kalksandsteine; Bildquelle: © Bundesverband Kalksandsteinindustrie e.V.

7.7 Steckbrief Pionierpfad (Pfad 2)

Tabelle 14: Steckbrief Pionierpfad (Bezugsgröße: deutsche Kalksandsteinindustrie)

Pionierpfad (Pfad 2)	
Beschreibung Maßnahmen	<p>Maßnahmen Pfad 2:</p> <ul style="list-style-type: none"> kontinuierliche Effizienzsteigerung beim Einsatz der Energieträger Reduktion Emissionsfaktoren Strom und Erdgas <p>Zusätzliche Maßnahmen (nicht abschließend)</p> <ul style="list-style-type: none"> Digitalisierung des Produktionsprozesses Austausch 66 Dampferzeuger durch effizientere erdgasbefeuerte Dampferzeuger Einsatz von 10 Wasserstoffdampferzeugern Umsetzung Wärmemanagement Reduktion Kalkgehalt auf 6 % bis 2045 Reduktion Emissionsfaktor Kalk um 1/3
Emissionsentwicklung ohne Recarbonatisierungseffekte	
<p>Emissionsentwicklung bis 2030:</p> <ul style="list-style-type: none"> Senkung auf 658 Tsd. t CO₂ <p>Emissionsentwicklung bis 2045:</p> <ul style="list-style-type: none"> Senkung auf 442 Tsd. t CO₂ Zusätzlich 296 Tsd. t CO₂ Minderungen ggü. Referenzpfad 	<p>■ Scope 1 ■ Scope 2 ■ Scope 3</p>
Emissionsentwicklung mit Recarbonatisierungseffekten	
<p>Emissionsentwicklung bis 2030:</p> <ul style="list-style-type: none"> Senkung auf 595 Tsd. t CO₂ <p>Emissionsentwicklung bis 2045:</p> <ul style="list-style-type: none"> Senkung auf 282 Tsd. t CO₂ Zusätzlich 286 Tsd. t CO₂ Minderungen ggü. Referenzpfad 	<p>▨ Effekte Recarbonatisierung ■ Emissionen inkl. Recarbonatisierung</p>
<p>Wesentliche Einflussfaktoren auf Emissionsentwicklung:</p> <ul style="list-style-type: none"> Effizienzsteigerung beim Einsatz von Energieträgern Teilweise Brennstoffwechsel beim Dampferzeuger und Transport Reduktion Kalkgehalt im Stein Reduktion Emissionsfaktor Strom durch frühen Grünstrombezug Reduktion Emissionsfaktor Erdgas, Kalk 	

Pionierpfad (Pfad 2)	
Kostenentwicklung inkl. CO ₂ -Kosten Kalk	
<p>Kostenentwicklung (energiebezogen):</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ mittlere Kosten Ø 2021–2045: 153 Mio. €/a ▪ Kosten Zieljahr 2045: 164 Mio. €/a ▪ 26 Mio. €/a weniger ggü. Referenzpfad ▪ Gesamtinvestitionskosten im Zeitraum 2021–2045: 342 Mio. € ▪ Zusätzliche Investitionskosten ggü. Referenzpfad: 194 Mio. € 	
Kostenentwicklung ohne CO ₂ -Kosten Kalk	
<p>Kostenentwicklung (energiebezogen):</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ mittlere Kosten Ø 2021–2045: 114 Mio. €/a ▪ Kosten Zieljahr 2045: 122 Mio. €/a ▪ Zusätzliche 5 Mio. €/a ggü. Referenzpfad ▪ Gesamtinvestitionskosten: 341,8 Mio. € ▪ Zusätzliche Investitionskosten ggü. Referenzpfad: 194 Mio. € 	
<p>Wesentliche Einflussfaktoren auf Kostenentwicklung:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ steigende CO₂-Kosten infolge der Preisentwicklung ▪ steigende Kapitalkosten für Investitionen in Effizienzmaßnahmen und Austausch Dampferzeuger 	
<p>Wesentliche Hemmnisse:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ mangelnde Wirtschaftlichkeit der Minderungsoptionen ▪ volatile Rahmenbedingungen ▪ schneller Kostenanstieg 	

8 Klimaneutralitätspfad (Pfad 3)

In diesem Pfad werden alle notwendigen Schritte unternommen, um die gesamte Kalksandsteinproduktion bis 2045 klimaneutral aufzustellen. Dabei werden keinerlei Restriktionen hinsichtlich Wirtschaftlichkeit oder verfügbarer Restriktionen gesetzt. Es wird modelliert, welche Maßnahmen unter den gegebenen Rahmenbedingungen ergriffen werden und welche Kosten und Entwicklungen damit einhergehen. Natürlich stellt eine Modellierung ein vereinfachtes Bild dar, das stark auf den getroffenen Annahmen beruht. In der Realität wird die Entwicklung stark von einzelnen werks- und unternehmensspezifischen Umständen abhängen und gegebenenfalls deutlich heterogener ablaufen, als in der Studie beschrieben. Auch, durchaus notwendige, Änderungen der politischen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen können zu abweichenden Entscheidungen in der tatsächlichen Umsetzung führen. Daher wird eine Reihe von Sensitivitätsanalysen durchgeführt, um derartige Fälle zumindest punktuell abzubilden.

Zur Erreichung der Treibhausgasneutralität in der Produktion müssen alle derzeit genutzten Energieträger vollständig durch CO₂-neutrale Energieträger, wie z. B. synthetische Brenn- und Kraftstoffe oder grünen Strom, ersetzt werden. Zudem muss der Emissionsfaktor des zugekauften Kalks auf null reduziert werden.

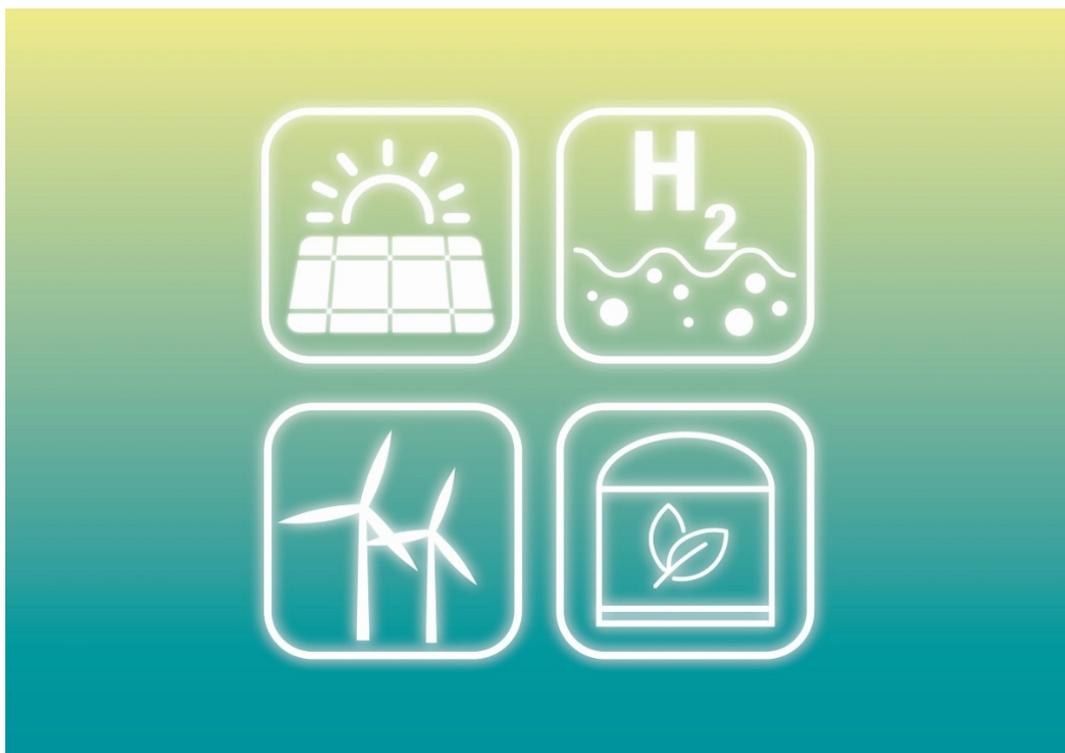


Abbildung 53: Klimafreundliche Produktion ist durch den Einsatz CO₂-neutraler Energieträger möglich;
Bildquelle: © akitada31 auf Pixabay

8.1 Maßnahmen

Die bekannten Annahmen aus dem Referenzpfad bestehen weiter und auch die Effizienzgewinne durch zusätzliche Digitalisierung, die bereits im Pionierpfad dargelegt wurden, kommen hier zum Tragen. Allerdings müssen noch deutlich mehr Maßnahmen, auch gegenüber Pfad 2, umgesetzt werden, um Klimaneutralität tatsächlich zu erreichen.

Das dafür notwendige Investitionsbudget wird nicht begrenzt. Das resultiert im Durchschnitt in Investitionen für spezifische Minderungsmaßnahmen von 9,3 Mio. EUR/a. Über den betrachteten Zeitraum ergeben sich dafür Investitionen in Höhe von 231,9 Mio. EUR/a. Die gesamten betrachteten Investitionen belaufen sich auf durchschnittlich 21,4 Mio. EUR/a oder 535,9 Mio. EUR im Betrachtungszeitraum. Das erfordert zusätzliche Investitionen gegenüber dem Referenzpfad von 298 Mio. EUR. Nicht enthalten sind hierbei Investitionen für neue Maschinen im Sandabbau, den LWK Transport und zur Herstellung von klimaneutralem Kalk.

Entwicklungen im Kalksandsteinwerk

Die Produktion in den Kalksandsteinwerken wird im Pfad 3 vollständig treibhausgasneutral aufgestellt. Es werden am Ende des Betrachtungszeitraums keinerlei CO₂-Emissionen mehr von den Werken verursacht.

Dazu wird der Bezug von Grünstrom auch gegenüber dem Pionierpfad noch einmal nach vorne gezogen. Ab 2030 wird in den Werken rein regenerativ erzeugter Strom eingesetzt. Davor nimmt der Anteil linear zu.

Daneben wird nach der Modellierung eine Vielzahl von Maßnahmen in den Werken umgesetzt:

- Austausch und Brennstoffwechsel sämtlicher Dampferzeuger
 - Dampferzeuger – Wasserstoff betrieben
 - Dampferzeuger – elektrisch betrieben
 - Beginn der Maßnahmen 2027
 - Abschluss bis 2041
- Wärmenutzung
 - Explizite Optimierung Wärmemanagement bis 2024 für alle Werke
 - Einbau von zusätzlichen Wärmespeichern bis 2026 für alle Werke
 - Optimierung der Autoklaven für 14 Werke
- Verpackungsanlage
 - Ersatz aller Verpackungsanlagen durch Stretchanlagen bis 2043
 - Handlungsfeld mit hohen Vermeidungskosten (da geringer Emissionsanteil), daher Umsetzung erst zum Ende des Betrachtungszeitraums
- Vollständige Umstellung Werksverkehr
 - Bis 2045 werden die Stapler mit synthetischen Kraftstoffen betrieben
 - Handlungsfeld mit sehr hohen Vermeidungskosten (da geringer Emissionsanteil), daher Umsetzung erst zum Ende des Betrachtungszeitraums
 - In der Modellierung kommen Elektrostapler nicht zum Einsatz. Grundsätzlich wird der Einsatz von Elektrostaplern jedoch nicht ausgeschlossen. Vor allem für Stapler bis zu 6 Tonnen kann sich in einem 2-Schicht-Betrieb der Ersatz durch Elektrostapler²³ lohnen. Bei größeren Lasten benötigt man unter den aktuellen Bedingungen kraftstoffbetriebene Stapler, weil diese mehr Leistung besitzen. Da die Stapler als Gruppe betrachtet werden, setzen sich in der Studie die kraftstoffbetriebenen Stapler insgesamt durch.

²³ Beispiel für Investition Lithium-Ionen-Batterien: rd. 20.000 EUR

Die Dampferzeugung ist der Hauptemissionstreiber in den Werken. Hierauf lohnt also ein besonderer Blick. Abbildung 54 zeigt die verwendete Technik im Verlauf der Zeit.

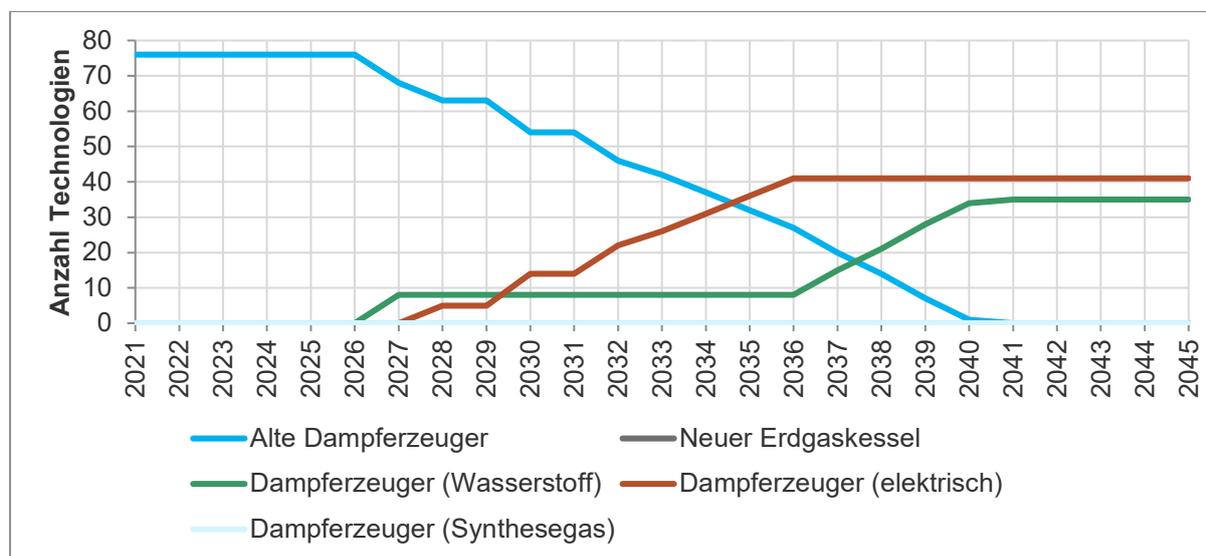


Abbildung 54: Modellierter Austausch der Dampferzeuger im Klimaneutralitätspfad

Es ist deutlich zu erkennen, dass im Jahr 2027 der Wasserstoffdampferzeuger noch die geringeren Vermeidungskosten im Vergleich zu den Elektrodampferzeugern hat. Das liegt u. a. daran, dass die Investition in einen Elektrodampferzeuger höher ist und der Strom zu diesem Zeitpunkt noch CO₂-Emissionen und somit CO₂-Kosten verursacht. Im Jahr 2028 sind dann die Emissionseinsparungen durch den hohen Grünstromanteil so hoch, dass der Elektrodampferzeuger aus Sicht der Vermeidungskosten attraktiver ist.

Dies ändert sich aber wieder 2037. Durch den angenommenen Preispfad für Wasserstoff sinken die Vermeidungskosten des H₂-Dampferzeugers wieder unter jene des Elektrodampferzeugers. Konsequenterweise werden ab hier wieder wasserstoffbefeuerte Dampferzeuger eingebaut. Bis 2045 werden insgesamt 41 elektrisch betriebene und 35 Wasserstoff betriebene Dampferzeuger eingesetzt. Bereits hier zeigt sich, dass die Wahl der Technologie stark von den Preisen der Energieträger und anderen Rahmenbedingungen abhängt.

Kalkgehalt im Kalksandstein

Neben den technischen Maßnahmen zur Reduktion der energiebedingten Emissionen wird der Kalkgehalt in den Steinen reduziert, um Emissionen in der Vorkette einzusparen. Dafür gelten die Voraussetzungen und Annahmen aus Pfad 2. Allerdings wird der Kalkgehalt im Klimaneutralitätspfad sogar von 7 % auf 5 % abgesenkt. Die Absenkung erfolgt linear ab 2026.

Emissionsfaktor Kalk

Zur weiteren Reduktion der kalkbedingten Emissionen werden auch dort klimafreundliche Entwicklungen in der Herstellung angenommen. Laut ihrer Roadmap hat die deutsche Kalkindustrie bis 2050 das Ziel ausgegeben, klimaneutralen Kalk herzustellen. Es ist anzunehmen, dass die Industrie die Ambitionssteigerung der deutschen Politik mitgeht und dieses Ziel auf 2045 nach vorne legt. Daher wird in dieser Roadmap schon für 2045 von klimaneutralem Kalk ausgegangen. Dies wird zum einen durch den bereits aus dem Pionierpfad bekannten Brennstoffwechsel erreicht. Darüber hinaus werden die

Prozessemissionen im Lauf der Zeit durch Smart Carbon Separation (SCS) und Smart Carbon Capture (SCC)²⁴ reduziert.

In der Modellierung wird angenommen, dass bis 2034 zum größten Teil die Brennstoffemissionen reduziert werden und ab 2035 zusätzlich die weiteren Maßnahmen der Kalkindustrie greifen. Bis 2045 erreicht der Emissionsfaktor des bezogenen Branntkalks schließlich den Wert null. Die dafür eventuell entstehenden Mehrkosten werden im Rahmen der Studie nicht berücksichtigt. Die Roadmap des Kalkverbandes liefert auch keinerlei Anhaltspunkte dazu. Insbesondere durch bereits aktuell diskutierte Förderungen für die Kalkindustrie, wie Differenzkostenverträge, sollten die anfallenden Mehrkosten bereits abgefangen und daher nicht an die Abnehmer weiter gegeben werden.

Transport und Maschinen im Sandabbau

Auch in diesen Bereichen müssen Maßnahmen ergriffen werden, um den gesamten Treibhausgasausstoß der Branche vollständig zu reduzieren. Da die Maßnahmen nicht im Fokus der Betrachtung stehen und auch nicht nennenswert durch die Branche beeinflusst werden können, werden hier in erster Linie die Effekte betrachtet, die durch den Wechsel auf klimaneutrale Energieträger entstehen, ohne im Detail auf andere Faktoren einzugehen.

Im Sandabbau kommen ab 2030 langsam synthetische Kraftstoffe zum Einsatz. Bis 2045 wird der Dieseleinsatz dadurch vollständig substituiert. Die elektrischen Maschinen laufen analog zu den Werken ab 2030 vollständig mit Grünstrom.

Im Transportwesen kommen ab 2030 zunehmend batterieelektrische Fahrzeuge zum Einsatz. Der Einsatz steigt linear bis 2045 an. Zusätzlich werden ab 2040 auch LKWs mit Brennstoffzellentechnologie auf Wasserstoffbasis eingesetzt, deren Anteil ebenfalls bis zum Ende des Betrachtungszeitraums linear erhöht wird. 2045 werden 72,7 % des Transportvolumens mit batterieelektrischen LKWs abgedeckt. Die übrigen 27,3 % entfallen auf LKW mit Brennstoffzellentechnik. Der Transport im betrachteten Scope ist damit vollständig klimaneutral. Durch die höhere Effizienz werden gegenüber den konventionellen LKWs nicht nur Emissionen eingespart, auch der Energieeinsatz sinkt.

²⁴ Quelle: BVK (2020)

8.2 Entwicklung des Energieeinsatzes

Bei der Betrachtung des Energieträgereinsatzes der 76 Kalksandsteinwerke in Abbildung 55 wird deutlich, dass durch den Einsatz effizienter Technologie (u. a. neue Dampferzeuger, aber vor allem auch die unterschiedlichen Wärmemaßnahmen) Energie eingespart werden kann und nicht nur die Substitution der fossilen Energieträger durch klimaneutrale von Relevanz ist. Damit kann die Kalksandsteinindustrie auch einen Beitrag zur Verbesserung der Versorgungslage mit regenerativen Energieträgern leisten. Deren flächendeckende und bezahlbare Verfügbarkeit wird eine der großen Herausforderungen für ein klimaneutrales Deutschland sein. Jede Energieeinsparung trägt auf volkswirtschaftlicher Ebene dazu bei, die Versorgungslage zu entspannen.

Insgesamt kann der Energiesatz von 775 GWh auf 586 GWh reduziert werden. Dies entspricht einer Minderung um 24 %. Bis 2030 können bereits 20 % gegenüber 2021 eingespart werden. Vor allem die Maßnahmen zu Wärmemanagement und -speicherung werden frühzeitig umgesetzt, da sie relativ geringe Vermeidungskosten im Vergleich zu den anderen Maßnahmen aufweisen. Auch die allgemeinen Effizienzgewinne fallen hauptsächlich in diesen Zeitraum, weshalb auch die größten Einsparungen im Energieträgereinsatz im ersten Jahrzehnt stattfinden.

In Hinblick auf die eingesetzten Energieträger macht sich vor allem der Austausch der Dampferzeuger bemerkbar. Ab 2027 kommt erstmals Wasserstoff zum Einsatz. Die Einsatzmengen bleiben dann jedoch konstant, da die Dampferzeugung in den nächsten Jahren elektrifiziert wird. Ab 2037 wird schließlich, wie beschrieben, wieder auf Wasserstoff gesetzt und die eingesetzten Mengen erhöhen sich entsprechend. Parallel dazu sinken die Einsatzmengen Erdgas und Heizöl, welche in der Dampferzeugung substituiert werden.

In den letzten Jahren ist auch der Wechsel auf synthetische Kraftstoffe zum Betrieb der Stapler gut zu erkennen.

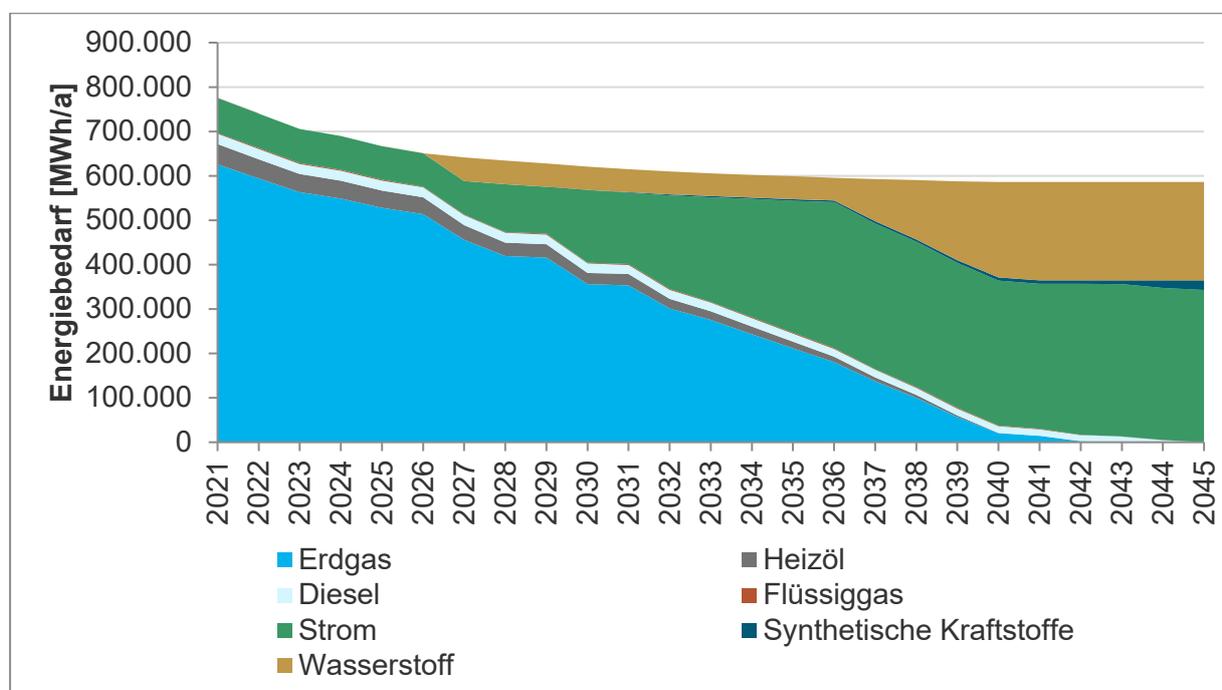


Abbildung 55: Entwicklung des Energieträgereinsatzes der Kalksandsteinwerke bis 2045 im Klimaneutralitätspfad (Bezugsgröße: deutsche Kalksandsteinindustrie)

Zusätzlich zum werksinternen Energieverbrauch, werden im Klimaneutralitätspfad auch die Kraftstoffe im externen Sandabbau und Transport umgestellt. Der Verlauf ist in Abbildung 56 dargestellt.

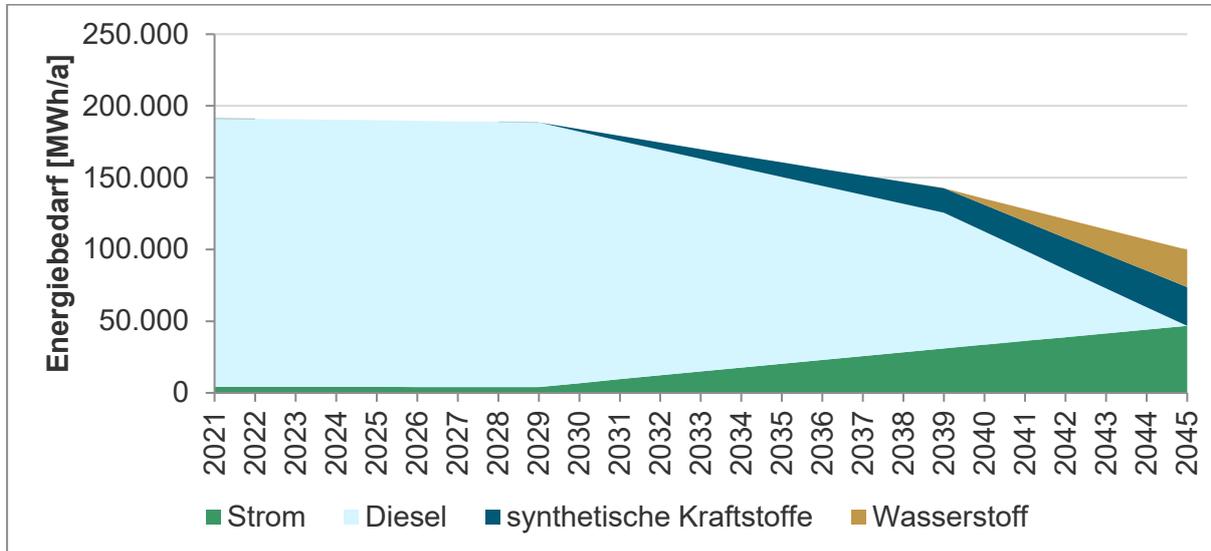


Abbildung 56: Entwicklung des Energieträgereinsatzes Transport und externer Sandabbau bis 2045 im Klimaneutralitätspfad (Bezugsgröße: deutsche Kalksandsteinindustrie)

Auch hier ist ein deutlicher Rückgang des Energieeinsatzes zu erkennen. Bis 2045 kann dieser um rund 48 % reduziert werden. Dies ist vor allem auf die effizienteren Elektromotoren zurückzuführen.

Der relevanteste Energieträger in diesem Bereich ist dann Strom. Wasserstoff und synthetische Kraftstoffe werden in ähnlichen Mengen benötigt.



Abbildung 57: Moderner Dampferzeuger, Pivovar Klaster; Bildquelle: © Bosch Industriekessel GmbH

8.3 Entwicklung der CO₂-Emissionen

Mit erheblichem Aufwand kann es der deutschen Kalksandsteinindustrie durch die betrachteten Maßnahmen gelingen, die ausgestoßenen Emissionen komplett zu mindern.

Gesamte Emissionen ohne Recarbonatisierungseffekte

Bei Betrachtung der gesamten Emissionen in Abbildung 58 fällt der starke Rückgang der Scope 3-Emissionen auf, der ab 2035 durch SCS und SCC nochmals beschleunigt wird. Die gesamte Reduktion wird daher vor allem getrieben durch verringerten Kalkgehalt im Stein und die Minderung des Emissionsfaktors für Kalk.

Aber auch bei dieser Betrachtung ist bereits deutlich der Rückgang der Scope 1 und 2-Emissionen zu erkennen. 2045 wird im Klimaneutralitätspfad der Ausstoß von CO₂ komplett vermieden. Gegenüber dem Referenzpfad werden im Zieljahr 738 kt CO₂ eingespart. Bereits bis 2030 können die Emissionen ausgehend vom heutigen Niveau, um 26 % auf 595 kt CO₂ gesenkt werden.

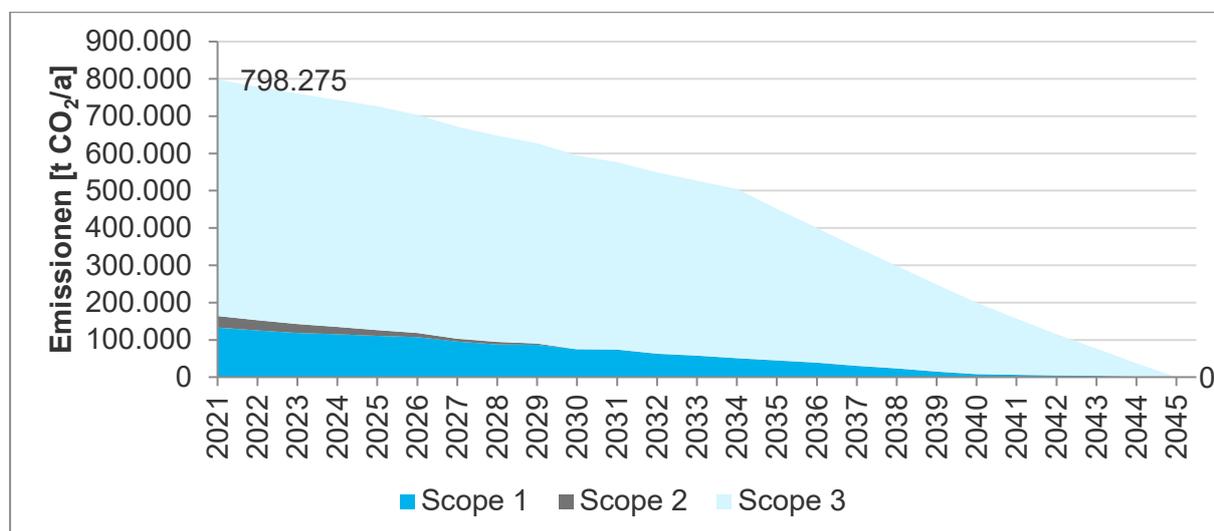


Abbildung 58: Entwicklung der CO₂-Emissionen bis 2045 im Klimaneutralitätspfad (Bezugsgröße: deutsche Kalksandsteinindustrie)

Scope 1 und Scope 2-Emissionen

Die Scope 1- und 2-Emissionen sinken noch deutlich schneller ab als die Gesamtemissionen. In den ersten Jahren ist dies vor allem auf den Einsatz regenerativen Stroms und Energieeinsparungen aller Art zurückzuführen. Bis 2040 sorgt dann die Umstellung der Dampferzeuger auf emissionsfreie Technologien für einen kontinuierlichen Rückgang der Emissionen aus Erdgas und Heizöl. Danach flacht die Reduktion spürbar ab. Durch die Maßnahmen an den Verpackungsanlagen und im Werksverkehr werden aber bis 2045 auch die restlichen Emissionen komplett vermieden.

Bis 2030 werden die Emissionen in den Kalksandsteinwerken (inkl. Strombezug) von 164 kt CO₂ auf 74 kt CO₂ reduziert (s. Abbildung 59). Das entspricht einer Minderung um 55 % gegenüber 2021. Die Kalksandsteinindustrie leistet in diesem Pfad daher einen erheblichen Beitrag zur Erreichung der 2030er Ziele.

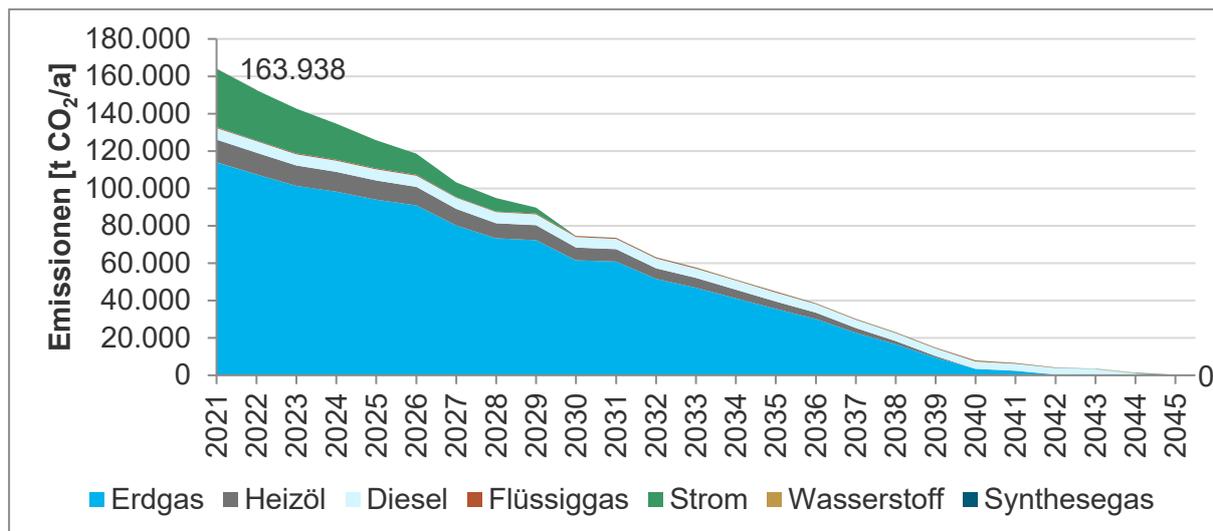


Abbildung 59: Entwicklung der CO₂-Emissionen aus Scope 1 und Scope 2 bis 2045 im Klimaneutralitätspfad (Bezugsgröße: deutsche Kalksandsteinindustrie)

Scope 3-Emissionen

Die Scope 3-Emissionen werden, wie bereits erwähnt, durch die Emissionslast Kalk dominiert. Diese kann durch die oben genannten Maßnahmen zur Reduktion des Kalkgehalts im Kalksandstein und v. a. die Annahmen zur Minderung des Emissionsfaktors Kalk bis 2045 auf null reduziert werden. Hierzu ist jedoch entschlossenes Handeln seitens der Kalkindustrie notwendig. Bis 2030 können die Emissionen um 18 % gesenkt werden.

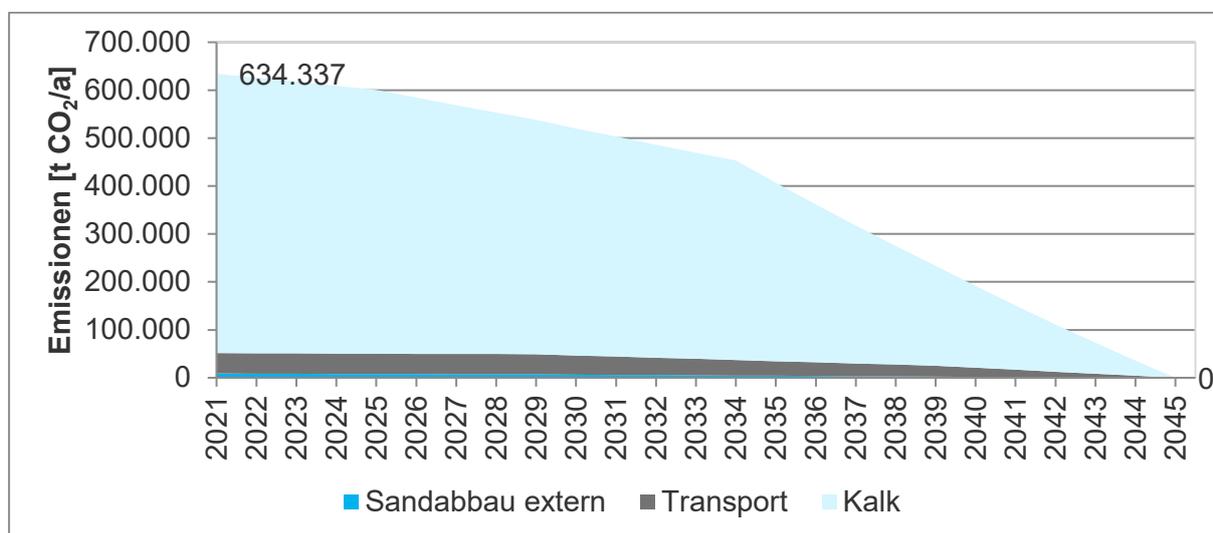


Abbildung 60: Entwicklung der CO₂-Emissionen aus Scope 3 bis 2045 im Klimaneutralitätspfad (Bezugsgröße: deutsche Kalksandsteinindustrie)

Im Bereich der Emissionen aus Sandabbau und Transport ist bis 2029 nur eine geringe Reduktion der Emissionen zu verzeichnen. Diese ist vor allem auf den zunehmenden Einsatz von Grünstrom zurückzuführen. Dann beginnt der Umstieg auf klimaneutralen Transport und regenerative Kraftstoffe, was den Rückgang erheblich beschleunigt.

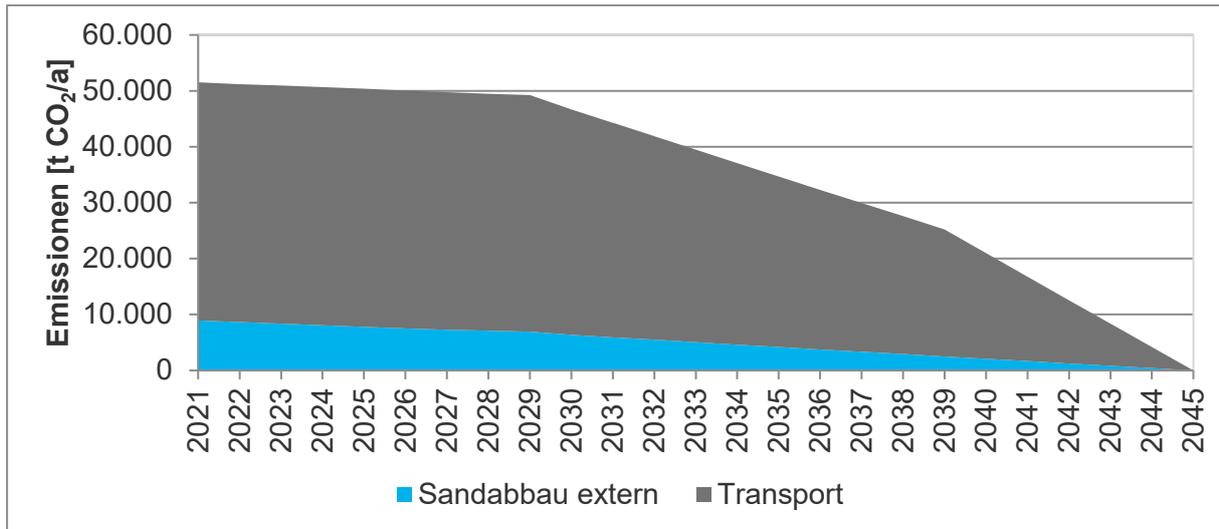


Abbildung 61: Entwicklung der CO₂-Emissionen aus Scope 3 ohne Kalk bis 2045 im Klimaneutralitätspfad (Bezugsgröße: deutsche Kalksandsteinindustrie)

Gesamte Emissionen mit Recarbonatisierungseffekten

Der Klimaneutralitätspfad legt dar, dass die deutsche Kalksandsteinindustrie unter geeigneten Rahmenbedingungen und mit erheblichem Aufwand den Ausstoß von CO₂ bis 2045 komplett vermeiden kann.

Durch Recarbonatisierung der Steine können die Emissionen nicht nur auf null reduziert werden, sondern sogar CO₂-Emissionen wieder aufgenommen werden. Ab dem Jahr 2042 überwiegen die Effekte aus der Recarbonatisierung der produzierten Steine die verursachten Emissionen. Die Branche wird damit klimapositiv. Im Jahr 2045 sind es rund 149 kt CO₂, die der Umwelt entzogen werden.

Der Kalksandsteinindustrie bleibt damit zumindest auch ein gewisser Spielraum, sollte es der Kalkindustrie nicht gelingen, sämtliche Prozessemissionen durch SCS/SCC abzuschneiden. Ein gewisser Teil dieser Emissionen könnte durch die Recarbonatisierung aufgefangen werden und die Steine damit dennoch klimaneutral produziert werden. Die Emissionen aus Energieträgereinsätzen sollten trotzdem vollständig gemindert werden.

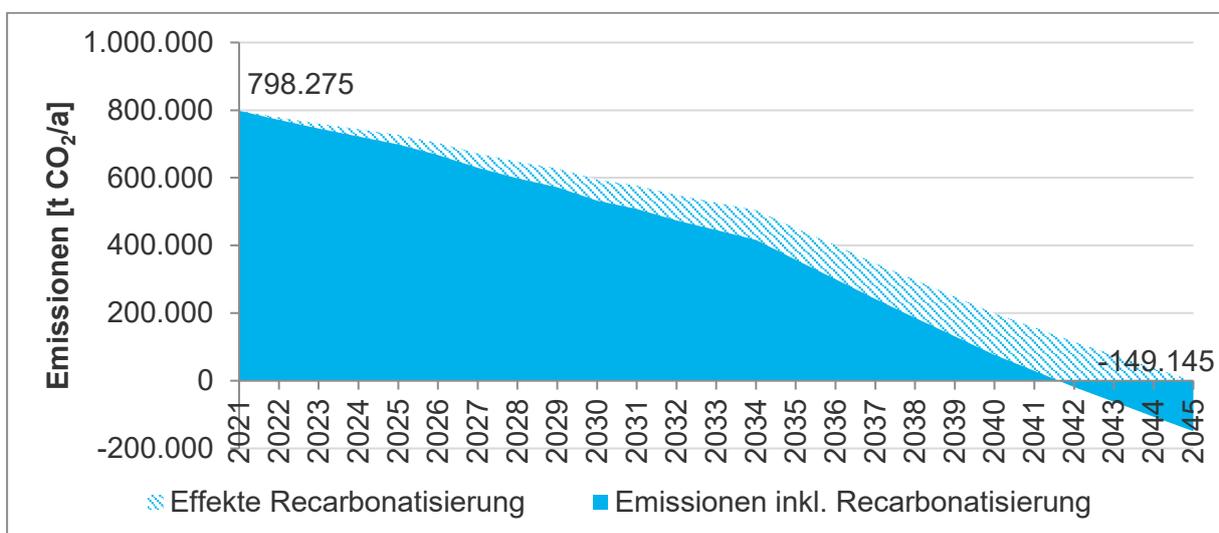


Abbildung 62: Entwicklung der CO₂-Emissionen bis 2045 im Klimaneutralitätspfad inkl. Recarbonatisierungseffekte der produzierten Kalksandsteine im Zeitraum 2021 bis 2045 (Bezugsgröße: deutsche Kalksandsteinindustrie)

Recarbonatisierungseffekte

Insgesamt können die 2021 bis 2045 produzierten Steine 7,6 Mio. t CO₂ bis 2095 aufnehmen. Dies entspricht bei der insgesamt verursachten Menge an CO₂-Emissionen von rund 11,5 Mio. t CO₂ 66 %.

Absolut gesehen ist der Effekt der Recarbonatisierung im Klimaneutralitätspfad geringer als in den anderen beiden Pfaden, da weniger Kalk im Stein enthalten ist. Relativ zu den Gesamtemissionen können hier aber deutlich mehr Emissionen eingebunden werden.

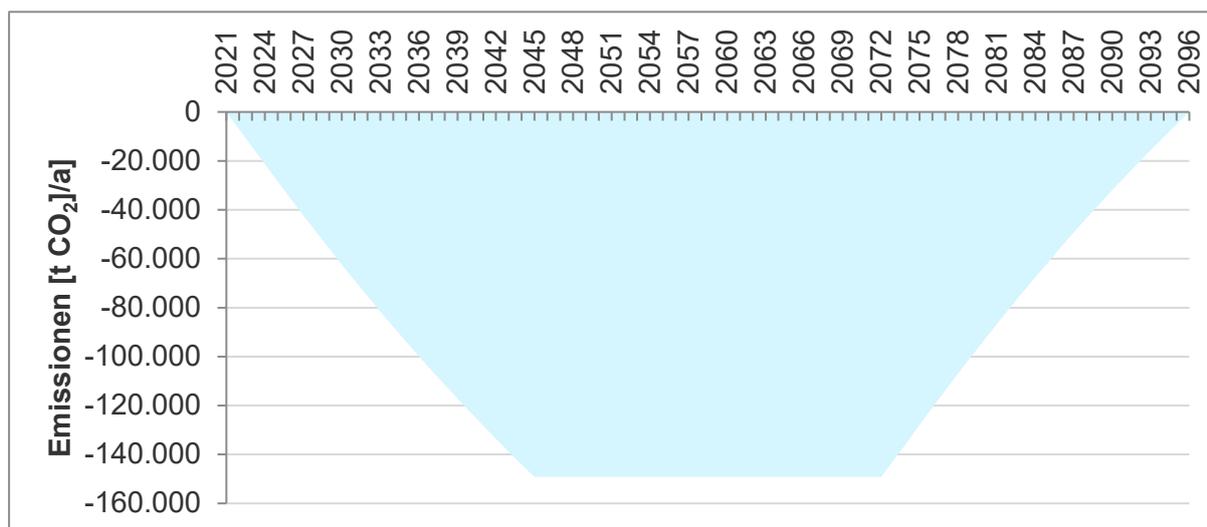


Abbildung 63: Recarbonatisierungseffekt der im Betrachtungszeitraum 2021 bis 2045 produzierten Kalksandsteine – Klimaneutralitätspfad (Bezugsgröße: deutsche Kalksandsteinindustrie)

Tabelle 15: Ergebnisse zur Recarbonatisierung im Klimaneutralitätspfad (Bezugsgröße: deutsche Kalksandsteinindustrie)

Recarbonatisierungseffekte der produzierten Mengen (2021–2045)	7,6 Mio. t CO ₂
Gesamte Emissionen im Zeitraum 2021 bis 2045	11,5 Mio. t CO ₂
Emissionen nach gesamten Recarbonatisierungseffekt	3,9 Mio. t CO ₂
Anteil wieder aufgenommener Emissionen durch Recarbonatisierung	66 %

8.4 Entwicklung der energiebezogenen Kosten

Wie im vorangegangenen Abschnitt dargelegt ist Klimaneutralität in der Kalksandsteinproduktion möglich. Diese hat allerdings ihren Preis. Der Weg dorthin ist mit erheblichen finanziellen Anstrengungen verbunden.

Abbildung 64 zeigt die Entwicklung der Gesamtkosten im Pfad 3. Die jährlichen Kosten steigen im Betrachtungszeitraum von 124 Mio. EUR/a auf 192 Mio. EUR/a. Dies entspricht in etwa einem Anstieg um 55 %. Anfang der 2040er Jahre erreicht man sogar einen noch höher liegenden Peak im Bereich von 211 Mio. EUR/a oder einer Steigerung von 71 %. Danach sinken die CO₂-Kosten deutlich und führen auch zu einem Rückgang der Gesamtkosten, sodass die Gesamtkosten zum Ende des Betrachtungszeitraums nur 2 Mio. EUR/a über dem Referenzpfad liegen. Dies gilt allerdings nur, wenn durch die Emissionsminderung in der Kalkindustrie keine Mehrkosten für die abnehmende Kalksandsteinindustrie entstehen. Zur Erinnerung, die Emissionen der Kalkherstellung sind dagegen voll eingepreist und machen im Referenzpfad einen beträchtlichen Teil der Kosten aus. Im Pfad 3 sind diese zwar bis weit in die 2030er Jahre auch noch sehr relevant, verlieren dann aber zunehmend an Bedeutung. Für den direkten Vergleich der Kosten der Kalksandsteinindustrie bietet sich daher insbesondere die Betrachtung ohne CO₂-Kosten aus der Kalkherstellung an.

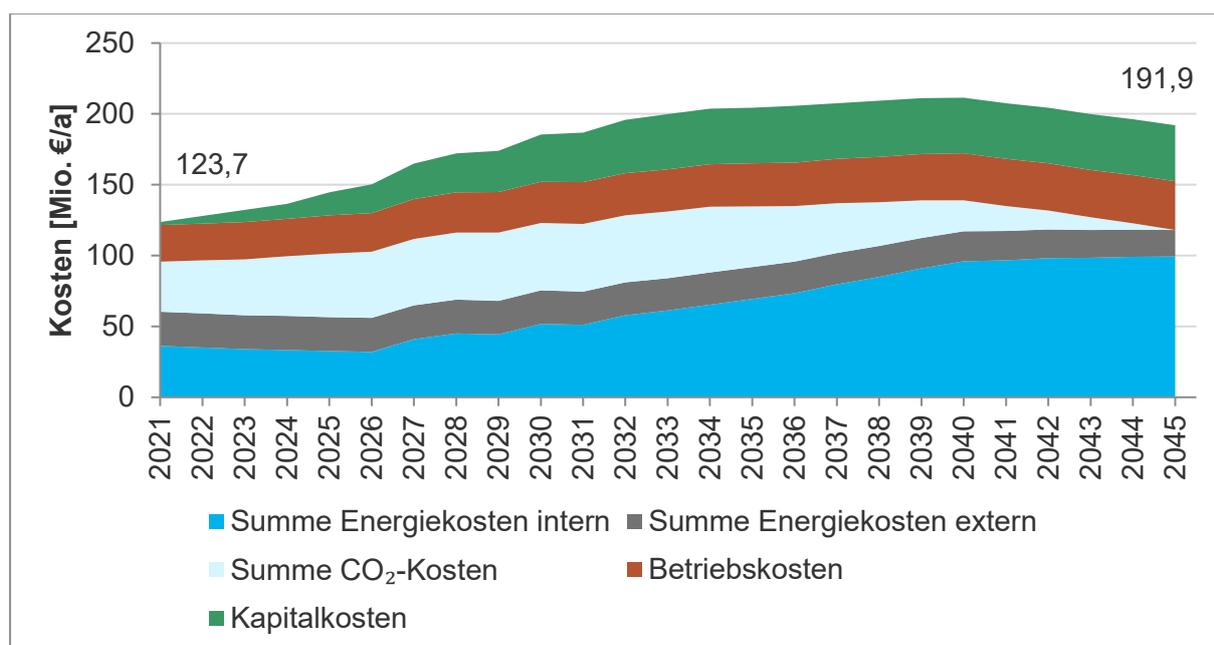


Abbildung 64: Entwicklung der Kosten im Klimaneutralitätspfad (Bezugsgröße: deutsche Kalksandsteinindustrie)

Im Mittel liegen die Kosten im Betrachtungszeitraum bei 182 Mio. EUR/a. Haupttreiber sind zu Beginn CO₂- und Kapitalkosten, später dann Energiekosten, primär bedingt durch den Umstieg auf Strom und Wasserstoff in der Dampferzeugung. Die Kapitalkosten verharren dann auf hohem Niveau, während die CO₂-Kosten, wie beschrieben, absinken und logischerweise zum Ende des Verlaufs völlig verschwinden. Die enorme Steigerung der internen Energiekosten von 36 Mio. EUR/a auf 99 Mio. EUR/a findet trotz einer erheblichen Reduktion des Energieeinsatzes statt. Dies ist zurückzuführen auf die deutlich höheren Kosten für die klimaneutralen Energieträger. Sie überwiegen die Einsparungen bei weitem.

Bei den externen Energiekosten gelingt infolge der noch höheren Einsparungen und trotz der im Vergleich zu Erdgas deutlich höheren Kraftstoffpreise eine Kostenminderung. Die Betriebskosten dagegen steigen von einem Ausgangswert von 25,8 Mio. EUR/a auf

34,5 Mio. EUR/a (34 %) erheblich an. Diese Entwicklungen werden aber von den anderen Kostenbestandteilen überlagert.

Insgesamt ist ein sehr deutlicher Kostenanstieg zum Basiswert zu erkennen, daher müssen geeignete Rahmenbedingungen geschaffen werden, um diese Kosten abzufedern und zumindest teilweise weiterzureichen. Nur dann kann eine erfolgreiche Transformation gelingen.

Zwar zeichnen sich auch die Kapitalkosten für einen relevanten Teil des Anstiegs der Gesamtkosten verantwortlich, aber gerade bei den spezifischen Maßnahmen überwiegen OPEX gegenüber CAPEX. Um entsprechende Anreize für deren Umsetzung zu bieten, sollte das beachtet werden.

In Abbildung 65 werden deutliche Verschiebungen in der Kostenstruktur der energiebedingten Kosten sichtbar. Im Basisjahr sind die direkten Energiekosten in den Werken für merklich weniger als die Hälfte der Kosten verantwortlich. Die externen Energiekosten betragen etwa 2/3 der internen Energiekosten. Zusammen mit den Kosten für Scope 3-Emissionen fällt daher deutlich mehr als die Hälfte der energiebezogenen Kosten extern an und wird indirekt an die Kalksandsteinbranche weitergegeben. Kosten für Scope 1- und 2-Emissionen spielen, wie auch überwiegend im weiteren Verlauf, nur eine untergeordnete Rolle. In den nächsten Jahren steigen die externen Kosten bedingt durch steigende CO₂-Preise merklich an, wohingegen die Kosten für den Energieträgereinsatz in den Werken erst einmal abnehmen. Ab dem Beginn der klimaneutralen Erzeugung von Dampf in den Anlagen beginnen diese Kosten allerdings stark zu steigen und das Verhältnis dreht sich immer weiter um. Zum Ende des Betrachtungszeitraums fallen dann etwa 80 % der energiebedingten Kosten intern an.

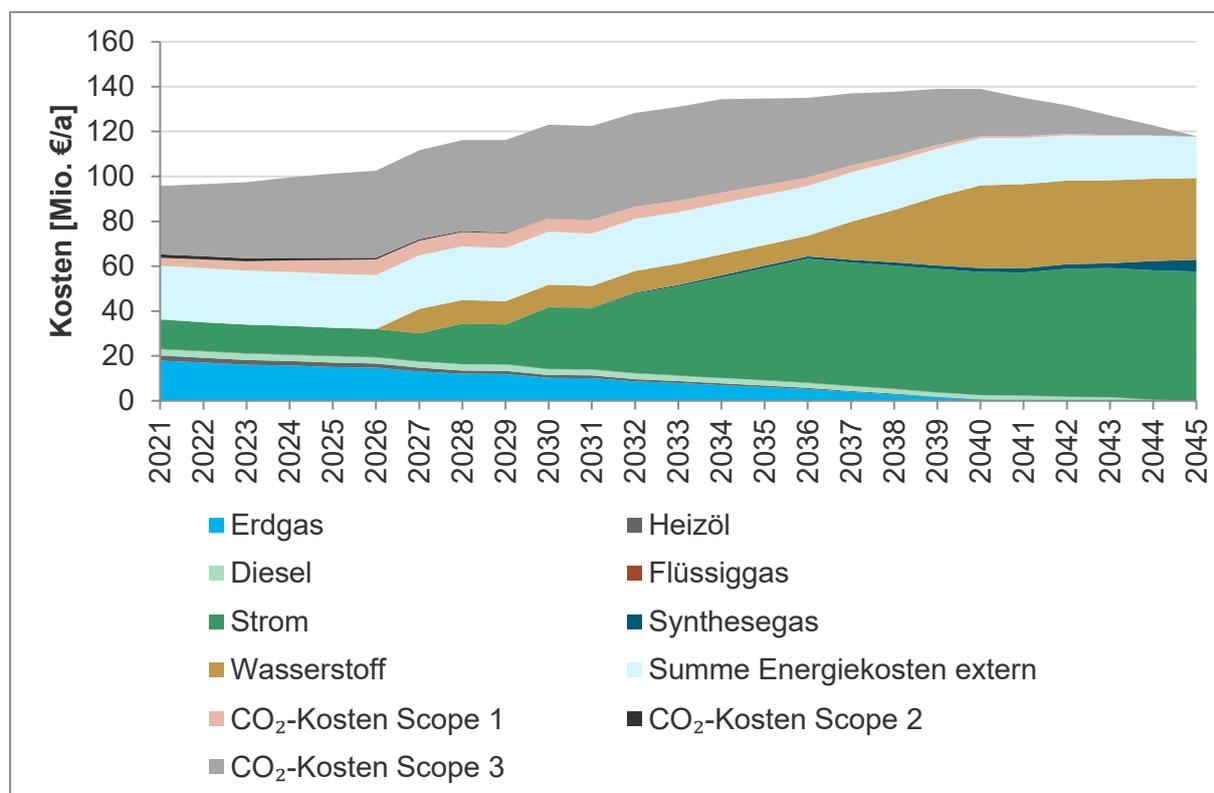


Abbildung 65: Entwicklung der energiebezogenen Kosten im Klimaneutralitätspfad
(Bezugsgröße: deutsche Kalksandsteinindustrie)

Den vermutlich besten Blick auf die steigende Kostenbelastung für die Branche infolge der Transformation zur Klimaneutralität erlaubt Abbildung 66. Ohne den Anteil der kalkbedingten Emissionen haben die CO₂-Kosten insgesamt kaum noch Bedeutung im

Klimaneutralitätspfad. Hierdurch ist das Niveau im Verlauf niedriger, aber der Endwert von 192 Mio. EUR/a ist identisch mit den Gesamtkosten, da 2045 keine Emissionen aus der Kalkherstellung mehr entstehen. Damit verschwindet auch der zwischenzeitliche Kostenpeak aus der Darstellung, die Kosten verharren in den letzten Jahren auf konstant hohem Niveau.

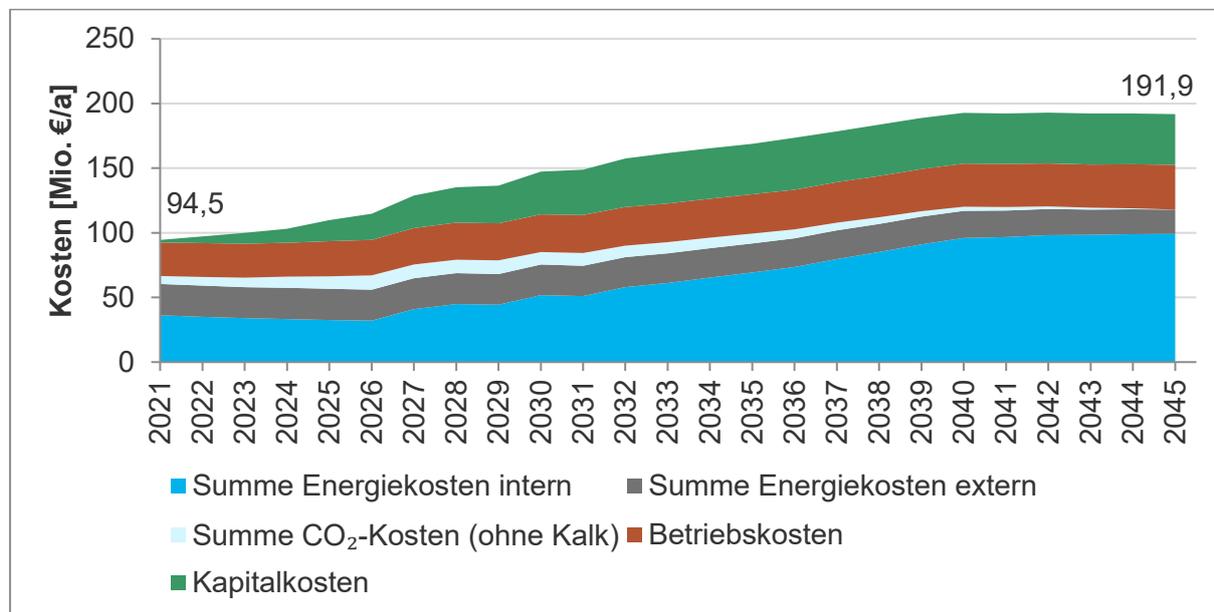


Abbildung 66: Entwicklung der Kosten im Klimaneutralitätspfad - ohne CO₂-Kosten Kalk (Bezugsgröße: deutsche Kalksandsteinindustrie)

Relativ zum Ausgangsniveau ist der Anstieg hier noch deutlich höher. Die jährlichen Kosten verdoppeln sich fast von 94,5 Mio. EUR/a auf 192 Mio. EUR/a. Auch gegenüber dem Referenzpfad entstehen bei dieser Betrachtungsweise im Zieljahr enorme Mehrkosten von 75 Mio. EUR/a. Die mittleren Kosten liegen hier bei 154 Mio. EUR/a. Diese Zahlen machen sehr deutlich, dass eine erhebliche Kostenbelastung auf die Kalksandsteinindustrie zukommt.

8.5 Sensitivitäten

Auch für Pfad 3 wird betrachtet, wie sich Änderungen von externen Rahmenbedingungen auf den Verlauf der Kosten und der Emissionen bzw. auf die Vermeidungskosten der Maßnahmen auswirken.

Die Art der Dampferzeugung ist von elementarer Bedeutung für die Kalksandsteinindustrie, um ihren Beitrag zur Klimaneutralität zu leisten. Bei den Rahmenbedingungen, die dieser Studie zugrunde liegen, sind die Dampferzeugung mit Strom und Wasserstoff die attraktivsten Maßnahmen in diesem Bereich. Unter geänderten Rahmenbedingungen wäre es allerdings auch denkbar, dass ausschließlich die elektrische Dampferzeugung wirtschaftlicher sein kann als die Wasserstoffdampferzeugung oder vice versa. Daher wird untersucht, wie sich die Änderung bestimmter externer Faktoren auf die Vermeidungskosten der beiden genannten Maßnahmen auswirken.

In den nachfolgenden Abbildungen sind die Vermeidungskosten der für Pfad 3 wesentlichen Dampferzeugerarten (elektrisch und Wasserstoff) unter Berücksichtigung der Rahmenbedingungen des Klimaneutralitätspfades abgebildet.

Dort ist gut zu erkennen, dass sich die Vermeidungskosten der beiden Varianten über den zeitlichen Verlauf immer weiter annähern. Der Schnittpunkt der Vermeidungskosten liegt zwischen 2040–2041. Somit ergibt sich für Pfad 3 ein Technologiemic, um Klimaneutralität zu erreichen.

Dadurch, dass die Vermeidungskosten recht nahe beieinander liegen, können veränderte Strom- und auch Wasserstoffpreise eine Verschiebung des Technologiemic verursachen. Dies wird in den nachfolgenden Sensitivitäten betrachtet.

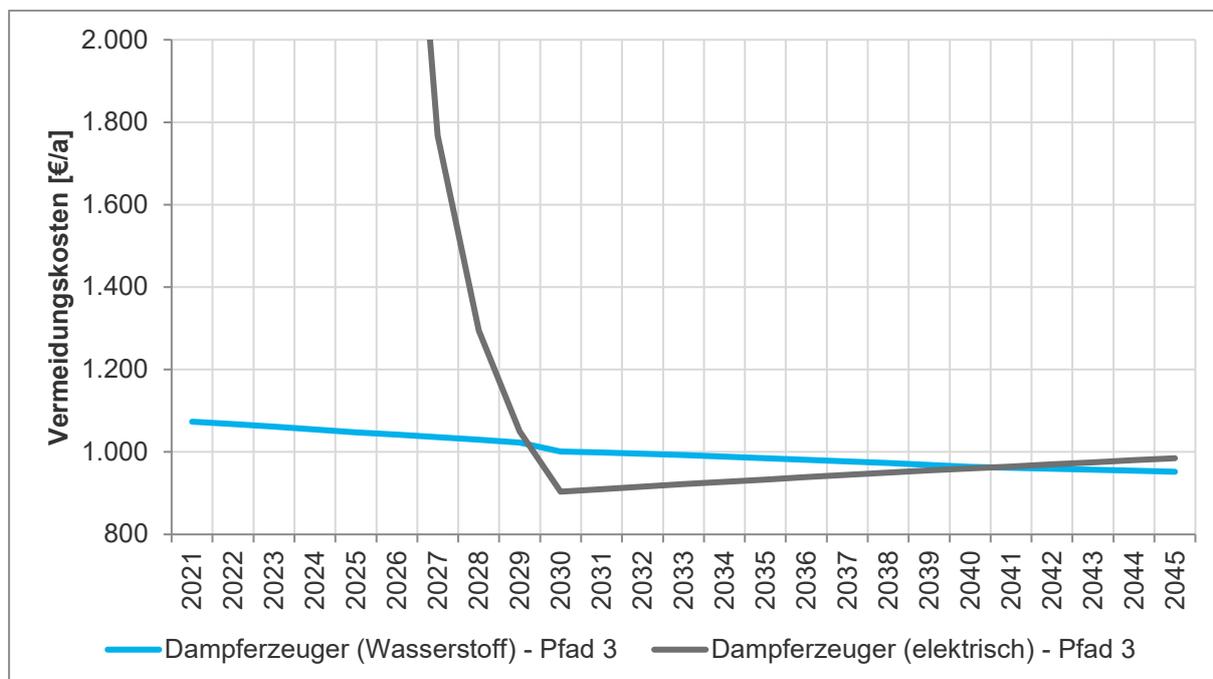


Abbildung 67: Vergleich der Vermeidungskosten des elektrischen und Wasserstoff-Dampferzeugers unter den Annahmen von Pfad 3

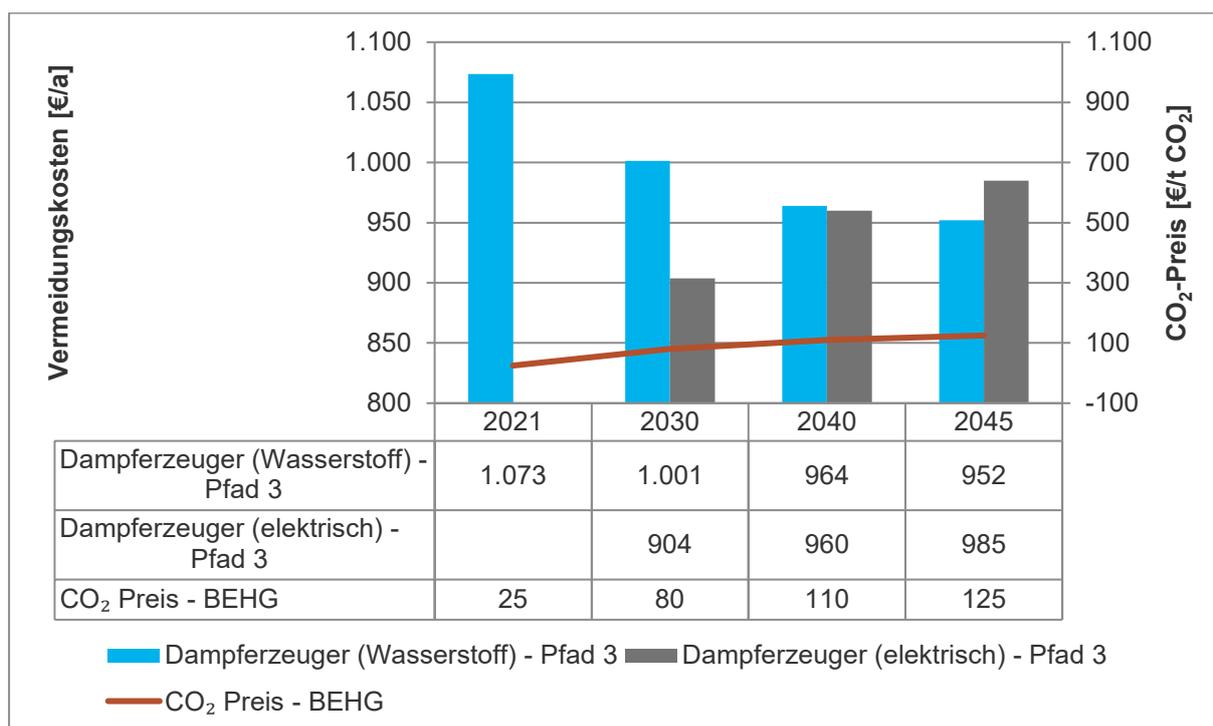


Abbildung 68: Vergleich der Vermeidungskosten des elektrischen und Wasserstoff-Dampferzeugers unter den Annahmen von Pfad 3 und den CO₂-Preisen

8.5.1 Sensitivität – höhere CO₂-Preise

Analog zum Pionierpfad führen auch im Klimaneutralitätspfad höhere CO₂-Preise (Erhöhung um 20 EUR) zu keinen Änderungen bei der Umsetzung der Maßnahmen. Somit bleibt der Verlauf der Emissionen unverändert.

Die CO₂-Kosten steigen um rund 20 % (2030) gegenüber den CO₂-Kosten aus Pfad 3. Die Gesamtkosten liegen ca. 6 % höher.

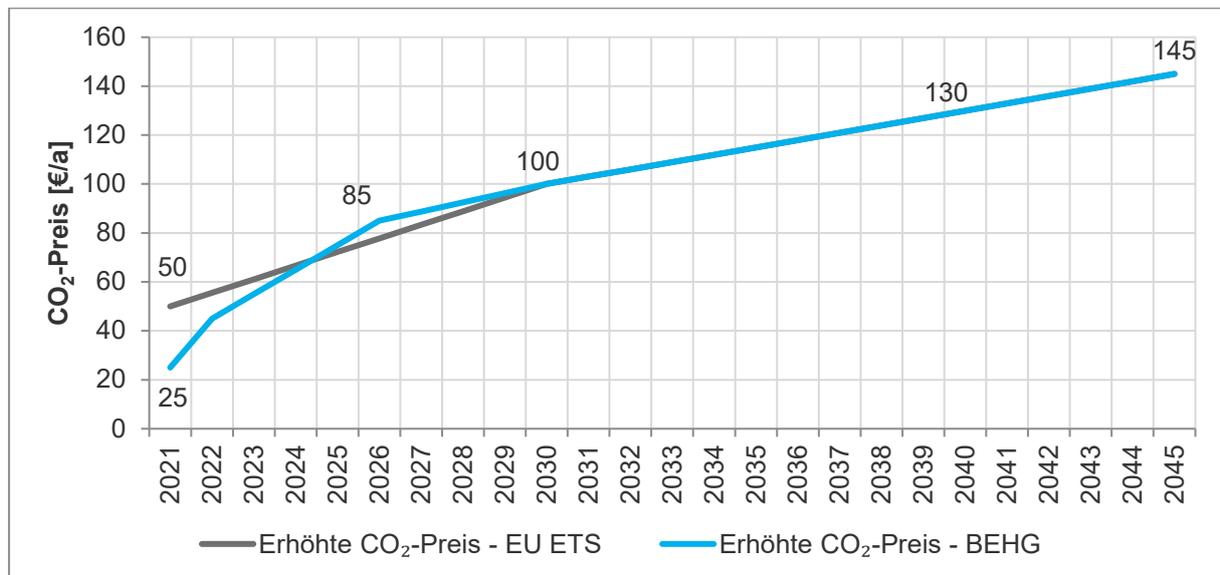


Abbildung 69: Verlauf der erhöhten CO₂-Preise

8.5.2 Sensitivität – höhere CO₂-Preise und Verringerung der EEG-Umlage

Die wesentliche Entscheidung auf dem Weg zur Klimaneutralität ist, wie mit der Dampferzeugung umgegangen wird. Zwar handelt es sich in der Realität hier sicherlich um eine Einzelfallentscheidung, die werksspezifisch zu behandeln ist, aber diese Entscheidung wird von externen Rahmenbedingungen maßgeblich beeinflusst. Ein, wenn nicht der maßgebliche Faktor beim Vergleich der beiden Maßnahmen ist der Strompreis.

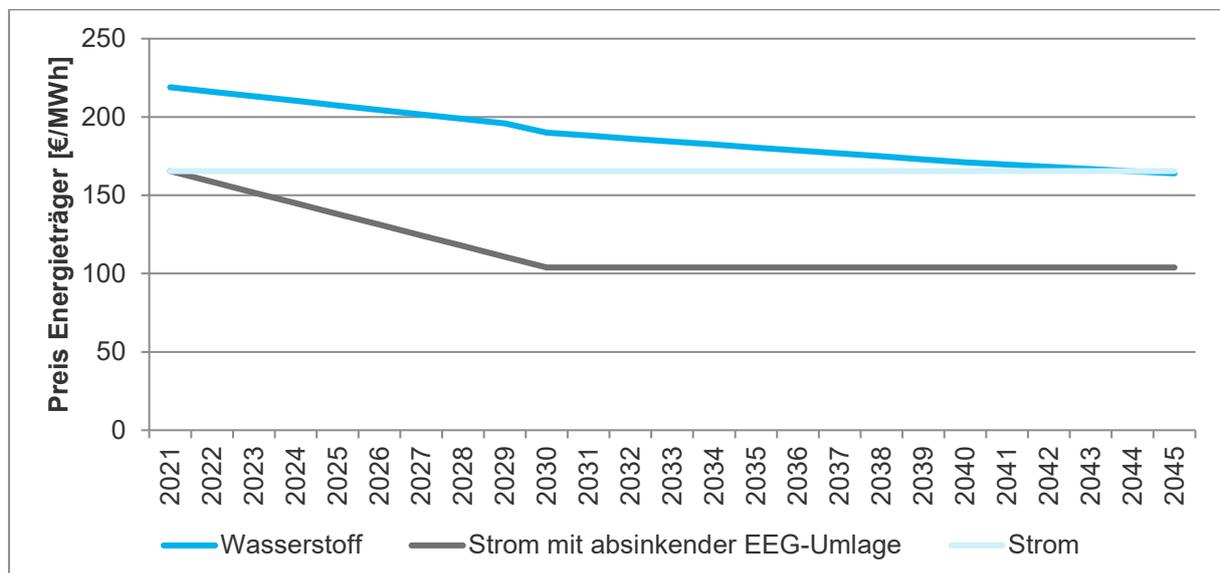


Abbildung 70: Vergleich der Energiepreise

Der günstigere Strompreis durch das angenommene Abschmelzen der EEG-Umlage (bis 2030 auf null) führt dazu, dass die Vermeidungskosten des elektrischen Dampferzeugers gegenüber Pfad 3 deutlich absinken und den (erhöhten) CO₂-Preisen aus beiden Systemen näher kommt. Jedoch liegen die Vermeidungskosten immer noch deutlich über dem Preisniveau (vgl. Abbildung 71). 2030 liegen die Vermeidungskosten bei rund 600 EUR verglichen zu 900 EUR unter den Rahmenbedingungen aus Pfad 3. Die Verringerung der Stromkosten führt damit zu einer erheblichen Minderung der Vermeidungskosten. Aber auch hier kommt es bei Umsetzung der Maßnahme noch zu erheblichen Mehrkosten gegenüber dem aktuellen Stand.

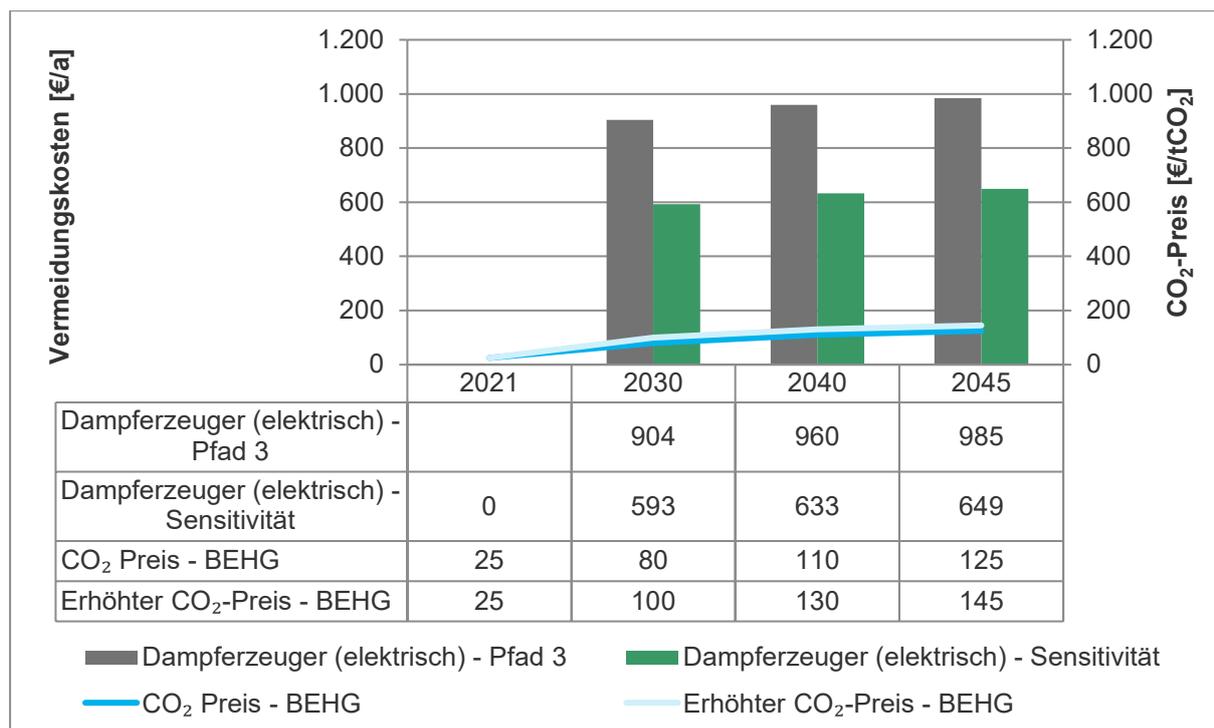


Abbildung 71: Gegenüberstellung der Vermeidungskosten des elektrischen Dampferzeugers unter Annahmen von Pfad 3 und der betrachteten Sensitivität (Höhere CO₂-Preise und Verringerung der EEG-Umlage)

Zudem führen die geringeren Stromkosten zu einer Verschiebung des Technologiemitx gegenüber den Annahmen in Pfad 3. Die Vermeidungskosten des Wasserstoff- und elektrischen Dampferzeugers nähern sich zwar auch in dieser Betrachtung an, es kommt jedoch bis 2045 zu keinem Schnittpunkt der Vermeidungskosten.

Somit bleibt der elektrische Dampferzeuger in diesem Szenario attraktiver und wird in allen 76 Werken umgesetzt. Die Vermeidungskosten liegen im Schnitt 350 EUR/t niedriger. Die Investitionskosten des elektrischen Dampferzeugers fallen mit 2 Mio. EUR deutlich höher aus als beim Wasserstoffdampferzeuger. Somit steigt das benötigte Investitionsbudget für spezifische Maßnahmen von 7,5 Mio. EUR/a (Pfad 3) auf 8,5 Mio. EUR/a, um bis 2045 die Klimaneutralität zu erreichen.

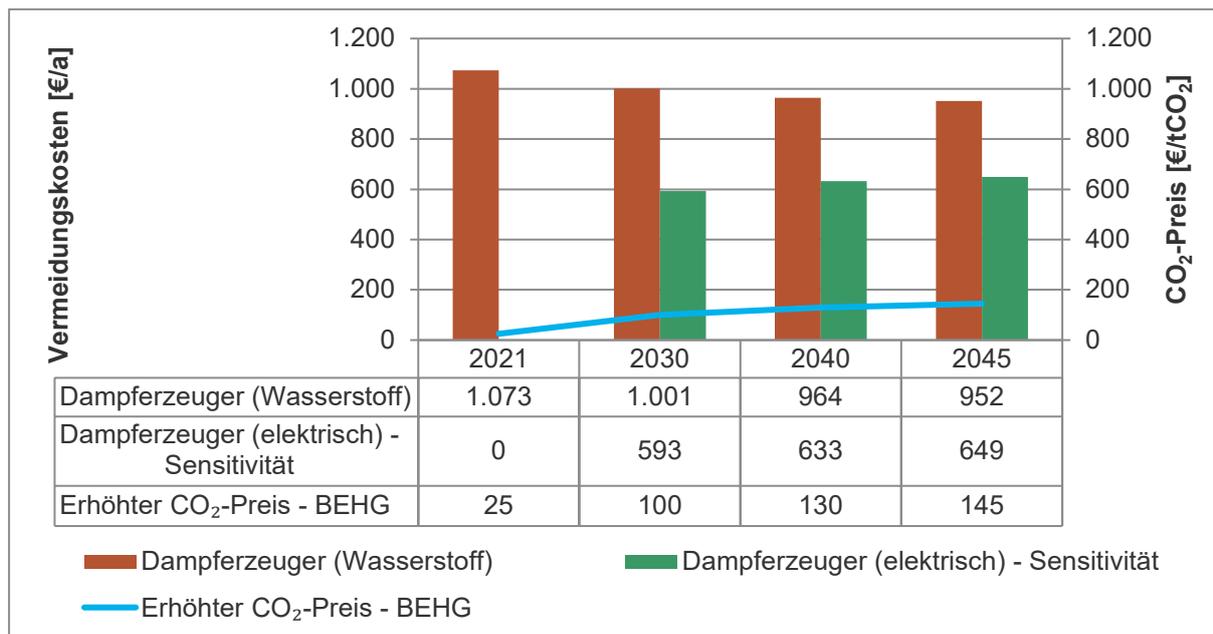


Abbildung 72: Gegenüberstellung der Vermeidungskosten des elektrischen und Wasserstoff-Dampferzeugers unter Annahmen der Sensitivität (höhere CO₂-Preise und Verringerung der EEG-Umlage)

Der Emissionsverlauf ändert sich durch den Technologiewechsel nicht. Aus Kostensicht ergeben sich dagegen deutliche Unterschiede. Da ein höheres Investitionsvolumen für die Umsetzung der spezifischen Maßnahmen erforderlich ist, liegen auch die Kapitalkosten in diesem Szenario um 4,7 % (2045) über denen von Pfad 3.

Auch die CO₂-Kosten steigen gegenüber Pfad 3 an (2030: +24 %), wobei diese durch die Klimaneutralität 2045 keine Rolle mehr spielen. Trotz dem Anstieg der Kapital- und CO₂-Kosten sinken die gesamten Kosten durch den im Vergleich zu Wasserstoff günstigeren Energieträger Strom. Dies ist zurückzuführen auf die Absenkung der EEG-Umlage in dieser Sensitivität bis 2030 auf null. 2045 sinken die Energiekosten um rund 38 % im Vergleich zu Pfad 3. Die Gesamtkosten liegen um rund 21 % niedriger (vgl. Tabelle 16).

Tabelle 16: Übersicht zu den prozentualen Veränderungen der Kosten (Sensitivität mit höheren CO₂-Preisen und Verringerung der EEG-Umlage) ggü. Pfad 3

Kosten Erhöhungen/Einsparungen ggü. Pfad 3	2030	2045
Energiekosten intern	-26,1%	-37,5%
CO₂-Kosten	24,2%	-
Betriebskosten	-1,2%	-6,3%
Kapitalkosten	4,2%	4,7%
Summe ohne Kalk	-7,4%	-21,1%
Summe	-0,8%	-21,1%
Gesamte Investition	4,6%	

8.5.3 Sensitivität – 100 % Grünstrom erst ab 2045

Relevant für die zuvor betrachtete Sensitivität ist, dass bereits 2030 100 % Grünstrom zum Einsatz kommt. Der Grünstromeinsatz ist entscheidender Treiber der Entwicklung der Vermeidungskosten für den elektrischen Dampferzeuger. Derartige Effekte gilt es bei Entscheidungen für bestimmte Maßnahmen zu berücksichtigen. Entwicklungen bei den Emissionsfaktoren sollten daher bei Investitionsentscheidungen auf Basis von Vermeidungskosten immer auch miteinbezogen werden.

Betrachtet man die Rahmenbedingungen von Pfad 3 mit der Annahme, dass erst 2045 100 % Grünstrom bezogen wird, liegen die Vermeidungskosten des elektrischen Dampferzeugers deutlich über denen von Pfad 3. Dies führt sogar dazu, dass der elektrische Dampferzeuger bis 2032 ggü. dem erdgasbefeuerten Dampferzeuger keinerlei CO₂-Einsparungen erzielt (vgl. Abbildung 73).

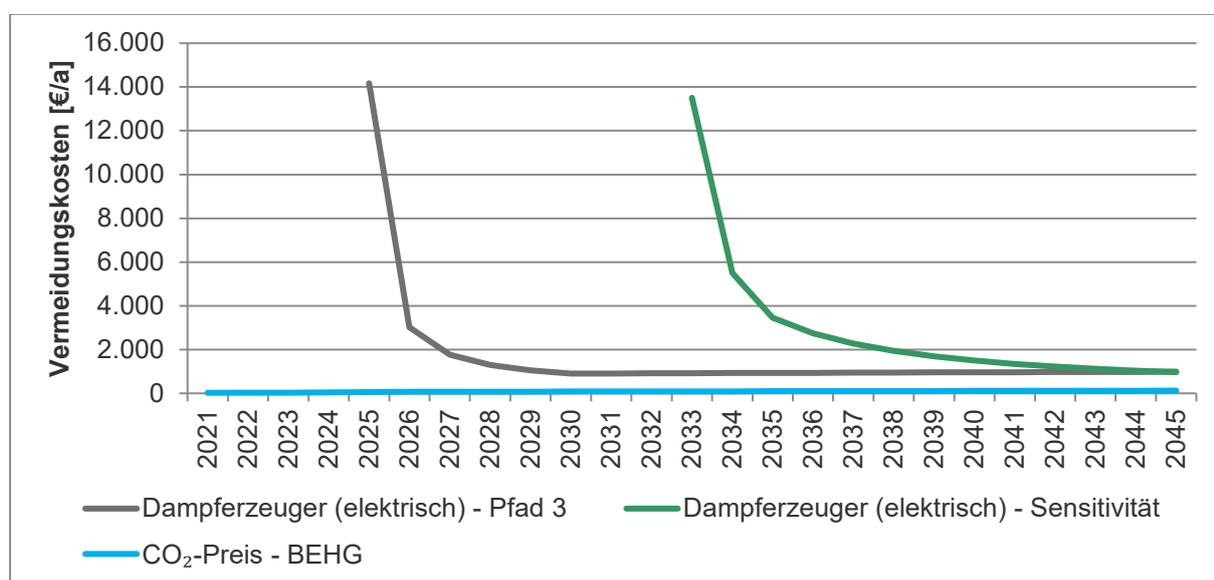


Abbildung 73: Gegenüberstellung der Vermeidungskosten des elektrischen Dampferzeugers unter Annahmen von Pfad 3 und der betrachteten Sensitivität (100 % Grünstrom erst ab 2045)

Der späte Einsatz von 100 % Grünstrom führt dazu, dass der Wasserstoffdampferzeuger bis 2045 geringere Vermeidungskosten als der elektrische aufweist (vgl. Abbildung 74). 2040 liegen die Vermeidungskosten des elektrischen Dampferzeugers bei 1.500 EUR, die des wasserstoffbetriebenen Dampferzeugers nur bei rund 960 EUR. Somit würde unter diesen Rahmenbedingungen in der Modellierung nur der Wasserstoffdampferzeuger zum Einsatz kommen. Das führt zu, dass die gesamten Investitionen um rund 5 % sinken gegenüber Pfad 3.

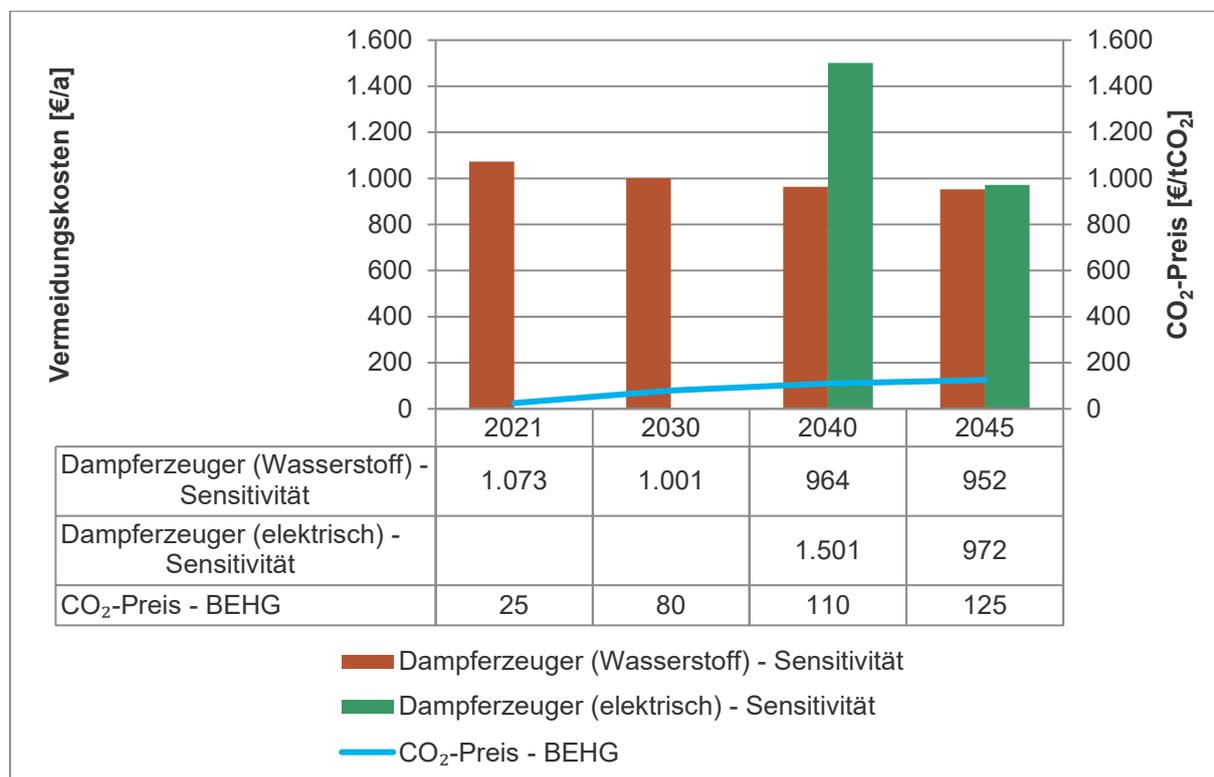


Abbildung 74: Gegenüberstellung der Vermeidungskosten des elektrischen und Wasserstoff-Dampferzeugers unter Annahmen der Sensitivität (100 % Grünstrom erst ab 2045)

Tabelle 17: Übersicht zu den prozentualen Veränderungen der Kosten (Sensitivität mit 100 % Grünstrom erst ab 2045) ggü. Pfad 3

Kosten Erhöhungen/Einsparungen ggü. Pfad 3	2030	2045
Energiekosten intern	2,2 %	-0,2 %
CO₂-Kosten	0,2 %	-
Betriebskosten	1,6 %	4,7 %
Kapitalkosten	-5,3 %	-6,6 %
Summe ohne Kalk	0,0 %	-0,6 %
Summe	0,0 %	-0,6 %
Gesamte Investition	-5,0 %	

8.5.4 Sensitivität – Halbierung Preis Wasserstoff

Auch der angesetzte Wasserstoffpreis treibt die Entwicklungen im Rahmen der Studie. Unter den Rahmenbedingungen aus Pfad 3 liegen die Vermeidungskosten der zwei Dampferzeugervarianten dicht beieinander. Sollten die Entwicklungen der Infrastruktur und des Transports für Wasserstoff deutlich schneller vorangetrieben werden und der Preis sich z. B. dadurch halbieren, wird diese Lösung wie auch im Szenario zuvor für die Dampferzeugung am attraktivsten.

Die Vermeidungskosten des Wasserstoffdampferzeugers nähern sich unter diesen Rahmenbedingungen den CO₂-Preisen deutlich an – verglichen mit den Annahmen aus Pfad 3. Dort betragen sie um die 1.000 EUR. Trotz der deutlichen Senkung bei Halbierung der Wasserstoffpreise liegen die Vermeidungskosten immer noch in einer Größenordnung zwischen 400 EUR und 600 EUR. Damit verursacht der Einsatz der Wasserstoffdampferzeuger auch in dieser Betrachtung noch erhebliche Mehrkosten.

Es ist somit absehbar, dass Investitionen in wasserstoffbasierte Lösungen erst dann getätigt werden können, wenn ein nachhaltig stabiles und konkurrenzfähiges Preisniveau für Wasserstoff garantiert ist.

Wie im Szenario zuvor werden beim ausschließlichen Einsatz von Wasserstoffdampferzeugern geringere Investitionen benötigt. Die geringeren Energiekosten führen zudem zu deutlichen Kostensenkungen, verglichen mit dem Klimaneutralitätspfad aber immer noch erheblichen Steigerungen zum Ausgangsniveau.

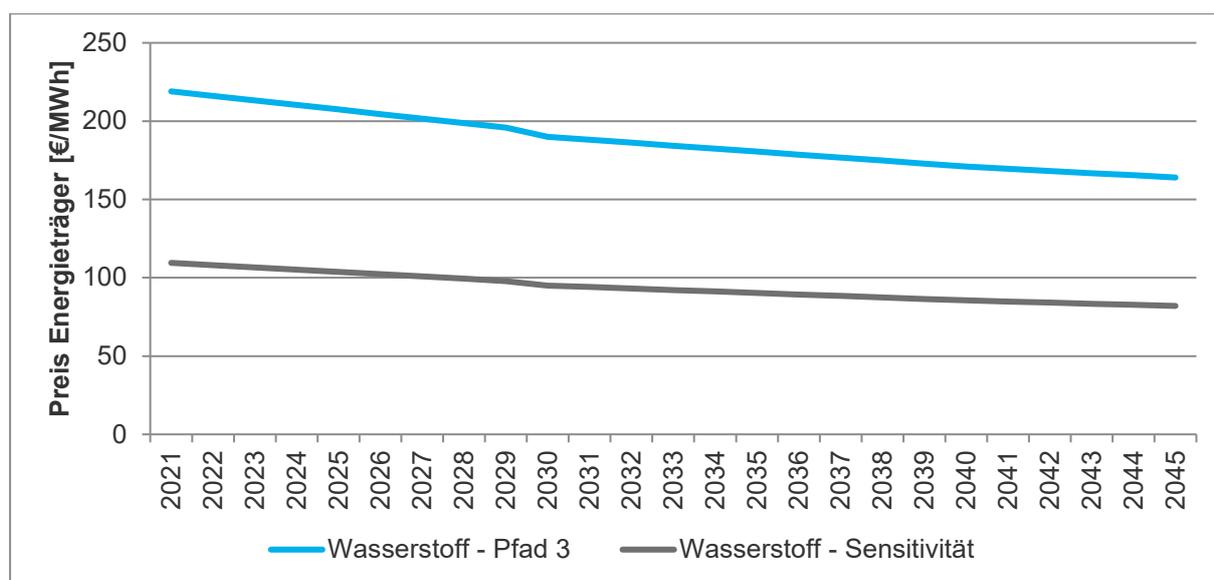


Abbildung 75: Vergleich der Wasserstoffpreise aus Pfad 3 und der Sensitivität (Halbierung Preis Wasserstoff)

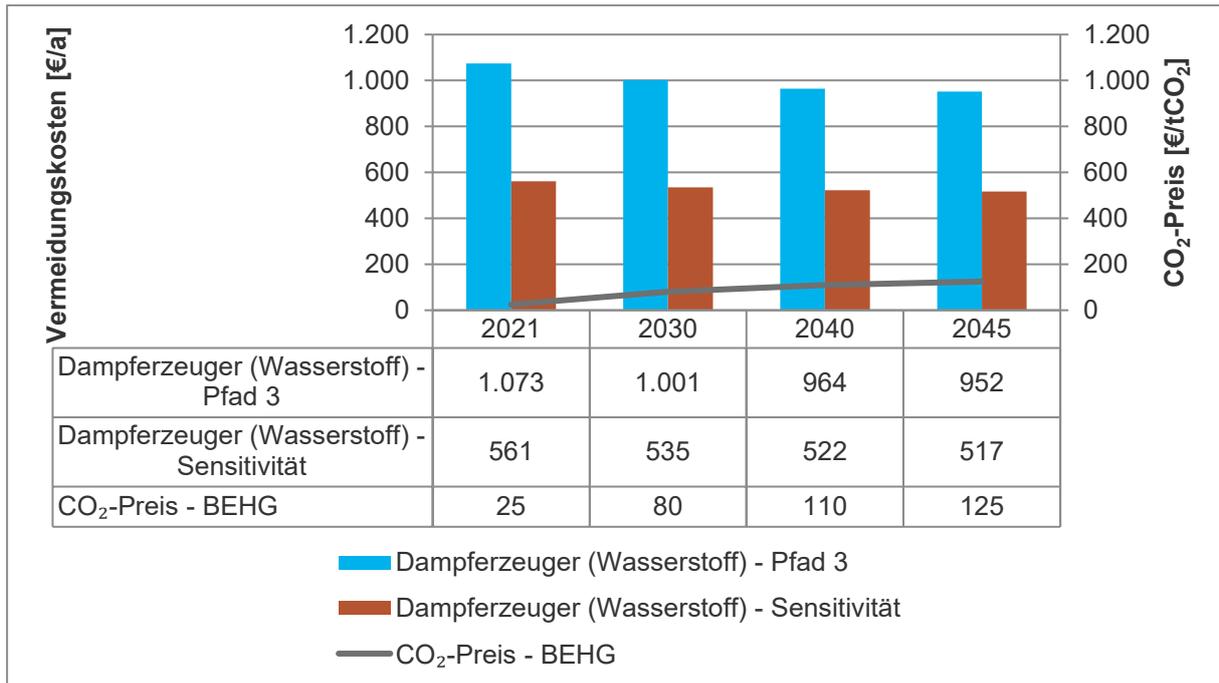


Abbildung 76: Gegenüberstellung der Vermeidungskosten des Wasserstoff-Dampferzeugers unter Annahmen von Pfad 3 und der betrachteten Sensitivität (Halbierung Preis Wasserstoff)

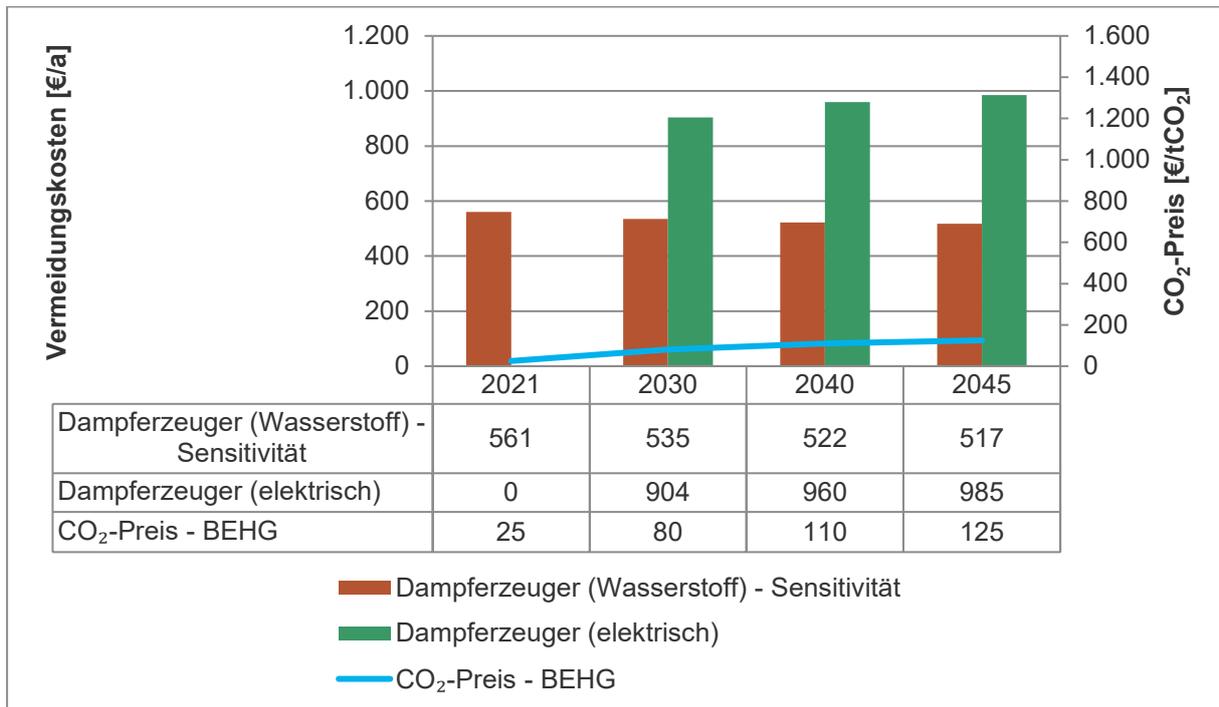


Abbildung 77: Gegenüberstellung der Vermeidungskosten des elektrischen und Wasserstoff-Dampferzeugers unter Annahmen der Sensitivität (Halbierung Preis Wasserstoff)

Die Betrachtung der Sensitivitäten zeigt, dass externe Faktoren wichtige Einflüsse auf die Minderungsmaßnahmen der Kalksandsteinindustrie haben können. Um einen effizienten Weg zur Treibhausgasneutralität beschreiten zu können, ist es notwendig, die dafür unabdingbaren Rahmenbedingungen so früh wie möglich zu schaffen und deren Fortbestehen zu garantieren. Nur so kann es gelingen, die Gesamtkosten der Transformation zu minimieren. Wesentliche Treiber hierbei sind die Energiekosten für Strom und Wasserstoff sowie der Ausbau von regenerativer Stromerzeugung in Deutschland.

8.6 Wesentliche Erkenntnisse

Klimaneutralität ist für die deutsche Kalksandsteinindustrie möglich. Die dafür notwendigen Maßnahmen sind bekannt und auch technisch bis 2045 umsetzbar. Eine tatsächliche Realisierung dieses Pfades hängt an den geeigneten Rahmenbedingungen und auch Förderungen. Auch bis 2030 kann die Branche bereits zu erheblichen Minderungen vor allem in Scope 1 und 2 (-55 %) beitragen.

Haupttreiber für Minderungen in den Werken ist die Umstellung der Wärmeerzeugung vom Einsatz fossiler Brennstoffe auf Wasserstoff und Strom. Die Emissionsentwicklung im Scope 3 hängt stark von den Entwicklungen in der Kalkherstellung ab.

Der Klimaneutralitätspfad hat einen erheblichen Kostenanstieg zur Folge, der in erster Linie durch die hohen Kosten für klimaneutrale Energieträger bedingt ist. Höhere Kosten für Emissionsminderungen in der Herstellung von Branntkalk sind hier nicht berücksichtigt und würden eine noch höhere Belastung mit sich bringen. Es gilt daher geeignete Rahmenbedingungen zu schaffen und Maßnahmen zu ergreifen, um wirtschaftliche Anreize für ein Beschreiten dieses Pfades zu setzen.

Eine wesentliche Erkenntnis in Hinblick auf die spezifischen Maßnahmen zur Emissionsreduktion in der Kalksandsteinindustrie ist: OPEX überwiegen CAPEX. Dies gilt es bei der Schaffung geeigneter Fördermechanismen zu berücksichtigen. Investitionsförderungen sind in jedem Falle hilfreich, aber reichen allein in den meisten Fällen für eine wirtschaftliche Umsetzung nicht aus. Kostensenkungen für klimaneutrale Energieträger sind dagegen ein zentraler Hebel zur beschleunigten Umsetzung von Maßnahmen.

Die Kalksandsteinindustrie kann unter geeigneten Voraussetzungen interne Lösungen zur Klimaneutralität vorantreiben und diese auch erreichen. Für das Produkt als Ganzes ist die Vorkette Kalk weiterhin von erheblicher Bedeutung. Gelingen dort die angestrebten Reduktionen, wird die Branche sogar klimapositiv.

Wie im Pionierpfad gilt: steigende Kosten müssen an Kunden weitergegeben werden können und ein funktionierende Carbon Leakage Schutz ist zwingend notwendig.

8.7 Steckbrief Klimaneutralitätspfad (Pfad 3)

Tabelle 18: Steckbrief Klimaneutralitätspfad (Bezugsgröße: deutsche Kalksandsteinindustrie)

Klimaneutralitätspfad (Pfad 3)	
Beschreibung Maßnahmen	<p>Maßnahmen Pfad 1:</p> <ul style="list-style-type: none"> kontinuierliche Effizienzsteigerung beim Einsatz der Energieträger Reduktion Emissionsfaktoren Strom und Erdgas <p>Zusätzliche Maßnahmen (nicht abschließend)</p> <ul style="list-style-type: none"> Austausch inkl. Brennstoffwechsel Dampferzeuger Umsetzung Wärmemanagement Ersatz Wärmespeicher Umstellung (Werks-)Verkehr Reduktion Kalkgehalt auf 5 % bis 2045 Reduktion Emissionsfaktor Kalk auf null
Emissionsentwicklung ohne Recarbonisierungseffekte	
<p>Emissionsentwicklung bis 2030:</p> <ul style="list-style-type: none"> Senkung auf 595 Tsd. t CO₂ <p>Emissionsentwicklung bis 2045:</p> <ul style="list-style-type: none"> Senkung auf 0 t CO₂ Zusätzlich 738 Tsd. t CO₂ Minderungen ggü. Referenzpfad 	
Emissionsentwicklung mit Recarbonisierungseffekten	
<p>Emissionsentwicklung bis 2030:</p> <ul style="list-style-type: none"> Senkung auf 532 Tsd. t CO₂ <p>Emissionsentwicklung bis 2045:</p> <ul style="list-style-type: none"> Senkung auf -149 Tsd. t CO₂ Zusätzlich 717 Tsd. t CO₂ Minderungen ggü. Referenzpfad 	
<p>Wesentliche Einflussfaktoren auf Emissionsentwicklung:</p> <ul style="list-style-type: none"> Ersatz fossiler Brenn- und Kraftstoffe durch Strom und Wasserstoff Reduktion Kalkgehalt im Stein Reduktion Emissionsfaktor Strom durch frühen Grünstrombezug Reduktion Emissionsfaktor Kalk 	

Klimaneutralitätspfad (Pfad 3)	
Kostenentwicklung inkl. CO ₂ -Kosten Kalk	
<p>Kostenentwicklung (energiebezogen):</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ mittlere Kosten Ø 2021–2045: 182 Mio. €/a ▪ Kosten Zieljahr 2045: 192 Mio. €/a ▪ Zusätzliche 2 Mio. €/a ggü. Referenzpfad ▪ Gesamtinvestitionskosten: 536 Mio. € ▪ Zusätzliche Investitionskosten ggü. Referenzpfad: 298 Mio. € 	
Kostenentwicklung ohne CO ₂ -Kosten Kalk	
<p>Kostenentwicklung (energiebezogen):</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ mittlere Kosten Ø 2021–2045: 154 Mio. €/a ▪ Kosten Zieljahr 2045: 192 Mio. €/a ▪ Zusätzliche 75 Mio. €/a ggü. Referenzpfad ▪ Gesamtinvestitionskosten: 536 Mio. € ▪ Zusätzliche Investitionskosten ggü. Referenzpfad: 298 Mio. € 	
<p>Wesentliche Einflussfaktoren auf Kostenentwicklung:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ hohen Wasserstoff- und Stromkosten ▪ steigende Kapitalkosten für Investitionen in Effizienzmaßnahmen und neue Technologien 	
<p>Wesentliche Hemmnisse:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ hohe Vermeidungskosten ▪ massive Energieträgerkosten ▪ hoher Investitionsbedarf unter unsicheren Rahmenbedingungen 	

9 Gegenüberstellung der Ergebnisse

Unter den gegebenen Parametern steigen in allen Pfaden die Kosten relevant gegenüber dem Ausgangswert an. Im Referenz- und auch Pionierpfad sind die Kosten für Emissionen aus dem Kalk ein sehr wesentlicher Treiber hierfür. Ohne diesen Kostenanteil hebt sich dagegen der Klimaneutralitätspfad kostenseitig deutlich nach oben ab. Dies wird vor allem wegen der hohen Strom-, Wasserstoff- und Kapitalkosten verursacht.

Mit Berücksichtigung der CO₂-Kosten aus Kalk ist der Pionierpfad bereits günstiger als der Referenzpfad und führt gleichzeitig zu geringeren Emissionen. In diesem Pfad werden jedoch bereits Maßnahmen mit sehr hohen Vermeidungskosten (deutlich über dem Niveau von CO₂-Preisen) umgesetzt. Förderungen können daher den Verlauf beschleunigen und die Wirtschaftlichkeit erhöhen.

Klimaneutralität kann mit den angenommenen Rahmenbedingungen erzielt werden, im günstigsten Falle ist die Branche sogar klimapositiv. Dies ist jedoch mit erheblichen Anstrengungen verbunden und erfordert geeignete Rahmenbedingungen und Förderungen.

Tabelle 19: Gegenüberstellung der Ergebnisse der Pfade – gesamte deutsche Kalksandsteinindustrie

	Kosten in Mio. EUR/a				Investition ges. in Mio. EUR	CO ₂ -Emissionen in Tsd. t/a			Rec. Effekt gesamt in Tsd. t CO ₂
	Basis 2021	Mit Kalk 2045	Ohne Kalk 2045	Mittlere Kosten 2021-2045		Basis 2021	2045 ohne Rec.	2045 mit Rec.	
Referenzpfad	123,7	189,8	117,0	163,0	237,5	798,3	738,0	567,6	-8.877,7
Pionierpfad	123,7	163,6	122,0	153,3	341,8	798,3	441,9	282,1	-8.149,7
Klimaneutralitätspfad	123,7	191,9	191,9	181,9	535,9	798,3	0	-149,1	-7.606,4

Die nachfolgende Tabelle fasst die Ergebnisse für das definierte virtuelle Durchschnittswerk zusammen.

Tabelle 20: Gegenüberstellung der Ergebnisse der Pfade – virtuelles Durchschnittswerk

	Kosten in Mio. EUR/a				Investition ges. in Mio. EUR	CO ₂ -Emissionen in Tsd. t/a			Rec. Effekt gesamt in Tsd. t CO ₂
	Basis 2021	Mit Kalk 2045	Ohne Kalk 2045	Mittlere Kosten 2021-2045		Basis 2021	2045 ohne Rec.	2045 mit Rec.	
Referenzpfad	1,6	2,5	1,5	2,1	3,1	10,5	9,7	7,5	-116,8
Pionierpfad	1,6	2,2	1,6	2,0	4,5	10,5	5,8	3,7	-107,2
Klimaneutralitätspfad	1,6	2,5	2,5	2,4	7,1	10,5	0	-2,0	-100,1

9.1 Treibhausgasminderung

Abbildung 78 zeigt die Entwicklung der Treibhausgasemissionen für die betrachteten Transformationspfade im direkten Vergleich. In dieser Darstellung sind die Effekte aus der Recarbonatisierung nicht berücksichtigt. Im Referenzpfad erfolgt eine stetige, aber langsame Reduktion der CO₂-Emissionen. Der Pionierpfad folgt grundsätzlich einem ähnlichen Verlauf, wobei die Linie etwas steiler absinkt. Dies ist vor allem auf die ambitionierten Investitionen in spezifische Maßnahmen mit hohen Vermeidungskosten zurückzuführen. Zu Beginn erfolgt in den zwei Pfaden vor allem eine Reduktion der Emissionen aufgrund der Effizienzsteigerungen (inkl. Dampferzeuger). Das stärkere Absinken im Pionierpfad erfolgt durch die zusätzlichen Effekte aus der Digitalisierung der Prozesse, der kontinuierlichen Umsetzung von Wärmemanagementmaßnahmen, sowie dem Einsatz von Wasserstoff in der Dampferzeugung ab 2035. Im Klimaneutralitätspfad sticht vor allem der Knick ab 2035 hervor. Ab diesem Zeitpunkt erfolgen weitere starke Emissionsreduktionen. Diese sind vor allem auf die Annahmen zum Emissionsfaktor Kalk zurückzuführen.

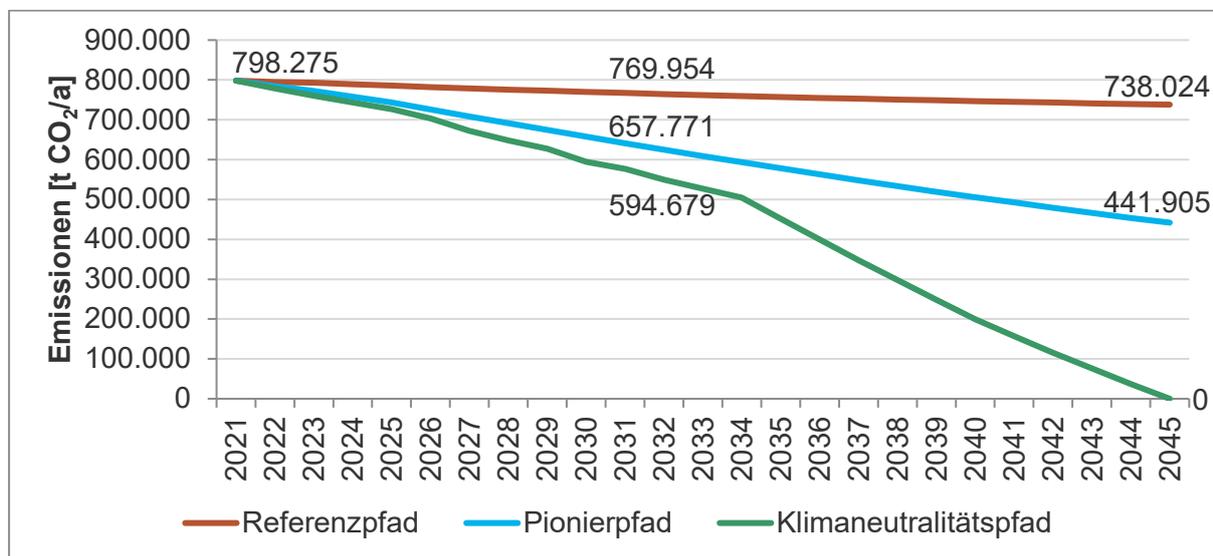


Abbildung 78: Entwicklung der CO₂-Emissionen bis 2045 ohne Recarbonisierungseffekte – Gegenüberstellung aller drei Pfade (Bezugsgröße: deutsche Kalksandsteinindustrie)

Wird der Recarbonatisierungseffekt berücksichtigt, folgen alle drei Pfade grundsätzlich einem ähnlichen Verlauf wie zuvor beschrieben, wobei die Linien etwas nach unten verschoben sind. Dies führt im Klimaneutralitätspfad dazu, dass die Branche klimapositiv wird.

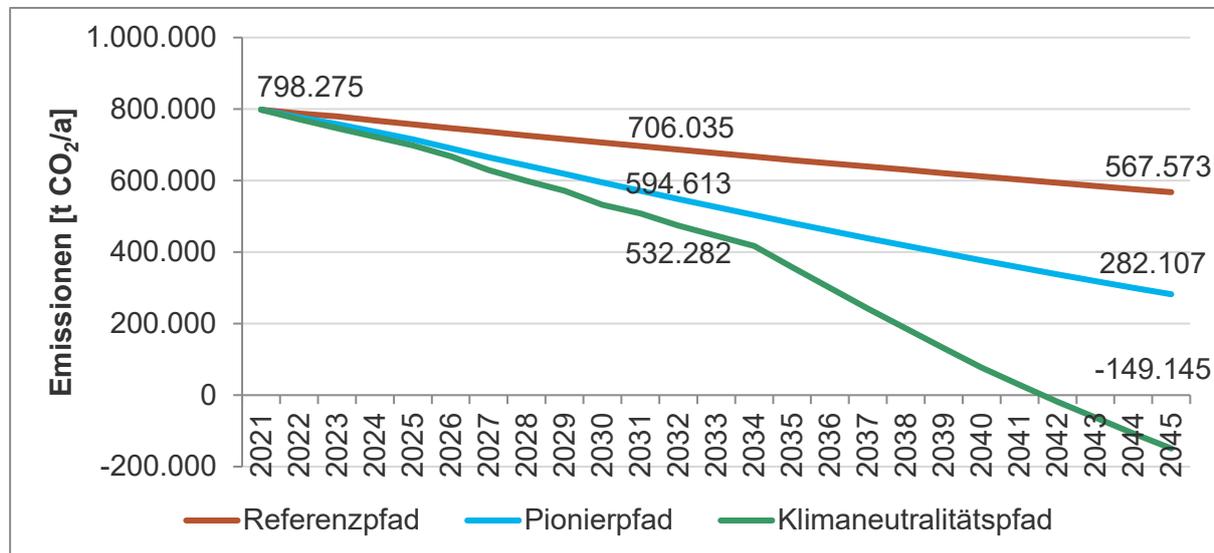


Abbildung 79: Entwicklung der CO₂-Emissionen bis 2045 inkl. Recarbonatisierungseffekten – Gegenüberstellung aller drei Pfade (Bezugsgröße: deutsche Kalksandsteinindustrie)

9.2 Investitionsbedarf

Im Betrachtungszeitraum fallen relevante Investitionen an, die notwendig sind, um die beschriebenen Emissionsminderungen zu erzielen (wie in Tabelle 19 aufgeführt). Hierbei ist zu berücksichtigen, dass diese Investitionen zur Erreichung der Klimaneutralität zusätzlich zu den ohnehin notwendigen Investitionen der Kalksandsteinindustrie zu leisten sind. Im Referenzpfad fallen 238 Mio. EUR für die Effizienzsteigerungen und Austausch der Dampferzeuger an. Im Pionierpfad werden kumulierte Mehrinvestitionen von 194 Mio. EUR gegenüber dem Referenzpfad benötigt. Im Klimaneutralitätspfad steigen die Investitionen über den gesamten Zeitraum um 298 Mio. EUR an. Ein relevanter Anteil wird für den Ersatz der Dampferzeuger benötigt, welche im Klimaneutralitätspfad aus einem Mix von elektrisch- und wasserstoffbetriebener Dampferzeugung besteht. Die Sensitivitäten haben gezeigt, dass die benötigten Investitionen variieren können, abhängig davon, wie sich Energieträgerpreise und damit die Vermeidungskosten der beiden Dampferzeuger entwickeln.

Es zeigt sich die besondere Relevanz von Fördermitteln, um den zusätzlichen Investitionsbedarf gegenüber dem Referenzpfad decken zu können. Gleichzeitig können geeignete Fördermechanismen auch Anreize schaffen, damit die betroffenen Unternehmen ihre eigenen Investitionen noch weiter erhöhen.

9.3 Energiebezogene Kosten

Alle drei Pfade führen zu einem erheblichen Kostenanstieg ausgehend vom Basisniveau. Beim Blick auf die gesamten betrachteten Kosten (vgl. Kapitel 5.3) erfolgt in allen Pfaden ein deutlicher Anstieg in den ersten Jahren, ehe die Kosten sich wesentlich auseinander entwickeln. Der Referenzpfad steigt weiter kontinuierlich stark an, wohingegen die Kurve im Pionierpfad etwas abflacht. Im Klimaneutralitätspfad dagegen erfolgt erst noch ein deutlicher Anstieg durch den Einsatz teurer Minderungsmaßnahmen in den Werken. Zum Ende erfolgt hier allerdings dann ein Rückgang der Kosten auf ein ähnliches Niveau wie im Referenzpfad.

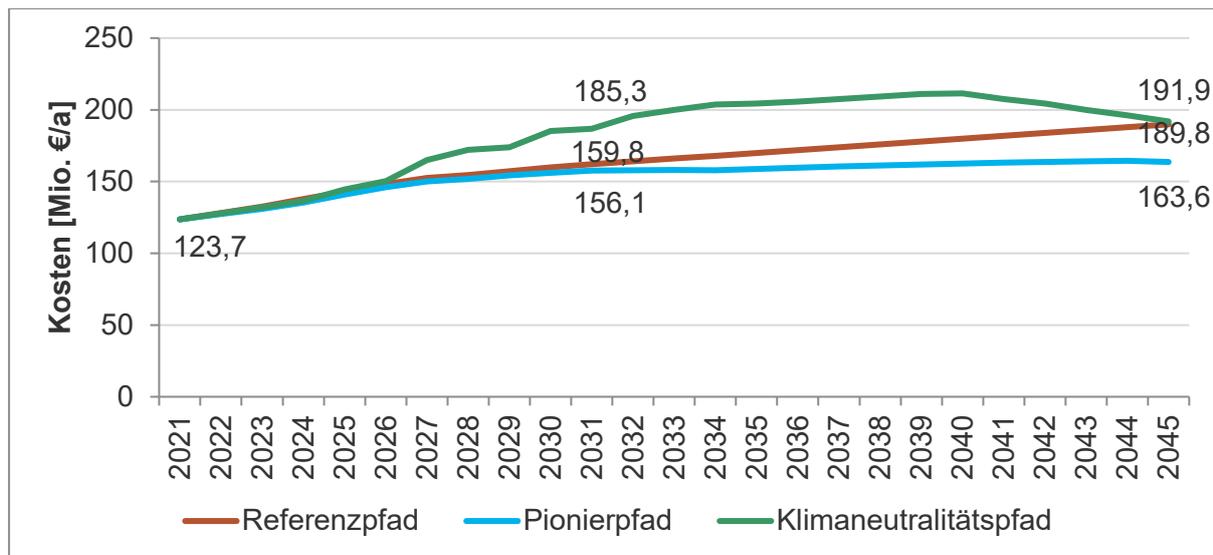


Abbildung 80: Entwicklung der jährlichen Kosten bis 2045 (Bezugsgröße: deutsche Kalksandsteinindustrie)

Abbildung 81 zeigt sehr deutlich, dass die CO₂-Kosten für die kalkbedingten Emissionen den Blick auf die direkte Kostenentwicklung in der Industrie verzerren.

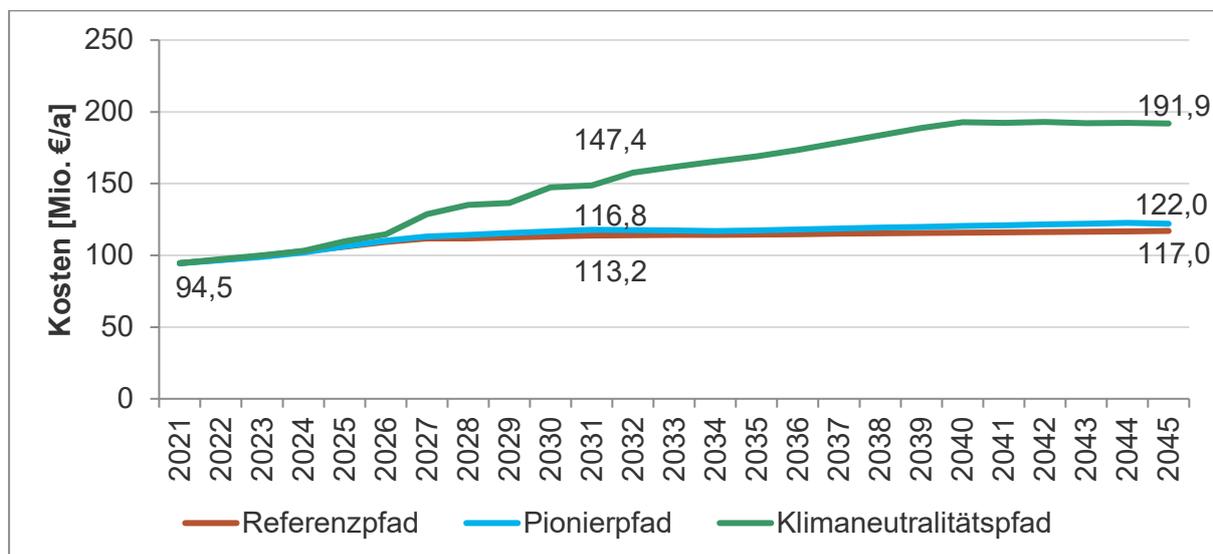


Abbildung 81: Entwicklung der jährlichen Kosten bis 2045 – ohne CO₂-Kosten Kalk (Bezugsgröße: deutsche Kalksandsteinindustrie)

Lässt man diesen Kostenbestandteil außen vor ergibt sich ein gänzlich anderes Bild. Die Kosten der Pfade steigen weiterhin zu Beginn stark an. Zeitnah kommen damit große Mehrbelastungen und damit Herausforderungen auf die Branche zu. Dann steigen Referenz- und Pionierpfad nur noch langsam an. Im Gegensatz zur vorigen Betrachtung bleibt der Referenzpfad allerdings unterhalb des Pionierpfads. Die Mehrkosten für die Kalksandsteinindustrie durch die ambitionierteren Minderungsmaßnahmen werden damit deutlich. Der Klimaneutralitätspfad dagegen steigt bis etwa 2040 bedingt durch die Maßnahmen mit hohen Vermeidungskosten rasant an und hebt sich deutlich von den anderen beiden Pfaden ab. Unter den gegebenen Rahmenbedingungen bringt Klimaneutralität somit enorme Mehrkosten mit sich, die für eine rasche Emissionsminderung abgefangen werden müssen.



Abbildung 82: Kalksandsteinindustrie stellt die Weichen in Richtung Klimaneutralität 2045; Bildquelle:
© Bundesverband Kalksandsteinindustrie e.V. und TommL(iStockphoto)

10 Schlussfolgerungen

Die dargestellten Ergebnisse zeigen, dass die Kalksandsteinindustrie bis 2045 klimaneutral werden und bereits bis 2030 mit erheblichen Emissionsreduktionen zu europäischen und nationalen Klimaschutzziele beitragen kann.

Besonders relevante Maßnahmen in den Produktionsprozessen der Kalksandsteinindustrie selbst und damit Beiträge der Branche können konkret benannt werden:

- Effizienzmaßnahmen und zusätzliche Effizienzeffekte aus der Digitalisierung,
- einschließlich optimiertes Wärmemanagement in den Werken und
- Umstellungen im Fuhrpark.
- Von besonderer Bedeutung für die Emissionsreduktion sind Brennstoffwechsel für die Dampferzeugung und ferner
- die Reduktion des Kalkanteils in den Produkten.

Mit Umsetzung dieser Maßnahmen sind Innovationen in der Branche verbunden – jedoch auch erhebliche Anstrengungen, hohe Investitionen und relevant steigende Kosten.

Es ist für die Industrie deshalb von elementarer Bedeutung, dass die besonders relevanten politischen Rahmenbedingungen möglichst frühzeitig und langfristig gesetzt werden. Nur dann können in den Unternehmen die notwendigen Investitionsentscheidungen so getroffen werden, dass die verfügbaren Mittel möglichst effizient zur Erreichung der Ziele genutzt werden.

Die mittelständisch geprägte Branche der Kalksandsteinindustrie braucht dafür:

- Staatliche Fördermechanismen für Investitionen, um erheblichen Kostenanstieg zu dämpfen und damit zugleich schneller zu Emissionsreduktionen zu kommen.
- Einen hinreichenden Schutz vor Carbon Leakage,
 - auch innerhalb der EU, solange CO₂-Preise für die Branche wie derzeit v. a. Folge nationaler Rahmenbedingungen sind und
 - mit Blick auf den Substitutionswettbewerb mit anderen Baustoffen.
- Bereits jetzt absehbar eine deutliche Dämpfung stark steigender Energiekosten für z. B. Wasserstoff und Strom – hierfür sind mit Blick auf die Ergebnisse dieser Roadmap nicht nur Investitionszuschüsse, sondern ggf. auch OPEX-seitige Förderungen in Betracht zu ziehen, insbesondere wenn sich die Kosten für Strom und Wasserstoff nicht stark reduzieren ließen.
- Der Bedarf an Förderungen wird auch davon beeinflusst, ob sich für klimaneutrale Produkte höhere Preise im Markt erzielen lassen.

Sehr wesentlich ist die Feststellung, dass höhere CO₂-Preise zwar einen spürbaren Kosteneffekt haben, jedoch alleine bei weitem nicht ausreichen, um wirtschaftliche Anreize für Investitionen in Maßnahmen zur Reduktion der Emissionen zu schaffen. Die deutlich höheren energiebezogenen Kosten der quantitativ besonders wesentlichen technologischen Alternativen insbesondere in der Dampferzeugung überwiegen die Effekte deutlich.

Wie für andere Branchen auch braucht es für die Kalksandsteinindustrie zudem

- leistungsfähige Infrastrukturen wie z. B. Netze und die Verfügbarkeit von regenerativ erzeugtem Wasserstoff und Strom zu erschwinglichen Kosten;
- eine Beschleunigung bei Genehmigungen und
- mehr Anstrengungen in der Forschung und Entwicklung.

Für einzelne Maßnahmen, wie etwa

- die Reduktion des Kalkanteils in den Produkten oder
- die Nutzung von Formaten, die weniger Masse benötigen oder im Kreislauf geführte Materialien nutzen,

sollten auch Anpassungen von Produktnormen und Bauvorschriften an geänderte Rahmenbedingungen und die höhere Gewichtung von klimapolitischen Zielen in Betracht gezogen werden.

Unter Berücksichtigung des produktspezifischen Aspekts der Recarbonatisierung ist es möglich, dass die Branche klimapositiv wird – also in den Produkten mehr CO₂ eingelagert als in der gesamten Produktionskette einschließlich der vorgelagerten Produktion von Kalk freigesetzt wird.

Hierfür ist dann die Bereitstellung von klimaneutral produziertem Kalk ohne relevante Mehrkosten für die Kalksandsteinindustrie notwendig. Für die Kalkindustrie selbst könnten sogenannte „Carbon Contracts for Difference“ (CCfD), auch als „Klimaschutzverträge“ (KSV) bezeichnet, zur Finanzierung beitragen.²⁵

Zusammenfassend kann zu den Rahmenbedingungen für die Kalksandsteinindustrie in der abschließenden Abbildung 83 festgehalten werden:

1.	Klimaneutralität für die Kalksandsteinbranche ist erreichbar.
2.	Die entsprechende Infrastruktur (Strom; Wasserstoff) muss geschaffen werden.
3.	Die Verfügbarkeit klimaneutraler Energieträger muss hergestellt und gewährleistet werden.
4.	Wirtschaftliche Anreize sind für schnelle Umsetzung unerlässlich. Höhere CO ₂ -Preise allein fördern die Transformation nicht.
5.	Klimaneutralität ist mit relevanten Mehrkosten verbunden. Schutz vor Carbon Leakage bleibt zentral.
6.	Veränderungen in der Kalkproduktion vorausgesetzt, kann die Kalksandsteinindustrie sogar klimapositiv werden.

Abbildung 83: Kernbotschaften auf einen Blick

²⁵ Quelle: Agora Energiewende, FutureCamp, Wuppertal Institut und Ecologic Institut (2021); Paper „Klimaschutzverträge für die Industrietransformation. Analyse zur Stahlbranche“ bereits veröffentlicht, weitere Publikationen zu CCS in der Zement- und Kalkindustrie folgen.

11 Anhang

11.1 Emissionsfaktoren

Tabelle 21: Für die Modellierung verwendete Emissionsfaktoren

	Emissionsfaktor Startwert 2021	Quelle	Bemerkung
Strom	397,3 kg CO ₂ /MWh	Startwert: Eigene Berechnung	
Erdgas	0,056 t CO ₂ /GJ	DEHSt (2020): Leitfaden zur Erstellung von Überwachungs- plänen für stationäre Anlagen	Unter Bezugnahme auf Zielsetzungen der RED II sinkt der Emissionsfaktor von Erdgas durch die Einspeisung von Biogas und anderen erneuerbaren Energien in das öffentliche Erdgasnetz auf 0,047 t CO ₂ /GJ bis 2050 (= jährliche Reduktion durch steigenden Anteil von erneuerbaren Energien von rund 0,57 %/a).
Heizöl	0,074 t CO ₂ /GJ	Anlage 1, Teil 4: Standardwerte zur Berechnung von Brennstoffemissionen - EBeV 2022	
Diesel	0,074 t CO ₂ /GJ	Anlage 1, Teil 4: Standardwerte zur Berechnung von Brennstoffemissionen - EBeV 2022	
Flüssiggas	0,0663 t CO ₂ /GJ	Anlage 1, Teil 4: Standardwerte zur Berechnung von Brennstoffemissionen - EBeV 2022	
Synthesegas	-		Nutzung von klimaneutralem Gas
Wasserstoff	-		Nutzung von klimaneutralem Gas
Kalk (Pfad 1)	1,17 t CO ₂ /t	Martineau, G., quicklime production, milled, loose, RoW, Allocation at the point of substitution, ecoinvent database 3.7.1	
Kalk (Pfad 2 und 3)	1,17 t CO ₂ /t	Startwert: ecoinvent 3.7.1 analog zu Pfad 1 Verlauf: Eigene Berechnung auf Basis BVK (2020)	
LKW voll beladen	1,06027 kg CO ₂ /km	DEFRA (2020)	Verwendeter Emissionsfaktor: Activity: HGV (all diesel), Type: Articulated (>33t)
LKW leer	0,63616 kg CO ₂ /km	DEFRA (2020)	Verwendeter Emissionsfaktor: Activity: HGV (all diesel), Type: Articulated (>33t)

11.2 Energiepreise

Tabelle 22: Annahmen zu den für die Modellierung verwendeten Zertifikats- und Energiepreisen

	Wert	Quelle	Bemerkung
Emissionszertifikate nEHS	2021: 25 EUR 2022: 30 EUR 2023:35 EUR 2024:45 EUR 2025:55 EUR 2026:55 - 65 EUR	§10 Abs.1 BEHG	
EUA	Startwert: 50 EUR/EUA	Intercontinental Exchange (2021)	Orientiert an den EUA Preisen 2021 des DEC2021
Erdgas	28,60 €/MWh	Statistika (2021a)	Durchschnittlicher Preis 2019
Heizöl	50,00 €/hl	Informationen vom Bundesverband der Energie-Abnehmer (VEA) vom 15.04.2021	
Diesel	1,26 €/l	Statistika (2021b)	Durchschnittlicher Preis für Dieselmotorkraftstoff in Deutschland 2019
Flüssiggas	63 €/MWh	Bund der Energieverbraucher (2021)	Durchschnittswert 2021 Deutschland, Preis (ct./l) über 3.000 l Netto
Strom Arbeitspreis	75,91 €/MWh	BDEW (2020): Strompreisanalyse Januar 2020, S. 25	Durchschnittlicher Preis 2019 der Beschaffungskosten bereinigt um den CO ₂ -Anteil im Strompreis (Annahme: preissetzendes Grenzkraftwerk: Steinkohle), ohne Umlagen
Strom Umlagen	89,53 €/MWh	BDEW (2020): Strompreisanalyse Januar 2020, S. 25	Durchschnittlicher Preis 2019 (alle Umlagen und Steuer)
Grünstrom	2,50 €/MWh	Bischoff & Ditze (2020): Handel von Herkunftsnachweisen, S. 14	Aufpreis von 2,50 €/MWh für die Herkunftsnachweise (Grünstrom)
Synthesegas	2020: 332 €/MWh 2030: 288 €/MWh 2040: 257 €/MWh 2050: 233 €/MWh	Prognos (2020): Kosten und Transformationspfade für strombasierte Energieträger	Referenzwerte für 2020, 2030, 2040 und 2050
Wasserstoff	2020: 219 €/MWh 2030: 190 €/MWh 2040: 171 €/MWh 2050: 157 €/MWh	Prognos (2020): Kosten und Transformationspfade für strombasierte Energieträger	Referenzwerte für 2020, 2030, 2040 und 2050

11.3 Annahmen zur Entwicklung von Emissionsfaktoren sowie zu Preisentwicklungen

Tabelle 23: Annahmen zur Entwicklung des Emissionsfaktors für den Strommix, Erdgas und Kalk²⁶

	Emissionsfaktor Strommix [kg CO ₂ /MWh]	Emissionsfaktor Erdgas [t CO ₂ /GJ]	Emissionsfaktor Kalk Pfad 1 [t CO ₂ /t _{KS}]	Emissionsfaktor Kalk Pfad 2 [t CO ₂ /t _{KS}]	Emissionsfaktor Kalk Pfad 3 [t CO ₂ /t _{KS}]
2021	397,28	0,056	1,17	1,17	1,17
2022	388,69	0,055	1,17	1,16	1,16
2023	399,17	0,055	1,17	1,14	1,14
2024	378,17	0,055	1,17	1,12	1,12
2025	357,17	0,054	1,17	1,11	1,11
2026	336,17	0,054	1,17	1,09	1,09
2027	315,17	0,054	1,17	1,07	1,07
2028	294,17	0,053	1,17	1,06	1,06
2029	273,17	0,053	1,17	1,04	1,04
2030	252,17	0,053	1,17	1,03	1,03
2031	231,17	0,053	1,17	1,01	1,01
2032	210,17	0,052	1,17	0,99	0,99
2033	189,17	0,052	1,17	0,98	0,98
2034	168,17	0,052	1,17	0,96	0,96
2035	147,17	0,051	1,17	0,94	0,87
2036	132,17	0,051	1,17	0,93	0,79
2037	117,17	0,051	1,17	0,91	0,70
2038	102,17	0,051	1,17	0,90	0,61
2039	87,17	0,050	1,17	0,88	0,52
2040	72,17	0,050	1,17	0,86	0,44
2041	57,17	0,050	1,17	0,85	0,35
2042	42,17	0,049	1,17	0,83	0,26
2043	27,17	0,049	1,17	0,81	0,17
2044	12,17	0,049	1,17	0,80	0,09
2045	0,00	0,049	1,17	0,78	0,00

²⁶ Quelle: Startwert: ecoinvent 3.7.1 siehe Tabelle 21; Verlauf wurde auf Basis und Annahmen zu BVK (2020): Roadmap Kalkindustrie 2050 berechnet

Tabelle 24: Annahmen zu der Preisentwicklung EUA, Zertifikate des nEHS, Synthesegas und Wasserstoff²⁷

	EUA Preis [€/EUA]	CO ₂ Preis nEHS [€/tCO ₂]	Synthesegas Preis [€/MWh]	Wasserstoff Preis [€/MWh]
2021	50	25	327,60	216,10
2022	53	30	323,20	213,20
2023	57	35	318,80	210,30
2024	60	45	314,40	207,40
2025	63	55	310,00	204,50
2026	67	65	305,60	201,60
2027	70	69	301,20	198,70
2028	73	73	296,80	195,80
2029	77	76	292,40	192,90
2030	80	80	288,00	190,00
2031	83	83	284,90	188,10
2032	86	86	281,80	186,20
2033	89	89	278,70	184,30
2034	92	92	275,60	182,40
2035	95	95	272,50	180,50
2036	98	98	269,40	178,60
2037	101	101	266,30	176,70
2038	104	104	263,20	174,80
2039	107	107	260,10	172,90
2040	110	110	257,00	171,00
2041	113	113	254,60	169,60
2042	116	116	252,20	168,20
2043	119	119	249,80	166,80
2044	122	122	247,40	165,40
2045	125	125	245,00	164,00

²⁷ Quellen: siehe Tabelle 22; Synthesegas- und Wasserstoffpreise: Die Jahre ohne Preisangaben wurden hier extrapoliert.

11.4 Annahmen zur Wirtschaftlichkeitsberechnung

Tabelle 25: Annahmen zu Abschreibungszeitraum und Diskontsatz

		Quelle	Bemerkung
Abschreibungszeitraum allgemeine Effizienzsteigerung	7 a	Afa-Tabelle	Mittelwert aus Afa-Liste für Kalksandsteinindustrie
Abschreibungszeitraum größere Investitionen (z. B. Dampferzeuger)	12 a	Afa-Tabelle	Mittelwert aus Afa-Liste für Kalksandsteinindustrie
Diskontsatz	8 %		Realistischer Diskontsatz

Konstante Preise ohne Inflation

11.5 Annahmen zu den technischen Maßnahmen zur Emissionsreduktion

Die folgenden Angaben basieren auf Annahmen in Abstimmung mit dem Bundesverband und Begleitkreis Kalksandsteinindustrie.

Tabelle 26: Annahmen zu den Investitionen und Einsparungen Ersatz erdgasbefuehrter Dampferzeuger

	Annahme zur Investition	Einsparung Energie
Austausch Dampferzeuger (durch effizienteren erdgasbefuehrten Dampferzeuger)	700.000 €	Erdgas – 3,5 %

Tabelle 27: Annahmen zu den Betriebskosten eines durchschnittlichen virtuellen Kalksandsteinwerks – Status Quo

	Derzeitige Betriebskosten (ohne Energiekosten)
Dampferzeuger	80.000 €/a
Wärmespeicher (Härtekessel als Warmwasserspeicher oder Druckspeicher/Stahlkessel) 30-50 m ³	30.000 €/a
Stapler (dieselbetrieben)	30.000 €/a
Verpackungsanlage (Haube)	30.000 €/a
Wärmemanagement für ein Durchschnittswerk	40.000 €/a
Autoklaven für ein Durchschnittswerk	40.000 €/a

Tabelle 28: Übersicht und Annahmen zu den technischen Maßnahmen

Maßnahme	Annahme zur Investition	Zusätzliche Betriebskosten	Einsparungspotenzial	Mehrverbrauch Energieträger
Dampferzeuger (Wasserstoff)	1.500.000 €	100.000 €/a	Erdgas/ Heizöl – 100 %	Wasserstoff – 97 %
Dampferzeuger (elektrisch)	2.000.000 €	48.000 €/a	Erdgas/Heizöl – 100 %	Strom – 96 %
Dampferzeuger (Synthetische Kraftstoffe)	800.000 €	10.000 €/a	Erdgas/Heizöl – 100 %	Synthesegas – 97 %
Elektrische Stapler	470.000 €	16.000 €/a	Diesel – 100 %	Strom – 75 %
Stapler (synthetische Kraftstoffe)	315.000 €	16.000 €/a	Diesel – 100 %	synthetische Kraftstoffe – 100 %
Wärmespeicher	300.000 €	15.000 €/a	Wärme – 5 %	-
Schutz der Rohlinge vor Auskühlung (Vorwärmung oder Dämmung)	300.000 €	6.000 €/a	Wärme – 5 %	-
Wärmemanagement	300.000 €	6.000 €/a	Wärme – 10 %	-
Autoklaven	360.000 €	30.000 €/a	Wärme – 10 %	-
Verpackungsanlagen (Ersatz durch Stretchanlage)	300.000 €	0 €/a	Flüssiggas/ Erdgas – 100 %	Strom – 100 %

11.6 Annahmen zum Kalkgehalt im Stein und der Recarbonatisierung

Tabelle 29: Entwicklung Kalkgehalt im Stein und sich daraus ergebener Recarbonatisierungseffekt

	Kalkgehalt im KS [$t_{\text{Kalk}}/t_{\text{KS}}$]			Recarbonatisierung – Aufgenommene Menge CO ₂ [$\text{kg CO}_2/t_{\text{KS}}/\text{a}$]		
	Referenzpfad	Pionierpfad	Klimaneutralit ätspfad	Referenzpfad	Pionierpfad	Klimaneutralit ätspfad
2021	0,07	0,070	0,070	1,00	1,00	1,00
2022	0,07	0,070	0,070	1,00	1,00	1,00
2023	0,07	0,070	0,070	1,00	1,00	1,00
2024	0,07	0,070	0,070	1,00	1,00	1,00
2025	0,07	0,070	0,070	1,00	1,00	1,00
2026	0,07	0,070	0,069	1,00	0,99	0,99
2027	0,07	0,069	0,068	1,00	0,99	0,97
2028	0,07	0,069	0,067	1,00	0,98	0,96
2029	0,07	0,068	0,066	1,00	0,97	0,94
2030	0,07	0,068	0,065	1,00	0,96	0,93
2031	0,07	0,067	0,064	1,00	0,96	0,91
2032	0,07	0,067	0,063	1,00	0,95	0,90
2033	0,07	0,066	0,062	1,00	0,94	0,89
2034	0,07	0,066	0,061	1,00	0,94	0,87
2035	0,07	0,065	0,060	1,00	0,93	0,86
2036	0,07	0,065	0,059	1,00	0,92	0,84
2037	0,07	0,064	0,058	1,00	0,91	0,83
2038	0,07	0,064	0,057	1,00	0,91	0,81
2039	0,07	0,063	0,056	1,00	0,90	0,80
2040	0,07	0,063	0,055	1,00	0,89	0,79
2041	0,07	0,062	0,054	1,00	0,89	0,77
2042	0,07	0,062	0,053	1,00	0,88	0,76
2043	0,07	0,061	0,052	1,00	0,87	0,74
2044	0,07	0,061	0,051	1,00	0,86	0,73
2045	0,07	0,060	0,050	1,00	0,86	0,71

11.7 Weitere Annahmen

Transportentfernungen		Quelle
Kalk	143,5 km	Datenerhebung EPD 2021
Sand	9,5 km	Datenerhebung EPD 2021
Produkt	59 km	Datenerhebung EPD 2021
LKW Nutzlast		
Rohstoffe	26 t	
Produkt	21 t	
Energieverbräuche pro Tonne KS-Material		
Erdgas	88,1 kWh/t KS	BEHG Datenerhebung
Heizöl	6,5 kWh/t KS	BEHG Datenerhebung
Diesel	3,2 kWh/t KS	BEHG Datenerhebung
Flüssiggas	0,3 kWh/t KS	BEHG Datenerhebung
Strom	11,1 kWh/t KS	BEHG Datenerhebung
Rohstoffe pro Tonne KS-Material		
Kalk	0,07 t/t KS	Datenerhebung EPD 2021
Sand	0,93 t/t KS	Datenerhebung EPD 2021
Produktion Kalksandstein		
Kalksandstein	7,102 Mio. t	KS-Masse 2019

11.8 Kennzahlen

Tabelle 30: Wesentliche Kennzahlen der deutschen Kalksandsteinindustrie für Pfad 2 und Pfad 3

Pionierpfad (Pfad 2)		Klimaneutralitätspfad (Pfad 3)	
Strom Produktionsmaschinen [kWh/t _{KS}]	Energie Dampferzeugung [kWh/t _{KS}]	Strom Produktionsmaschinen [kWh/t _{KS}]	Energie Dampferzeugung [kWh/t _{KS}]
11,06	92,26	11,06	92,26
10,95	90,49	10,95	87,49
10,84	88,74	10,84	82,80
10,75	87,15	10,75	80,67
10,67	85,68	10,67	77,59
10,60	83,69	10,60	75,45
10,54	81,87	10,54	74,29
10,49	80,26	10,49	73,32
10,45	78,79	10,45	72,50
10,42	77,44	10,42	71,58
10,39	76,19	10,39	70,81
10,36	75,02	10,36	70,09
10,34	73,90	10,34	69,60
10,32	73,08	10,32	69,12
10,30	72,70	10,30	68,68
10,29	72,39	10,29	68,27
10,28	72,11	10,28	67,88
10,27	71,86	10,27	67,55
10,26	71,60	10,26	67,20
10,26	71,50	10,26	67,01
10,26	71,40	10,26	66,98
10,26	71,29	12,16	66,98
10,26	71,19	12,55	66,98
10,26	71,09	12,55	66,98
10,26	70,99	12,55	66,98

12 Verzeichnisse

12.1 Quellenverzeichnis

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

BDEW (2020): BDEW-Strompreisanalyse Januar 2020: Haushalte und Industrie

Bischoff & Ditze (2020): Handel von Herkunftsnachweisen: Umsetzung und Perspektiven

Bund der Energieverbraucher (Juni 2021): Preisabfrage: Aktuelle regionale Fluessiggas-Preise.

Bundesministerium der Finanzen (1997): AfA-Tabelle für den Wirtschaftszweig „Kalksandsteinindustrie“

BVK - Bundesverband der Deutschen Kalkindustrie e. V. (Oktober 2020): Roadmap Kalkindustrie 2050: Über die klimaneutrale Produktion zur klimapositiven Industrie

DEHSt (2020): Leitfaden zur Erstellung von Überwachungsplänen für stationäre Anlagen

DEFRA (2020): Research and analysis: Greenhouse gas reporting: conversion factors 2020

Martineau, G.: quicklime production, milled, loose, RoW, Allocation at the point of substitution, ecoinvent database 3.7.1

Eden & Steinmann (2010): Reduzierung des Energieverbrauchs und der produktionstechnisch bedingten CO₂-Emissionen bei der Kalksandstein-Herstellung durch energietechnische Optimierungsmaßnahmen

Intercontinental Exchange (2021): EUA Futures

Prognos (2020): Kosten und Transformationspfade für strombasierte Energieträger: Endbericht zum Projekt „Transformationspfade und regulatorischer Rahmen für synthetische Brennstoffe“. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie

Statistika (2021a): Durchschnittlicher Preis für Dieselkraftstoff in Deutschland in den Jahren 1950 bis 2021

Statistika (2021b): Erdgaspreise für Gewerbe- und Industriekunden in Deutschland in den Jahren 2010 bis 2020

Transport & Environment (2020): Comparison of hydrogen and battery electric trucks: Methodology and underlying assumptions

VEA - Bundesverband der Energie-Abnehmer (2021) - persönliche Kommunikation

Literatur zu Diskurs 1

[MID2021] MIDDENDORF, B.: Quantitative Bestimmung und Berechnung der CO₂-Aufnahme von werkfrischen Kalksandsteinen, Bericht Nr. 25/2021, Universität Kassel, 2021

[CLG2021] CLG Chemisches Labor Dr. Graser KG: Bericht Nr. 21/08/2129259 vom 20.08.2021

[EPD 2021] Institut für Bauen und Umwelt e.V. IBU: Umweltproduktdeklaration nach ISO 14025 und EN 15804+A2, EPD, Deklarationsnummer: EPD-BKS-20210205-IBE1-DE, Berlin, August 2021

Literatur zu Diskurs 2

- [1] EUROPÄISCHE KOMMISSION: Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Europäischen Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen - Ein neuer Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft - Für ein saubereres und wettbewerbsfähigeres Europa - Brüssel, den 11.03.2020, COM(2020)
- [2] BUNDESVERBAND KALKSANDSTEININDUSTRIE E.V.: Kalksandstein Geschäftsberichte 2020/21
- [3] DIN EN 4226-101 „Rezyklierte Gesteinskörnungen für Beton nach DIN EN 12620: Typen und geregelte gefährliche Substanzen sowie DIN EN 4226-102 „Rezyklierte Gesteinskörnungen für Beton nach DIN EN 12620 Typprüfung und Werkseigene Produktionskontrolle
- [4] DAfStB-Richtlinie - Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620
- [5] DIN EN 206, Beton - Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität
- [6] BfS-SW-14/12: Gehrke, K; Hoffmann, B; Schkade, U; Schmidt, V.; Wichterrey, K.: Natürliche Radioaktivität in Baumaterialien und die daraus resultierende Stahlenexposition, Salzgitter, 2012
- [7] EUROFINS ENVIRONMENT A/S: Prüfberichte Nrn.: 763538, 763539, 763109, 763110 über die Prüfung von Produktmissionen nach der AgBB-Methode des DIBt, Galten, Dänemark, Februar 2008
- [8] BRAMESHUBER, W.; et al.: Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse zur Auslaugung von Spurenelementen aus Kalksandstein, Institut für Bauforschung (Ibac) der Rheinisch Westfälischen Hochschule Aachen, F 7043/1 und M 1223, 201
- [9] BIMESMEIER, T.; GRUHLER, K.; DEILMANN, C. REICHENBACH, J.; STEINMETZER, S.: SEROBAU Energie- und Materialflüsse entlang der Herstellung und des Einsatzortes von Sekundärstoffen aus dem Hochbau für den Baubereich, Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung (IÖR), Dresden und INTECUS GmbH – Abfallwirtschaft und umweltintegratives Management, Dresden Endbericht, 2019
- [10] QUATTRONE, M.; ANGULO, S.,C.; JOHN, V.,M.: Energy and CO₂ from high performance recycled aggregate production. Resources, Conservation and Recycling 90 (2014) pp 21–33
(in: "Innovationsregion Rheinisches Revier, Potenzialstudie zur Umsetzung eines Re-/Upcyclingkonzeptes im Gebiet der IRR GmbH – Schwerpunkt mineralische Baustoffe", 2017 sowie in MÜLLER, A.: "Baustoffrecycling – Entstehung-Aufbereitung-Verwertung", Springer-Verlag, 2018)
- [11] HEYN, S.; METTKE, A.: Einsatz von Recycling-Material aus mineralischen Baustoffen - Zuschlag in der Betonherstellung - Ökologische Prozessbetrachtungen - RC-Beton (Stofffluss, Energieaufwand, Emissionen), Cottbus, 2010
- [12] EDEN, W.; LIEBLANG, P.; KONRAD, D.; SCHÄFERS, M.; VOGDT, F. U.: Ressourceneffizienz in der Kalksandsteinindustrie, Forschungsbericht Nr. 122 der Forschungsvereinigung Kalk-Sand e.V., Hannover 2016
- [13] EDEN, W.: Wiederverwertung von Kalksandsteinen aus Abbruch von Bauwerken bzw. aus fehlerhaften Steinen aus dem Produktionsprozess, KS-Recycling Teil I, Forschungsvereinigung Kalk-Sand e.V., Forschungsbericht Nr.80, Hannover, 1994
- [14] EDEN, W.: Herstellung von Kalksandsteinen aus Bruchmaterial von Kalksandsteinen mit anhaftenden Dämmstoffen sowie weiterer Baureststoffe, Forschungsbericht Nr. 86, Forschungsvereinigung Kalk-Sand, Hannover, 1997
- [15] EDEN, W., FRIEDL, L.; KRASS, K.; KURKOWSKI, H.; MESTERS, K.; SCHIEBL, P.: Eignung von Kalksandstein-Bruchmaterial zum Recycling in der Baustoffindustrie, Forschungsbericht Nr. 97 der Forschungsvereinigung Kalk-Sand e.V., Hannover, 2003

- [16] EDEN, W.; MIDDENDORF, B.: Entwicklung eines Recycling-Mauersteins unter Verwendung von Abbruchmaterial und Baurestmassen und Anwendung der Kalksandstein-Technologie Forschungsbericht Nr. 106, Forschungsvereinigung Kalk-Sand, Hannover, 2010
- [17] EDEN, W.; FLOTTMANN, N.; KOHLER, G.; KOLLAR, J.; KURKOWSKI, H. RADENBERG, M.; SCHLÜTTER, F.: Eignung von rezykliertem Kalksandstein-Mauerwerk für Tragschichten ohne Bindemittel Forschungsbericht Nr.111, Forschungsvereinigung Kalk-Sand, Hannover, 2010
- [18] EDEN, W.; KURKOWSKI, H.; MIDDENDORF, B.: Verwertungsoptionen für rezyklierte Gesteinskörnungen aus Mauerwerk in der Steine- und Erden-Industrie, Forschungsbericht Nr. 115, Forschungsvereinigung Kalk-Sand, Hannover, 2014
- [19] BISCHOFF, G.; EDEN, W.; GRÄFENSTEIN, R.; KURKOWSKI, H.; MIDDENDORF, B.: Vegetationssubstrate aus rezyklierten Gesteinskörnungen aus Mauerwerk, Forschungsbericht Nr. 116, Forschungsvereinigung Kalk-Sand, Hannover, 2014
- [20] EDEN, W.; KURKOWSKI, H.; LAU, J.J.; MIDDENDORF, B.: Bioaktivierung von Porenbeton- und Kalksandstein-Recyclinggranulaten mit Methan oxidierenden Bakterien zur Reduktion von Methanausgasungen aus Hausmülldeponien - ein Beitrag zum Klima- und Ressourcenschutz – Methanox II, Forschungsbericht Nr. 117, Forschungsvereinigung Kalk-Sand, Hannover, 2015
- [21] EDEN, W.; KURKOWSKI, H.; NYTUS, N.; RADENBERG, M.: Eignungsnachweis von Tragschichten ohne Bindemittel mit erhöhten Anteilen an rezykliertem Kalksandstein-Mauerwerk – Erprobungsstrecke in praxi, Forschungsbericht Nr. 122 der Forschungsvereinigung Kalk-Sand e.V., Hannover, 2016
- [22] EDEN, W.; KOLBE, R.; KURKOWSKI, H.; MIDDENDORF, B.; MOLLENHAUER, K.; SCHADE, T.; WETEKAM, J.: Einsatz von Füllern aus Kalksandstein-Recycling-Material als Upcycling für Kalksandstein-, Beton-, und Asphaltprodukte, Forschungsbericht Nr. 131 der Forschungsvereinigung Kalk-Sand e.V., Hannover, 2021
- [23] EDEN, W.; KURKOWSKI, H.: Rezyklierte Gesteinskörnungen aus Kalksandstein für vegetationstechnische Bodenverbesserungsmaßnahmen im Erd- und Straßenbau, Forschungsbericht Nr. 132 der Forschungsvereinigung Kalk-Sand e.V., Hannover, 2021

12.2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Für die Roadmap berücksichtigte Emissionsquellen; Quelle: FutureCamp.....	1
Abbildungen 2, 3 und 4: Rohstoffe, Recyclingmaterial und Produkt der Kalksandsteinindustrie; Bildquelle: © Bundesverband Kalksandsteinindustrie e.V.	2
Abbildung 5: Kernbotschaften auf einen Blick.....	8
Abbildung 6: Formate von Kalksandstein; Bildquelle: © Bundesverband Kalksandsteinindustrie e.V.....	11
Abbildung 7: Kreislaufführung von Kalksandstein-Material	14
Abbildung 8: Für die Roadmap berücksichtigte Emissionsquellen; Quelle: FutureCamp.....	16
Abbildung 9: Rohstoffe – Kalk, Sand, Wasser; Bildquelle: © Bundesverband Kalksandsteinindustrie e.V.....	18
Abbildung 10: Allgemeine Effizienzgewinne Brennstoff- und Stromeinsatz	20
Abbildung 11: Effizienzsteigerung Brennstoff- und Stromeinsatz durch Digitalisierung und Prozessmanagement.....	21
Abbildung 12: Annahmen zum Verlauf der CO ₂ -Preise aus dem EU ETS und nEHS	24
Abbildung 13: Produktion – Härtekesel; Bildquelle: © Bundesverband Kalksandsteinindustrie e.V.....	27
Abbildung 14: Aufteilung Energieträger deutsche Kalksandsteinindustrie (Bezug Scope 1 und Scope 2) im Basisjahr 2021	30
Abbildung 15: Aufteilung Energieträger deutsche Kalksandsteinindustrie inkl. Transport und externer Sandabbau (Bezug Scope 1 bis Scope 3) im Basisjahr 2021	31
Abbildung 16: Aufteilung der CO ₂ -Emissionen im Basisjahr 2021 nach Scopes.....	32
Abbildung 17: Aufteilung der CO ₂ -Emissionen im Basisjahr 2021 - Scope 1 und Scope 2.....	32
Abbildung 18: Aufteilung der CO ₂ -Emissionen im Basisjahr 2021 - Scope 3.....	33
Abbildung 19: Aufteilung der energiebezogenen Kosten im Basisjahr 2021	34
Abbildung 20: Aufteilung der energiebezogenen Kosten im Basisjahr 2021 (ohne CO ₂ -Kosten aus der Emissionsfracht Kalk)	34
Abbildung 21: Kalksandsteinlager; Bildquelle: © Bundesverband Kalksandsteinindustrie e.V.....	35
Abbildung 22: Entwicklung des Energieträgereinsatzes der Kalksandsteinwerke bis 2045 im Referenzpfad	36
Abbildung 23: Entwicklung des Energieträgereinsatzes Transport und externer Sandabbau bis 2045 im Referenzpfad (Bezugsgröße: deutsche Kalksandsteinindustrie)	36
Abbildung 24: Entwicklung der CO ₂ -Emissionen der Kalksandsteinindustrie bis 2045 im Referenzpfad	37
Abbildung 25: Entwicklung der CO ₂ -Emissionen aus Scope 1 und Scope 2 bis 2045 im Referenzpfad (Bezugsgröße: deutsche Kalksandsteinindustrie)	38
Abbildung 26: Entwicklung der CO ₂ -Emissionen aus Scope 3 bis 2045 im Referenzpfad (Bezugsgröße: deutsche Kalksandsteinindustrie).....	38
Abbildung 27: Entwicklung der CO ₂ -Emissionen aus Scope 3 ohne Kalk bis 2045 im Referenzpfad (Bezugsgröße: deutsche Kalksandsteinindustrie).....	39
Abbildung 28: Entwicklung der CO ₂ -Emissionen bis 2045 im Referenzpfad inkl. Recarbonatisierungseffekten der produzierten Kalksandsteine im Zeitraum 2021 bis 2045 (Bezugsgröße: deutsche Kalksandsteinindustrie)	40

Abbildung 29: Recarbonatisierungseffekt der im Betrachtungszeitraum 2021 bis 2045 produzierten Kalksandsteine – Referenzpfad (Bezugsgröße: deutsche Kalksandsteinindustrie)	40
Abbildung 30: Entwicklung der Kosten im Referenzpfad (Bezugsgröße: deutsche Kalksandsteinindustrie)	41
Abbildung 31: Entwicklung der energiebezogenen Kosten im Referenzpfad (Bezugsgröße: deutsche Kalksandsteinindustrie)	42
Abbildung 32: Entwicklung der Kosten im Referenzpfad - ohne CO ₂ -Kosten Kalk (Bezugsgröße: deutsche Kalksandsteinindustrie)	43
Abbildung 33: Produktionsstrasse in einem Kalksandsteinwerk; Bildquelle: © Bundesverband Kalksandsteinindustrie e.V.	46
Abbildung 34: Modellierter Austausch der Dampferzeuger im Pionierpfad	48
Abbildung 35: Entwicklung des Energieträgereinsatzes der Kalksandsteinwerke bis 2045 im Pionierpfad (Bezugsgröße: deutsche Kalksandsteinindustrie)	49
Abbildung 36: Härtekessel; Bildquelle: © Bundesverband Kalksandsteinindustrie e.V.	49
Abbildung 37: Entwicklung des Energieträgereinsatzes Transport und externer Sandabbau bis 2045 im Pionierpfad (Bezugsgröße: deutsche Kalksandsteinindustrie)	50
Abbildung 38: Entwicklung der CO ₂ -Emissionen bis 2045 im Pionierpfad (Bezugsgröße: deutsche Kalksandsteinindustrie)	51
Abbildung 39: Entwicklung der CO ₂ -Emissionen aus Scope 1 und Scope 2 bis 2045 im Pionierpfad (Bezugsgröße: deutsche Kalksandsteinindustrie)	52
Abbildung 40: Entwicklung der CO ₂ -Emissionen aus Scope 3 bis 2045 im Pionierpfad (Bezugsgröße: deutsche Kalksandsteinindustrie)	53
Abbildung 41: Entwicklung der CO ₂ -Emissionen aus Scope 3 ohne Kalk bis 2045 im Pionierpfad (Bezugsgröße: deutsche Kalksandsteinindustrie).....	53
Abbildung 42: Entwicklung der CO ₂ -Emissionen bis 2045 im Pionierpfad inkl. Recarbonatisierungseffekte der produzierten Kalksandsteine im Zeitraum 2021 bis 2045 (Bezugsgröße: deutsche Kalksandsteinindustrie)	54
Abbildung 43: Recarbonatisierungseffekt der im Betrachtungszeitraum 2021 bis 2045 produzierten Kalksandsteine – Pionierpfad (Bezugsgröße: deutsche Kalksandsteinindustrie)	54
Abbildung 44: Entwicklung der Kosten im Pionierpfad (Bezugsgröße: deutsche Kalksandsteinindustrie)	55
Abbildung 45: Entwicklung der energiebezogenen Kosten im Pionierpfad (Bezugsgröße: deutsche Kalksandsteinindustrie)	56
Abbildung 46: Entwicklung der Kosten im Pionierpfad – ohne CO ₂ -Kosten Kalk (Bezugsgröße: deutsche Kalksandsteinindustrie)	57
Abbildung 47: Kalksandsteine nehmen im Laufe ihrer Lebenszeit CO ₂ aus ihrer Umgebung auf und tragen erheblich zur Senkung von CO ₂ -Emissionen bei; Bildquelle: © Bundesverband Kalksandsteinindustrie e.V.	57
Abbildung 48: Vergleich der Vermeidungskosten ausgewählter Maßnahmen unter den Annahmen von Pfad 2 zu den CO ₂ -Preisen	58
Abbildung 49: Verlauf der erhöhten CO ₂ -Preise	59
Abbildung 50: Gegenüberstellung der Vermeidungskosten des elektrischen Dampferzeugers unter Annahmen von Pfad 2 und der betrachteten Sensitivität (höhere CO ₂ -Preise und Verringerung der EEG-Umlage)	60
Abbildung 51: Gegenüberstellung der Vermeidungskosten des elektrischen und Wasserstoff-Dampferzeugers unter Annahmen der betrachteten Sensitivität (höhere CO ₂ -Preise und Verringerung der EEG-Umlage)	61
Abbildung 52: Abkühlen der Kalksandsteine; Bildquelle: © Bundesverband Kalksandsteinindustrie e.V.	62

Abbildung 53: Klimafreundliche Produktion ist durch den Einsatz CO ₂ -neutraler Energieträger möglich; Bildquelle: © akitada31 auf Pixabay	65
Abbildung 54: Modellierter Austausch der Dampferzeuger im Klimaneutralitätspfad	67
Abbildung 55: Entwicklung des Energieträgereinsatzes der Kalksandsteinwerke bis 2045 im Klimaneutralitätspfad (Bezugsgröße: deutsche Kalksandsteinindustrie).....	69
Abbildung 56: Entwicklung des Energieträgereinsatzes Transport und externer Sandabbau bis 2045 im Klimaneutralitätspfad (Bezugsgröße: deutsche Kalksandsteinindustrie)	70
Abbildung 57: Moderner Dampferzeuger, Pivovar Klaster; Bildquelle: © Bosch Industriekessel GmbH	70
Abbildung 58: Entwicklung der CO ₂ -Emissionen bis 2045 im Klimaneutralitätspfad (Bezugsgröße: deutsche Kalksandsteinindustrie)	71
Abbildung 59: Entwicklung der CO ₂ -Emissionen aus Scope 1 und Scope 2 bis 2045 im Klimaneutralitätspfad (Bezugsgröße: deutsche Kalksandsteinindustrie).....	72
Abbildung 60: Entwicklung der CO ₂ -Emissionen aus Scope 3 bis 2045 im Klimaneutralitätspfad (Bezugsgröße: deutsche Kalksandsteinindustrie)	72
Abbildung 61: Entwicklung der CO ₂ -Emissionen aus Scope 3 ohne Kalk bis 2045 im Klimaneutralitätspfad (Bezugsgröße: deutsche Kalksandsteinindustrie)	73
Abbildung 62: Entwicklung der CO ₂ -Emissionen bis 2045 im Klimaneutralitätspfad inkl. Recarbonatisierungseffekte der produzierten Kalksandsteine im Zeitraum 2021 bis 2045 (Bezugsgröße: deutsche Kalksandsteinindustrie)	73
Abbildung 63: Recarbonatisierungseffekt der im Betrachtungszeitraum 2021 bis 2045 produzierten Kalksandsteine – Klimaneutralitätspfad (Bezugsgröße: deutsche Kalksandsteinindustrie)	74
Abbildung 64: Entwicklung der Kosten im Klimaneutralitätspfad (Bezugsgröße: deutsche Kalksandsteinindustrie).....	75
Abbildung 65: Entwicklung der energiebezogenen Kosten im Klimaneutralitätspfad (Bezugsgröße: deutsche Kalksandsteinindustrie)	76
Abbildung 66: Entwicklung der Kosten im Klimaneutralitätspfad - ohne CO ₂ -Kosten Kalk (Bezugsgröße: deutsche Kalksandsteinindustrie)	77
Abbildung 67: Vergleich der Vermeidungskosten des elektrischen und Wasserstoff-Dampferzeugers unter den Annahmen von Pfad 3.....	78
Abbildung 68: Vergleich der Vermeidungskosten des elektrischen und Wasserstoff-Dampferzeugers unter den Annahmen von Pfad 3 und den CO ₂ -Preisen.....	78
Abbildung 69: Verlauf der erhöhten CO ₂ -Preise	79
Abbildung 70: Vergleich der Energiepreise	79
Abbildung 71: Gegenüberstellung der Vermeidungskosten des elektrischen Dampferzeugers unter Annahmen von Pfad 3 und der betrachteten Sensitivität (Höhere CO ₂ -Preise und Verringerung der EEG-Umlage)	80
Abbildung 72: Gegenüberstellung der Vermeidungskosten des elektrischen und Wasserstoff-Dampferzeugers unter Annahmen der Sensitivität (höhere CO ₂ -Preise und Verringerung der EEG-Umlage)	81
Abbildung 73: Gegenüberstellung der Vermeidungskosten des elektrischen Dampferzeugers unter Annahmen von Pfad 3 und der betrachteten Sensitivität (100 % Grünstrom erst ab 2045)	82
Abbildung 74: Gegenüberstellung der Vermeidungskosten des elektrischen und Wasserstoff-Dampferzeugers unter Annahmen der Sensitivität (100 % Grünstrom erst ab 2045).....	83
Abbildung 75: Vergleich der Wasserstoffpreise aus Pfad 3 und der Sensitivität (Halbierung Preis Wasserstoff)	84

Abbildung 76: Gegenüberstellung der Vermeidungskosten des Wasserstoff-Dampferzeugers unter Annahmen von Pfad 3 und der betrachteten Sensitivität (Halbierung Preis Wasserstoff)	85
Abbildung 77: Gegenüberstellung der Vermeidungskosten des elektrischen und Wasserstoff-Dampferzeugers unter Annahmen der Sensitivität (Halbierung Preis Wasserstoff)	85
Abbildung 78: Entwicklung der CO ₂ -Emissionen bis 2045 ohne Recarbonatisierungseffekte – Gegenüberstellung aller drei Pfade (Bezugsgröße: deutsche Kalksandsteinindustrie).....	90
Abbildung 79: Entwicklung der CO ₂ -Emissionen bis 2045 inkl. Recarbonatisierungseffekten – Gegenüberstellung aller drei Pfade (Bezugsgröße: deutsche Kalksandsteinindustrie).....	91
Abbildung 80: Entwicklung der jährlichen Kosten bis 2045 (Bezugsgröße: deutsche Kalksandsteinindustrie)	92
Abbildung 81: Entwicklung der jährlichen Kosten bis 2045 – ohne CO ₂ -Kosten Kalk (Bezugsgröße: deutsche Kalksandsteinindustrie)	92
Abbildung 82: Kalksandsteinindustrie stellt die Weichen in Richtung Klimaneutralität 2045; Bildquelle: © Bundesverband Kalksandsteinindustrie e.V. und Tomml(iStockphoto)	93
Abbildung 83: Kernbotschaften auf einen Blick	95

12.3 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht der Emissionsentwicklung der drei betrachteten Pfade (Bezugsgröße: deutsche Kalksandsteinindustrie)	4
Tabelle 2: Übersicht Entwicklung energiebezogener Kosten für die betrachteten Pfade inkl. CO ₂ -Kosten aus Kalk (Bezugsgröße: deutsche Kalksandsteinindustrie).....	6
Tabelle 3: Übersicht Entwicklung energiebezogener Kosten für die betrachteten Pfade ohne CO ₂ -Kosten aus Kalk (Bezugsgröße: deutsche Kalksandsteinindustrie).....	7
Tabelle 4: Gegenüberstellung der Ergebnisse der Pfade - virtuelles Durchschnittswerk	7
Tabelle 5: Kalkeinsatzmengen für Pfad 1 bis Pfad 3	18
Tabelle 6: Annahmen zur Recarbonatisierung (Bezugsgröße: deutsche Kalksandsteinindustrie)	19
Tabelle 7: Entwicklung Emissionsfaktor Erdgas.....	22
Tabelle 8: Entwicklung Emissionsfaktor Strom.....	22
Tabelle 9: Entwicklung Emissionsfaktor Kalk	23
Tabelle 10: Ergebnisse zur Recarbonatisierung im Referenzpfad (Bezugsgröße: deutsche Kalksandsteinindustrie).....	41
Tabelle 11: Steckbrief Referenzpfad (Bezugsgröße: deutsche Kalksandsteinindustrie)	44
Tabelle 12: Ergebnisse zur Recarbonatisierung im Pionierpfad (Bezugsgröße: deutsche Kalksandsteinindustrie).....	55
Tabelle 13: Übersicht zu den prozentualen Veränderungen der Kosten (Sensitivität mit erhöhten CO ₂ -Preisen) ggü. Pfad 2	60
Tabelle 14: Steckbrief Pionierpfad (Bezugsgröße: deutsche Kalksandsteinindustrie).....	63
Tabelle 15: Ergebnisse zur Recarbonatisierung im Klimaneutralitätspfad (Bezugsgröße: deutsche Kalksandsteinindustrie)	74

Tabelle 16: Übersicht zu den prozentualen Veränderungen der Kosten (Sensitivität mit höheren CO ₂ -Preisen und Verringerung der EEG-Umlage) ggü. Pfad 3	81
Tabelle 17: Übersicht zu den prozentualen Veränderungen der Kosten (Sensitivität mit 100 % Grünstrom erst ab 2045) ggü. Pfad 3	83
Tabelle 18: Steckbrief Klimaneutralitätspfad (Bezugsgröße: deutsche Kalksandsteinindustrie)	87
Tabelle 19: Gegenüberstellung der Ergebnisse der Pfade – gesamte deutsche Kalksandsteinindustrie	89
Tabelle 20: Gegenüberstellung der Ergebnisse der Pfade – virtuelles Durchschnittswerk	89
Tabelle 21: Für die Modellierung verwendete Emissionsfaktoren	96
Tabelle 22: Annahmen zu den für die Modellierung verwendeten Zertifikats- und Energiepreisen	97
Tabelle 23: Annahmen zur Entwicklung des Emissionsfaktors für den Strommix, Erdgas und Kalk	98
Tabelle 24: Annahmen zu der Preisentwicklung EUA, Zertifikate des nEHS, Synthesegas und Wasserstoff.....	99
Tabelle 25: Annahmen zu Abschreibungszeitraum und Diskontsatz	100
Tabelle 26: Annahmen zu den Investitionen und Einsparungen Ersatz erdgasbefeuerteter Dampferzeuger	101
Tabelle 27: Annahmen zu den Betriebskosten eines durchschnittlichen virtuellen Kalksandsteinwerks – Status Quo	101
Tabelle 28: Übersicht und Annahmen zu den technischen Maßnahmen	101
Tabelle 29: Entwicklung Kalkgehalt im Stein und sich daraus ergebener Recarbonatisierungseffekt	102
Tabelle 30: Wesentliche Kennzahlen der deutschen Kalksandsteinindustrie für Pfad 2 und Pfad 3	104

12.4 Abkürzungsverzeichnis

BDEW	Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V.
BEHG	Brennstoffemissionshandelsgesetz
BVK	Bundesverband der Deutschen Kalkindustrie e.V.
CAPEX	Investitionsausgaben (engl.: Capital Expenditures)
CCfD	Differenzverträge (engl.: Carbon Contracts for Difference)
CCS	CO ₂ -Abscheidung und -Speicherung (engl.: Carbon capture and storage)
CCU	CO ₂ -Abscheidung und Verwendung (engl.: Carbon Capture and Utilization)
DEFRA	Department for Environment, Food & Rural Affairs
DEHSt	Deutsche Emissionshandelsstelle
EBeV	Emissionsberichterstattungsverordnung
EF	Emissionsfaktor
EPD	Umwelt-Produktdeklaration (engl.: Environmental Product Declaration)

EU ETS	EU Emissionshandel (engl.: European Union Emissions Trading System)
EUA	EU Emissionsberechtigungen (engl.: European Union Allowance)
HKN	Herkunftsnachweise
KS	Kalksandstein
nEHS	nationaler Emissionshandel
NF	Normalformat
OPEX	Betriebskosten (engl.: Operating Expenses)
PPA	Stromkaufvereinbarung (engl.: Power Purchase Agreement)
PV	Photovoltaik
Rec	Recarbonatisierungseffekte
RED II	Erneuerbare-Energien-Richtlinie (Renewable Energies Directive II)
SCS	Smart Carbon Separation
SCC	Smart Carbon Capture