

# Roadmap für eine treibhausgasneutrale Ziegelindustrie in Deutschland

Ein Weg zur Klimaneutralität der Branche bis 2050





Abbildung 1: Produkte der Ziegelindustrie; Quelle: Bundesverband der Deutschen Ziegelindustrie e. V.

## Impressum

### ■ Herausgeber

**Bundesverband der Deutschen  
Ziegelindustrie e. V.**

Reinhardtstraße 12–16  
10117 Berlin  
Tel. +49 (30) 52 00 999-0  
Fax +49 (30) 52 00 999-28  
info@ziegel.de  
www.ziegel.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, 2021

### ■ Haftungsausschluss

Die vorliegende Studie wurde unabhängig im Auftrag des Bundesverbandes der Deutschen Ziegelindustrie 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.

### ■ Gestaltung

TYPOART Design & Print GmbH  
Phantasiestraße 8a  
81827 München  
www.typoart-muenchen.de

### ■ Bildnachweis

Titelbild: © Wienerberger GmbH

# Inhalt

<b>Impressum</b>	<b>2</b>	<b>9 Klimaneutralitätspfad (Pfad 3)</b>	<b>38</b>
<b>1 Zusammenfassung</b>	<b>4</b>	9.1 Maßnahmen	38
<b>2 Zielsetzung und Rahmen der Roadmap 2050</b>	<b>10</b>	9.2 Entwicklung des Energieeinsatzes	39
<b>3 Ausgangslage der Ziegelindustrie in Deutschland</b>	<b>12</b>	9.3 Entwicklung der CO <sub>2</sub> -Emissionen	40
3.1 Beschreibung der Branche	12	9.4 Entwicklung der energiebezogenen Kosten	41
3.2 Die Herausforderung	13	9.5 Sensitivitäten	42
<b>4 Methodik und Vorgehensweise</b>	<b>14</b>	9.5.1 Pfad 3 ohne den Einsatz von alternativen Tonrohstoffen	42
4.1 Scope	14	9.5.2 Entkopplung des Ofen-Trockner-Verbunds und Einsatz Wärmepumpe beim Trockner	44
4.2 Datenbasis Emissionen und Energie	14	9.6 Wesentliche Erkenntnisse	48
4.3 Skizzierung der drei Pfade	15	9.7 Steckbrief Klimaneutralitätspfad (Pfad 3)	49
4.4 Grundlegende Annahmen und Berechnungsparameter	15	<b>10 Gegenüberstellung der Ergebnisse</b>	<b>50</b>
4.5 Vorgehen zur Modellierung	18	10.1 Treibhausgasminderung	50
<b>5 Betrachtete Technologien und Maßnahmen</b>	<b>20</b>	10.2 Investitionsbedarf	51
5.1 Ofen-Trockner-Verbund	20	10.3 Energiebezogene Kosten	51
5.2 Rohstoffe	20	<b>11 Schlussfolgerungen und Handlungsbedarf</b>	<b>52</b>
5.3 Gewichtsreduktion	22	11.1 Relevante Maßnahmen	52
<b>6 Ausgangsbasis</b>	<b>23</b>	11.2 Kosten	52
6.1 Energieeinsatz und -träger	23	11.3 Externe Rahmenbedingungen	52
6.2 Emissionen	23	<b>12 Anhang</b>	<b>55</b>
6.3 Energiebezogene Kosten	23	12.1 Emissionsfaktoren	55
<b>7 Referenzpfad (Pfad 1)</b>	<b>25</b>	12.2 Energiepreise	55
7.1 Maßnahmen	25	12.3 Annahmen zur Entwicklung von Emissionsfaktoren sowie zu Preisentwicklungen	56
7.2 Entwicklung des Energieeinsatzes	26	12.4 Annahmen zur Wirtschaftlichkeitsberechnung	56
7.3 Entwicklung der CO <sub>2</sub> -Emissionen	26	12.5 Annahmen zu den technischen Maßnahmen zur Emissionsreduktion	57
7.4 Entwicklung der energiebezogenen Kosten	27	12.6 Liste der umgesetzten Maßnahmen im Klimaneutralitätspfad (Pfad 3)	63
7.5 Wesentliche Erkenntnisse	28	<b>13 Verzeichnisse</b>	<b>64</b>
7.6 Steckbrief Referenzpfad (Pfad 1)	29	13.1 Quellenverzeichnis	64
<b>8 Technologiepfad (Pfad 2)</b>	<b>30</b>	13.2 Abbildungsverzeichnis	65
8.1 Maßnahmen	30	13.3 Tabellenverzeichnis	67
8.2 Entwicklung des Energieeinsatzes	31	13.4 Abkürzungsverzeichnis	67
8.3 Entwicklung der CO <sub>2</sub> -Emissionen	31		
8.4 Entwicklung der energiebezogenen Kosten	32		
8.5 Sensitivitäten	34		
8.6 Wesentliche Erkenntnisse	35		
8.7 Steckbrief Technologiepfad (Pfad 2)	37		

## 1 Zusammenfassung

Die vorliegende Studie „Roadmap für eine treibhausgasneutrale Ziegelindustrie in Deutschland“ von FutureCamp im Auftrag des Bundesverbandes der Deutschen Ziegelindustrie e. V. zeigt einen möglichen Weg und damit verbundene Maßnahmen und Kosten für die Transformation der deutschen Ziegelindustrie in Richtung Treibhausgasneutralität bis 2050.

### Scope

Bestandteil der Studie sind die Emissionen aus Scope 1 und Scope 2 der Branche. Die Scope 1-Emissionen entstehen durch den Brennstoffeinsatz in den Werken und die anfallenden Prozessemissionen. Fuhrparke insbesondere zum Abbau des Tons aus den Gruben sind nicht Bestandteil der Studie. Diese sind zum überwiegenden Teil an externe Betreiber ausgelagert und fallen damit nicht in den betrachteten Scope. In Scope 2 finden ausschließlich die Emissionen aus dem Fremdstrombezug der Anlagen Berücksichtigung.

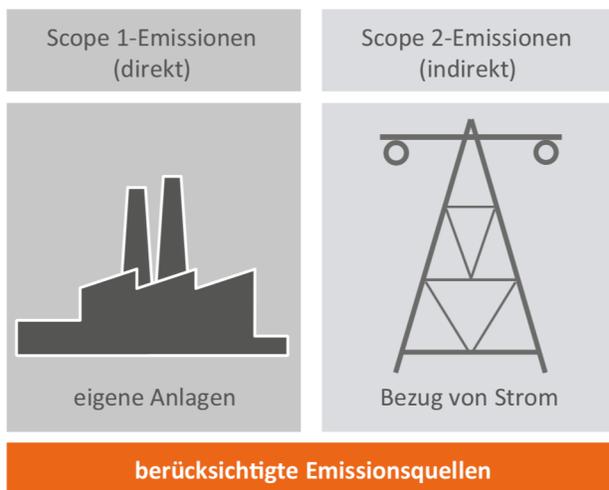


Abbildung 2: Für die Roadmap berücksichtigte Emissionsquellen aus Scope 1 und Scope 2; Quelle: FutureCamp

### Ausgangspunkt und historische Entwicklung

In dieser Roadmap wurde das Jahr 2020 als Basis für alle Pfade zugrunde gelegt. Die Treibhausgasemissionen der deutschen Ziegelindustrie betragen demnach rund 1,74 Mio. t CO<sub>2</sub> im Jahr, ermittelt anhand des Durchschnitts der Jahre 2014 bis 2018.

Diese Jahresemission kann nicht eins zu eins mit früheren Angaben z. B. des Verbandes seit 1990 oder 2005 in Bezug gesetzt werden. Näherungsweise ist dies jedoch möglich, wenn einigen spezifischen Umständen Rechnung getragen wird:

- In älteren statistischen Daten sind nur die Energieverbräuche und deren Emissionen erfasst, nicht die Prozessemissionen aus den Rohstoffen. Diese müssen geschätzt werden.
- Die Zahl der Anlagen hat sich deutlich verändert. Seit den 90er-Jahren sind zudem bereits in den bestehenden Anlagen starke Modifikationen des Brennstoffmixes umgesetzt worden (Umstellung auf Erdgas) und die Emissionen der Branche in der Folge stark gesunken.
- Die Produktion von hochporosierten Hintermauerziegeln hat zu einem verstärkten Porosierungsmittel Einsatz ab ca. 1995 geführt.

Der Bundesverband Ziegel schätzt die Emissionen von 1990 bei gleichem Scope wie diese Roadmap auf 2,9 Mio. t CO<sub>2</sub>/a. Dies macht deutlich, dass bereits der hier als Ausgangsniveau ermittelte Wert von rund 1,74 Mio. t CO<sub>2</sub>/a einen erheblichen Emissionsrückgang von 40 % im Vergleich zu 1990 darstellt und die Ziegelindustrie somit im Ergebnis bereits relevant zur Erreichung von Klimaschutzzielen beigetragen hat.

### 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 dort mögliche technische Maßnahmen unter der Annahme gleichbleibender Produktion und ohne Berücksichtigung möglicher Substitutionseffekte im Baustoffwettbewerb.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Alle in Betracht gezogenen technischen Maßnahmen sowie die dazugehörigen Annahmen z. B. zu Investitionsausgaben, Energieeinsparungen oder Mehrverbräuchen bei anderen Energieträgern (Strom) finden sich im Anhang.

In Pfad 1, dem Referenzpfad, werden keine expliziten Minderungsmaßnahmen umgesetzt, die über auch heute übliche Maßnahmen mit Steigerung der Energieeffizienz hinausgehen. Hier wird also von einem business as usual ausgegangen, um einen Vergleichswert für die weiteren Pfade zu berechnen. Bereits heute bekannte Rahmenbedingungen wie z. B. die angenommene Entwicklung des Emissionsfaktors im deutschen Stromnetz fließen auch in diesen Pfad mit ein.

Die Pfade 2 und 3 unterscheiden sich grundlegend vom Referenzpfad, da hier die Auswirkungen konkreter Minderungsmaßnahmen in den Werken modelliert werden.

In Pfad 2, dem Technologiepfad, ist dafür jährlich ein Investitionsbudget festgelegt, das für einen ehrgeizigen und ambitionierten Minderungskurs der Ziegelindustrie steht.

Im Klimaneutralitätspfad (Pfad 3) wird dann auf eine solche Beschränkung verzichtet. Hier wird die Minderung der Emissionen auf null erzwungen und bestimmt, welches jährliche Investitionsbudget dafür notwendig ist.

### Kernergebnisse

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

Im Technologiepfad gelingt es dagegen, bereits bis 2030 die Emissionen auf rund 1,1 Mio. t CO<sub>2</sub>/a und damit stark zu reduzieren und dem Ziel der Treibhausgasneutralität bis 2050 mit dann noch rund 0,5 Mio. t CO<sub>2</sub>/a deutlich näher zu kommen.

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

Die Ziegelindustrie verfügt über verschiedene Handlungsoptionen, um Emissionen zu reduzieren. Unter den der Roadmap zugrunde liegenden Annahmen kristallisieren sich einige Maßnahmen heraus, die die Transformation der Ziegelindustrie maßgeblich bestimmen. Da Änderungen bei bestimmten Einflussfaktoren erhebliche Auswirkungen auf die Vermeidungskosten einzelner Maßnahmen haben können, sind möglichst stabile (politische) Rahmenbedingungen Voraussetzungen für eine kosteneffiziente Transformation.

Die relevantesten Maßnahmen sind:

- **Entkopplung des Ofen-Trockner-Verbunds**
- **Einsatz von Hochtemperaturwärmepumpen**
- **wasserstoffbefeuerte Öfen**
- **elektrische Öfen**
- **Einsatz biogener Porosierungsmittel**

Darüber hinaus kommen noch eine Vielzahl an Optimierungsmaßnahmen zum Tragen, die entweder direkt den Energieeinsatz reduzieren oder durch verringerten Materialbedarf die Prozessemissionen mindern und gegebenenfalls darüber hinaus auch den Energiebedarf senken.

Des Weiteren ist der **Einsatz von alternativen Tonen** ohne fossilen Kohlenstoff, also kalkfreien Tonen, derzeit die einzig denkbare Alternative zur vollständigen Reduktion der Prozessemissionen.

### Entwicklung energiebezogener Kosten

Die energiebezogenen Kosten setzen sich in dieser Roadmap aus Betriebskosten, Kapitalkosten, CO<sub>2</sub>-Kosten und Kosten der Energieträger zusammen.

Die jährlichen energiebezogenen Kosten steigen bis 2050 bereits im Referenzpfad um ca. 50 % gegenüber dem Basiszeitraum an. Im Technologiepfad liegen sie noch etwas darüber. In diesem Pfad schlagen sich auch deutlich höhere Investitionen in Maßnahmen, die auf Klimaschutz zielen, nieder. Der Klimaneutralitätspfad führt sogar zu Mehrkosten von über 240 % gegenüber dem Ausgangswert. Ein erheblicher Teil davon entfällt auf die zusätzlichen Betriebskosten zur Reduzierung der Prozessemissionen aus den eingesetzten Tonen.

Trotz der angenommenen relevanten CO<sub>2</sub>-Preissteigerungen liegt also eine deutliche Kostendifferenz vor, die betriebliche Investitionsentscheidungen in Richtung Klimaneutralität aus ökonomischen Gesichtspunkten erheblich erschwert.

## Relevante Maßnahmen und Verlauf der CO<sub>2</sub>-Emissionen

	Referenzpfad (Pfad 1)	Technologiepfad (Pfad 2)	Klimaneutralitätspfad (Pfad 3)
Beschreibung Maßnahmen	<ul style="list-style-type: none"> <li>kontinuierliche Effizienzsteigerung beim Einsatz von Strom und Erdgas (interner Einflussfaktor)</li> <li>Reduktion Emissionsfaktoren Strom und Erdgas (externer Einflussfaktor)</li> </ul>	Zusätzliche Maßnahmen ggü. Pfad 1 (nicht abschließend): <ul style="list-style-type: none"> <li>Entkopplung Ofen-Trockner-Verbund in Verbindung mit Wärmepumpe</li> <li>vorgewärmte Verbrennungsluft (Austausch Brenner)</li> <li>optimierte Ziegelgeometrie Dachziegel</li> <li>Einsatz biogener Porosierungsmittel</li> <li>Optimierung Brennhilfsmittel Dachziegel</li> </ul>	Zusätzliche Maßnahmen ggü. Pfad 1 (nicht abschließend): <ul style="list-style-type: none"> <li>Entkopplung Ofen-Trockner-Verbund in Verbindung mit Wärmepumpe</li> <li>Einsatz von H<sub>2</sub> am Ofen</li> <li>elektrischer Ofen</li> <li>Einsatz biogener Porosierungsmittel</li> <li>alternativer Rohstoff Ton HMZ/VMZ/DZ</li> </ul>
Verlauf CO <sub>2</sub> -Emissionen			
Emissionsentwicklung	<b>Bis 2030:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Senkung auf 1,5 Mio. t CO<sub>2</sub></li> </ul>	<b>Bis 2030:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Senkung auf 1,1 Mio. t CO<sub>2</sub></li> </ul>	<b>Bis 2030:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Senkung auf 0,8 Mio. t CO<sub>2</sub></li> </ul>
	<b>Bis 2050:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Senkung auf 1,3 Mio. t CO<sub>2</sub></li> </ul>	<b>Bis 2050:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Senkung auf 0,5 Mio. t CO<sub>2</sub></li> <li>zusätzlich 0,8 Mio. t CO<sub>2</sub> Minderung gegenüber Referenzpfad</li> </ul>	<b>Bis 2050:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Senkung auf 0 t CO<sub>2</sub></li> <li>zusätzlich 1,3 Mio. t CO<sub>2</sub> Minderung gegenüber Referenzpfad</li> </ul>

Tabelle 1: Übersicht Maßnahmen und Verlauf der CO<sub>2</sub>-Emissionen für die betrachteten Pfade

	Referenzpfad (Pfad 1)	Technologiefpad (Pfad 2)	Klimaneutralitätspfad (Pfad 3)
<b>Energiebezogene Kosten setzen sich zusammen aus:</b> Betriebskosten, Kapitalkosten, CO <sub>2</sub> -Kosten, Kosten der Energieträger			
energiebezogene Kostenentwicklung	<b>Kosten 2050:</b>		
	403 Mio. €/a	441 Mio. €/a	919 Mio. €/a
	Mehrkosten zum Referenzpfad:	+38 Mio. €/a	+516 Mio. €/a
	<b>Gesamtinvestitionsausgaben:</b>		
	881 Mio. €	1.733 Mio. €	2.345 Mio. €
	<b>Davon Investitionsausgaben in (Klimaschutz-)spezifische Maßnahmen:</b>		
		852 Mio. €	1.465 Mio. €
	mittlere Investitionsausgaben spezifische Maßnahmen pro Jahr:	28,4 Mio. €	48,8 Mio. €
Verlauf energiebezogene Kosten			
wesentliche Einflussfaktoren	<ul style="list-style-type: none"> <li>• CO<sub>2</sub>-Kosten</li> <li>• Kapitalkosten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kapitalkosten</li> <li>• Betriebskosten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Betriebskosten</li> <li>• Kapitalkosten</li> <li>• Energiepreise</li> </ul>
Hemmnisse		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Wirtschaftlichkeit der Minderungsoptionen</li> <li>• fraglicher Carbon-Leakage-Schutz</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vermeidungskosten</li> <li>• fraglicher Carbon-Leakage-Schutz</li> <li>• Investitionskosten</li> </ul>

Tabelle 2: Übersicht Entwicklung energiebezogener Kosten für die betrachteten Pfade

## Externe Rahmenbedingungen

Durch die Anpassung externer Rahmenbedingungen kann es gelingen, die erheblichen Kostennachteile des Klimaneutralitätspfades auszugleichen oder zumindest abzumildern. Im Rahmen der Roadmap wurden einige Aspekte als besonders relevant identifiziert:

- **Wasserstoff:** Die Verfügbarkeit von bezahlbarem und CO<sub>2</sub>-emissionsfrei erzeugtem Wasserstoff ist entscheidend, um die Emissionen aus der Befeuerung der Öfen zu reduzieren. Es gilt, die entsprechenden Herstellungskapazitäten aufzubauen und die notwendige Infrastruktur zu schaffen. Die Kosten für die verbrauchenden Unternehmen müssen konkurrenzfähig werden, was insbesondere auch bei der Abgabenbelastung künftig zu berücksichtigen ist. Die deutsche Ziegelindustrie benötigt 2050 etwa 1,0 TWh grünen Wasserstoff, um unter den betrachteten Bedingungen klimaneutral zu werden. Diese Menge müsste entsprechend bereitgestellt werden.
- **Strompreis:** Die Entwicklung des Strompreises hat einen wesentlichen Einfluss auf die Kostenentwicklung und auch einzelne Investitionsentscheidungen. Unter Umständen wäre hier sogar eine vollständige Verdrängung des Wasserstoffeinsatzes denkbar. Derzeit liegen die Beschaffungskosten der Ziegelindustrie auch wegen Netzentgelten und bestimmten Abgaben über den Kosten für andere Branchen. Eine Anpassung der Rahmenbedingungen, die zu dieser erhöhten Kostenbelastung führen, ist entscheidend, um die Minderungsmaßnahmen zur wirtschaftlichen Umsetzbarkeit zu führen. Langfristig stabile und bezahlbare Preise für regenerativ erzeugten Strom sind damit eine Voraussetzung zur nachhaltigen Senkung der Emissionen. Im modellierten Klimaneutralitätspfad hat die Branche 2050 einen Grünstrombedarf von etwas weniger als 1,4 TWh.
- **Genehmigungsverfahren:** Die Genehmigungsverfahren müssen vor dem Hintergrund der in dieser Roadmap beschriebenen technischen Maßnahmen deutlich beschleunigt werden. Dies betrifft zum Beispiel Verfahren des Bundesimmissionsschutzgesetzes sowie Planfeststellungsverfahren, zum Beispiel für die Genehmigung zur Tongewinnung. Anderenfalls können die anlagen- und rohstoffbezogenen Maßnahmen ggf. nicht schnell genug umgesetzt werden.
- **Investitionsausgaben:** Der Mehrbedarf an Investitionsmitteln stellt die Ziegelbranche vor große Herausforderungen auf dem Weg zur Treibhausgasneutralität, insbesondere da Entwicklungen wie steigende CO<sub>2</sub>-Kosten den finanziellen Spielraum der betroffenen Unternehmen weiter einschränken. Geeignete Fördermechanismen und stabile Rahmenbedingungen, die Investitionssicherheit geben, sind daher nötig, um die Transformation voranzutreiben. Darüber hinaus können zielgerichtete Fördermechanismen und attraktive Investitionsbedingungen dazu beitragen, die ambitionierten Investitionsvorhaben in die Tat umzusetzen und auch insgesamt die Wirtschaftlichkeit der Maßnahmen zu erhöhen. Insbesondere vor dem Hintergrund der überwiegend mittelständischen Prägung der Branche sind Fördermechanismen auch ein wichtiges Mittel, um etwaige Nachteile beim Zugang zum Kapitalmarkt auszugleichen. Dies gilt bereits für den Technologiepfad und umso mehr für den nachfolgenden Klimaneutralitätspfad. Für einige der genannten Maßnahmen bieten sich bestehende Förderinstrumente an, insbesondere Investitionsförderungen. Diese können auch zu einer schnelleren Umsetzung von Maßnahmen als hier angenommen beitragen. Sehr relevant zur Emissionsreduktion und auch zur Energiewende beitragende Maßnahmen der Ziegelindustrie benötigen noch Pilotierungen und Demonstrationsvorhaben. Einige Maßnahmen – zum Beispiel zur Reduktion prozessbedingter Emissionen durch alternative Tone – benötigen noch Forschungs- und Entwicklungsunterstützung. Abhängig von der Entwicklung relevanter Kostenparameter, wie etwa Preise für Strom oder klimaneutrale Brennstoffe, kann gerade im Zusammenhang mit der Markteinführung komplett neuer Technologien und Verfahren auch Bedarf für eine Deckung operativer Mehrkosten bestehen, wie es beispielsweise im Innovationsfonds der EU bereits angelegt ist und auch im Zusammenhang mit den nachfolgend kurz erörterten Carbon Contracts for Difference.

- **CO<sub>2</sub>-Preis:** Im Referenzpfad wird die Kostenentwicklung wesentlich durch die steigenden CO<sub>2</sub>-Preise getrieben. Diese Entwicklung federt die Kostennachteile der weiteren Pfade im Verhältnis dazu etwas ab. Dennoch ist auch der hinterlegte Preisanstieg auf 100 €/EUA bei Weitem nicht ausreichend, um die wirtschaftlichen Nachteile im Klimaneutralitätspfad auszugleichen. Verschärfende Vorgaben im EU ETS könnten den Preis über dieses Niveau ansteigen lassen, was allerdings unter Umständen mit negativen Auswirkungen auf die Investitionsspielräume der Unternehmen einhergeht. Darüber hinaus ist es in solch einem Fall unerlässlich, dass die internationale Wettbewerbsfähigkeit der Industrie nicht gefährdet wird, wie unter dem Punkt Carbon-Leakage-Schutz ausgeführt wird. Ein kurzfristiges Instrument zur Überbrückung der Differenz zwischen tatsächlichem CO<sub>2</sub>-Preis und den für bestimmte Investitionen erforderlichen CO<sub>2</sub>-Preisen könnte in dem aktuell diskutierten Instrument Carbon Contracts for Difference (CCfD) bestehen. Die Vermeidungskosten einiger relevanter Maßnahmen liegen etwa im Bereich zwischen 100 und 300 €/t CO<sub>2</sub>. Ein CCfD könnte die Differenz zwischen den insbesondere im EU-Emissionshandel bestehenden CO<sub>2</sub>-Preisen – und damit den für einen Ziegelhersteller relevanten CO<sub>2</sub>-Kosten – und den Vermeidungskosten in Form einer vertraglich für eine Laufzeit definierten Ausgleichszahlung kompensieren und so die notwendigen Investitionen wirtschaftlich absichern. Je nach Ausgestaltung eines CCfD kann sich diese Zahlung auf Kostendifferenzen bei Kapitalkosten (CAPEX) oder operativen Kosten (OPEX) oder beides beziehen.
- **Carbon-Leakage-Schutz:** Die deutsche Ziegelindustrie steht in direktem und auch internationalem Wettbewerb zu anderen Baustoffen. Einige dieser Baustoffe werden unter Umständen in Ländern produziert, in denen keine entsprechend strenge CO<sub>2</sub>-Bepreisung erfolgt, und können daher kostengünstig, aber mit hohen Emissionen hergestellt werden. Wenn die deutsche Ziegelindustrie infolge der hiesigen klimapolitischen Rahmenbedingungen Anstrengungen zur Erreichung der Treibhausgasneutralität unternimmt, führen die steigenden Kosten zu einer sinkenden internationalen Wettbewerbsfähigkeit.

Die kostenlose Zuteilung stellt das wesentliche Mittel zum Schutz vor Carbon Leakage dar. Ein derartiger Schutz ist unabdingbar, um eine Verlagerung der Emissionen in Länder ohne CO<sub>2</sub>-Bepreisung zu verhindern. Nur wenn eine solche Verlagerung vermieden wird, werden auch tatsächlich Emissionen gemindert. Die ausgewiesenen CO<sub>2</sub>-Kosten zeigen die Notwendigkeit für einen wirksamen Carbon-Leakage-Schutz auf, falls Wettbewerbsregionen bis dahin nicht auch vergleichbare CO<sub>2</sub>-Kosten aufweisen (auch über die aktuelle Handelsperiode hinaus). Dies gilt vor allem mit Blick auf den erheblichen Umfang der für Klimaneutralität notwendigen Investitionen in den Anlagen der im Wesentlichen mittelständisch geprägten Ziegelindustrie.

Um einen kosteneffizienten Weg zur Treibhausgasneutralität beschreiten zu können, müssen die dafür notwendigen Rahmenbedingungen so bald wie möglich geschaffen und ein Fortbestehen garantiert werden. Nur dann haben Unternehmen die nötige Investitionssicherheit, um die notwendige, aber auch tiefgreifende Transformation voranzutreiben.

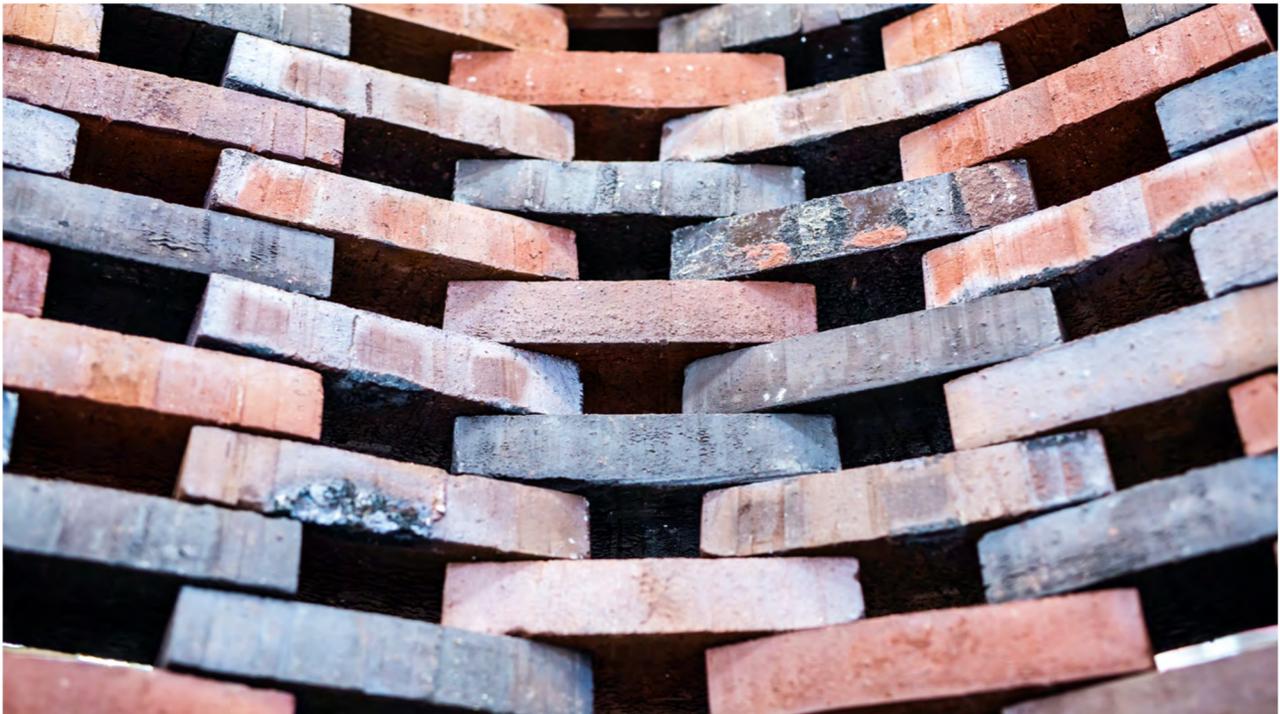


Abbildung 3: Vormauerziegel; Quelle: Bundesverband der Deutschen Ziegelindustrie e. V.

## 2 Zielsetzung und Rahmen der Roadmap 2050

Die vorliegende Roadmap dient dazu aufzuzeigen, wie die deutsche Ziegelindustrie das Ziel der Treibhausgasneutralität bis 2050 erreichen kann. Dazu wird zunächst auf Basis der aktuellen CO<sub>2</sub>-Emissionen und des aktuellen Energieträgereinsatzes dargelegt, welche Prozesse hierbei von besonderer Bedeutung sind.

Im Anschluss lassen sich Handlungsoptionen identifizieren, die unter technischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten geeignet sind, die Emissionen der Ziegelindustrie beträchtlich oder gar vollständig zu reduzieren. Besonderes Augenmerk liegt dabei auf der Identifizierung der wesentlichen Einflussfaktoren und der Herausarbeitung möglicher Hemmnisse auf dem Weg zur Treibhausgasneutralität.

Betrachtet werden dabei ausschließlich Handlungsoptionen, die in direktem Zusammenhang mit der Ziegelproduktion stehen. Dementsprechend beleuchtet die Studie den individuellen Beitrag zur Emissionsreduktion, welchen die Ziegelindustrie unter gewissen Rahmenbedingungen zu leisten vermag.

Im Fokus der Betrachtung stehen daher die energieintensiven Vorgänge Trocknen und Brennen in den Ziegelwerken. Gerade mit Blick auf die vollständige Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen fließen allerdings zwangsläufig auch Handlungsoptionen zur Minderung der Prozessemissionen aus den Rohstoffen in die Studie mit ein.

Der in der Roadmap eingenommene Blickwinkel ist betriebswirtschaftlich orientiert. Der tatsächliche Einsatz technologischer Alternativen und die Umsetzung damit verbundener Investitionen erfordert demnach auch die Wirtschaftlichkeit dieser Maßnahmen aus Unternehmenssicht. Aus heutiger Perspektive sind viele der Alternativen (noch) nicht wirtschaftlich.

Die Treibhausgas-minderungen und die damit verbundenen Kosten der Ziegelindustrie werden in der vorliegenden Roadmap in drei definierten Pfaden untersucht:

- Der **Pfad 1** beschreibt als Referenzpfad die voraussichtliche Entwicklung auf Basis heute bereits eingeschlagener Veränderungen und erwarteter Entwicklungen aufgrund heutiger Rahmenbedingungen.
- Im **Pfad 2** wird untersucht, welche Emissionsminderungen unter einem dafür vorgegebenen erhöhten Investitionsbudget erreicht werden können.
- Der **Pfad 3** führt unter Nutzung aller notwendigen Handlungsoptionen zur Treibhausgasneutralität ohne Restriktionen hinsichtlich der verfügbaren Investitionen oder der erwarteten Wirtschaftlichkeit der ergriffenen Maßnahmen.

Während in Pfad 1 keine konkreten Maßnahmen aus dem betrachteten Technologieportfolio umgesetzt werden, ist das Portfolio für die Pfade 2 und 3 nahezu identisch. Der wesentliche Unterschied ergibt sich hier durch die Aufhebung der Budgetrestriktion hinsichtlich der Investitionen im Pfad 3. Neben dem zeitlichen Verlauf der Emissionen werden auch die energiebezogenen Kosten sowie der Energieeinsatz berechnet. Für Pfad 3 werden darüber hinaus die notwendigen Investitionen bestimmt. Hieraus lassen sich Schlussfolgerungen und Handlungsfelder ableiten, um die notwendigen Rahmenbedingungen zu schaffen, die es der Ziegelindustrie ermöglichen, derartig substantielle Emissionsminderungen zu leisten. Konkrete Empfehlungen zu politischen Instrumenten werden im Rahmen dieser Roadmap nicht herausgearbeitet, jedoch wird aufgezeigt, wo diese ansetzen sollten.

Die vorliegende Roadmap wurde vom Bundesverband der Deutschen Ziegelindustrie e. V. in Auftrag gegeben. Die hier enthaltenen Äußerungen sind jedoch Aussagen der Verfasser. Die Erarbeitung erfolgte im Zeitraum März 2020 bis Februar 2021. Annahmen zu wettbewerbssensitiven Parametern wie z. B. Energiepreisen beruhen auf statistischen Daten oder anderen öffentlich zugänglichen Quellen.

Vor dem Hintergrund der betriebswirtschaftlichen Perspektive der vorliegenden Roadmap und zur Berücksichtigung der spezifischen Rahmenbedingungen der betrachteten Branche wurde ein Begleitkreis<sup>2</sup>, bestehend aus Vertretern des Bundesverbandes und der dort organisierten Unternehmen, in die Erarbeitung der Studie eingebunden. 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.

### Auftraggeber der Studie

Der Bundesverband der Deutschen Ziegelindustrie e.V. vertritt rund 80 Hersteller von Pflasterklinkern, Vormauer-, Hintermauer- und Dachziegeln in Deutschland. Die Branche ist gekennzeichnet durch einen strukturellen Mix aus industriellem Mittelstand bzw. inhabergeführten Familienunternehmen und konzerngebundenen Großunternehmen. Insgesamt erwirtschaftet die Branche mit rund 8.500 Beschäftigten in Deutschland einen Jahresumsatz von 1,5 Mrd. Euro (2019).

2 K. Armbrrecht (Bundesverband der Deutschen Ziegelindustrie e. V.), R. Borrmann (Röben Tonbaustoffe GmbH), A. Emhee (Schlagmann Poroton Vertriebs GmbH), Dr. M. Frederichs (Bundesverband der Deutschen Ziegelindustrie e. V.), Dr. V. Heizinger (LEIPFINGER-BADER GmbH), R. Hermannsdörfer (BMI Technical Services GmbH), D. Jung (Jacobi Tonwerke GmbH), E. Rimpel (Institut für Ziegelforschung Essen e.V. (IZF)), K. Steenheuer (Wienerberger AG), Dr. A. Stoll (ERLUS AG)

## 3 Ausgangslage der Ziegelindustrie in Deutschland

### 3.1 Beschreibung der Branche

Seit Jahrhunderten prägen Dach- und Mauerziegel das Erscheinungsbild unserer Bauwerke und Städte. Dank ihrer Langlebigkeit können wir historische Bauten weiterhin bestaunen und nutzen. Die Ziegelbranche lässt sich in die drei Bereiche Hintermauer-, Vormauer- und Dachziegel unterteilen. In den Bereich Vormauerziegel fallen auch Produkte wie Pflasterklinker. Auch wenn sich die Bereiche in der Anwendung deutlich unterscheiden, sind die grundlegenden Prozesse so ähnlich, dass eine gemeinsame Betrachtung möglich ist. Im Laufe der Zeit wurden die Herstellungsverfahren immer weiter optimiert, sodass heute ein qualitativ extrem hochwertiger Baustoff produziert wird, der nichts von seiner Attraktivität verloren hat. Dabei wurden besonders auch die schädlichen Einflüsse auf die Umwelt immer weiter reduziert. Hier sind insbesondere die drastische Reduktion der ausgestoßenen Fluor- und Chlorwasserstoffe, Schwefeldioxid sowie der organischen Kohlenstoffverbindungen in den letzten Jahrzehnten zu nennen.



Abbildung 4: Historischer Stadtkern; Quelle: Vandersanden Deutschland GmbH.

#### Langlebigkeit

Gebäude, die aus Ziegeln errichtet werden, haben eine lange Lebensdauer, wie zahlreiche Beispiele belegen. In Umweltproduktdeklarationen wird angegeben, dass aus Ziegeln errichtete Bauwerke mindestens 150 Jahre stehen können. Durch diese Langlebigkeit können energetische und mineralische Ressourcen gespart werden. Diese Effekte sind – ebenso wie die Energieeinsparung beim Gebäudebetrieb durch Einsatz von hochwärmedämmendem Ziegelmauerwerk – nicht Bestandteil dieser Untersuchung.

Treibhausgasemissionen entstehen in der Branche vor allem auf zwei Arten. Zum einen ist hier die Verfeuerung von fossilen Energieträgern zur Bereitstellung von Hochtemperaturwärme für die elementaren Prozesse Trocknen und Brennen zu nennen. Hier wurden in der Vergangenheit bereits erfolgreich große Anstrengungen unternommen, um auf den emissionsärmeren Energieträger Erdgas umzustellen. Noch in den 1990er-Jahren wurden relevante Mengen an Kohle und schwerem Heizöl in der Ziegelproduktion eingesetzt. Bis heute wurden diese Brennstoffe nahezu vollständig durch Erdgas substituiert.

#### Umstieg auf Erdgas erfolgt

Seit 1990 hat innerhalb der Ziegelindustrie ein konsequenter Wechsel zu Erdgas stattgefunden. So wurden 1990 noch die in nachfolgender Tabelle benannten Brennstoffe eingesetzt. Im Jahr 2020 erfolgte dagegen ein nahezu 100%iger Einsatz von Erdgas. Mit anderen Worten: Der Ausstieg aus der Nutzung von Kohle ist in der Ziegelindustrie in Deutschland bereits vollzogen.

Tabelle 3: Energieträgereinsatz der Ziegelindustrie 1990<sup>3</sup>

Erdgas (1.000 m <sup>3</sup> /a)	557.958
Braunkohle (t/a)	267.717
Steinkohle (t/a)	10.586
Steinkohlenkoks (t/a)	28
Heizöl-S (t/a)	66.031
Heizöl-L (t/a)	46.042

Zum anderen entstehen beim Brennen von Ziegeln sogenannte Prozessemissionen, die sich nicht allein durch den Wechsel auf einen CO<sub>2</sub>-neutralen Energieträger reduzieren lassen. Beim Brennvorgang entsteht aus im Ton enthaltenem fossilem Kohlenstoff bzw. Karbonaten und zugesetzten Porosierungsmitteln CO<sub>2</sub>. Tone mit derartigen Bestandteilen kommen in einigen Regionen Deutschlands vor und werden aufgrund guter keramischer Eigenschaften zu Ziegeln verarbeitet. Bei den zugesetzten Porosierungsmitteln der Hintermauerziegel handelt es sich allerdings oft um Abfallstoffe, die im Sinne der stofflichen Verwertung hier in einem neuen Produkt eingesetzt werden und somit nicht der thermischen Verwertung zugeführt werden müssen.

3 Quelle: RWI Essen (1999)

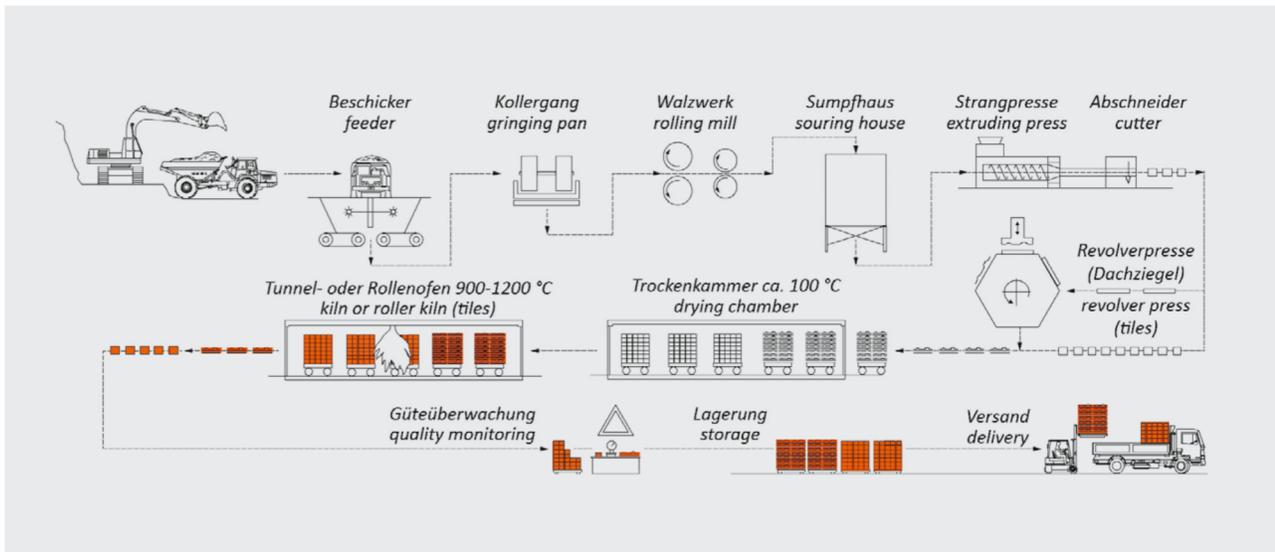


Abbildung 5: Ziegelherstellung; Quelle: Bundesverband der Deutschen Ziegelindustrie e.V.

### 3.2 Die Herausforderung

Angesichts der energieintensiven Vorgänge und der angesprochenen Prozessemissionen steht die Ziegelindustrie vor tiefgreifenden Veränderungen auf dem Weg zur Treibhausgasneutralität bis 2050. Die eingesetzten Energieträger müssen vollständig durch neue, klimaneutrale Varianten ersetzt, Prozesse neu gedacht und Anlagen angepasst oder grundlegend neu konzipiert werden. Dies ist mit langfristig hohen Investitionen verbunden. All das muss in einem Umfeld geschehen, das bereits aktuell hohen Kostendruck auf die betroffenen Unternehmen bzw. die äußerst kapitalintensive Industrie ausübt. Steigende direkte oder indirekte Kosten für CO<sub>2</sub>-Emissionen engen den finanziellen Spielraum weiter ein.

Durch die aktuellen politischen Rahmenbedingungen steht die deutsche Ziegelindustrie unter einem hohen Wettbewerbsdruck, gerade auch gegenüber anderen emissionsintensiven Baustoffen. Importe aus dem Nicht-EU-Ausland unterliegen nicht dem europäischen Emissionshandel und genießen daher einen nicht zu unterschätzenden Wettbewerbsvorteil gegenüber der heimischen Produktion von Ziegeln. Ohne einen entsprechenden Carbon-Leakage-Schutz werden hiesige Anstrengungen zur Reduktion der Emissionen unweigerlich zu einer Verlagerung ins Ausland führen.

Die deutsche Ziegelindustrie ist dennoch unvermindert bereit und daran interessiert, eigene Lösungsansätze einzubringen und ihren Beitrag zur Erreichung der 2015 in Paris vereinbarten Ziele zu leisten. Die vorliegende Roadmap zeigt mögliche Ansätze und Wege zu diesem übergeordneten Ziel auf und macht deutlich, welche Rahmenbedingungen dafür vorliegen müssen.

Der Ziegel prägt unser Siedlungs- und Städtebild auf entscheidende Weise – dieses kulturelle Erbe und die damit einhergehende hohe Wohnqualität gilt es zu erhalten. Die notwendigen Voraussetzungen für eine weitestgehend treibhausgasneutrale Produktion müssen geschaffen werden, damit nachhaltiges und verantwortungsbewusstes Bauen mit dem Baustoff Ziegel weiterhin möglich ist und seine individuelle Charakteristik erhalten bleibt.

## 4 Methodik und Vorgehensweise

### 4.1 Scope

Bestandteil der Studie sind die Emissionen aus Scope 1 und Scope 2 der Branche. Die Scope 1-Emissionen entstehen durch den Brennstoffeinsatz in den Werken und die anfallenden Prozessemissionen. Da der Brennstoffeinsatz bereits nahezu vollständig auf Erdgas beruht, wird zur Vereinfachung der Modellierung angenommen, dass ausschließlich Erdgas als Brennstoff zum Einsatz kommt. Die Ausgangsbasis der Emissionen bleibt davon unberührt. Fuhrparke, insbesondere zum Abbau des Tons aus den Gruben, sind nicht Bestandteil der Studie. Diese sind zum überwiegenden Teil an externe Betreiber ausgelagert und fallen damit nicht in den betrachteten Scope. Um die Vergleichbarkeit zwischen allen Werken zu gewährleisten, werden die Fuhrparke generell nicht berücksichtigt. Deren Anteil an den Emissionen wäre darüber hinaus im Verhältnis eher gering und der Einfluss der Ziegelindustrie auf Entwicklungen im Fahrzeugbereich marginal. Die Ziegelindustrie wird sich hier den allgemeinen Entwicklungen des Verkehrswesens hin zu einer emissionsärmeren Mobilität anschließen, aber sie kann keinen entscheidenden Einfluss auf den Verlauf dieser Entwicklungen nehmen. Da diese Studie Handlungsoptionen für die industrielle Ziegelproduktion aufzeigen soll, wird das Transportwesen konsequenterweise ausgeklammert. In Scope 2 finden ausschließlich die Emissionen aus dem Fremdstrombezug der Anlagen Berücksichtigung.

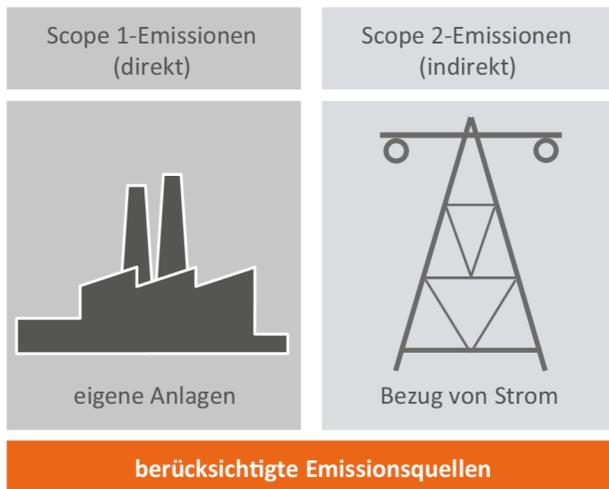


Abbildung 6: Für die Roadmap berücksichtigte Emissionsquellen aus Scope 1 und Scope 2; Quelle: FutureCamp

### 4.2 Datenbasis Emissionen und Energie

Die Ziegelbranche unterliegt in ihrer Gesamtheit konjunkturellen Schwankungen. Um derartige Effekte bei der Ausarbeitung der Roadmap zu minimieren, wurde ein mehrjähriger Basiszeitraum gewählt. Aufgrund der Datenverfügbarkeit zum Zeitpunkt der Studiererstellung wurden als Basiszeitraum die Jahre 2014 bis 2018 festgelegt. Ausgangspunkt der Modellierung sind die Emissionen der im europäischen Emissionshandelssystem (EU ETS) erfassten deutschen Ziegeleien. Diese Daten wurden durch den Bundesverband der Deutschen Ziegelindustrie e. V. bereitgestellt. Die Daten sind unterteilt in die Bereiche Hintermauer- (HMZ), Vormauer- (VMZ) und Dachziegel (DZ). Damit ist eine hervorragende Basis für die zu betrachtenden Emissionen vorhanden. Der Verband stellte ebenfalls Daten zur Produktion bereit. Darüber hinaus stehen statistische Daten über den Energieträgereinsatz in diesem Industriezweig zur Verfügung. Bei deren Betrachtung lässt sich feststellen, dass der Einsatz weiterer Energieträger, abgesehen von Strom und Erdgas, in den Werken zu vernachlässigen ist. Da in den genutzten Daten (basierend auf NACE 2332 „Herstellung von Ziegeln und sonstiger Baukeramik“) noch die Produktion von Steinzeugrohren enthalten ist, wurden 3 % des Erdgaseinsatzes in Abzug gebracht. Diese Annahme ist konservativ. Der Stromverbrauch wurde vollständig der Ziegelproduktion zugerechnet.

Auf Basis konkreter Daten zu mehreren Werken der drei Bereiche wurde berechnet,

- welcher Anteil der Gesamtemissionen eines durchschnittlichen Werks auf Prozessemissionen zurückzuführen ist und
- welcher Anteil aus der Verbrennung von Energieträgern entsteht.

Im Bereich Hintermauerziegel wurde hier noch unterschieden zwischen Emissionen aus dem Einsatz von Porosierungsmitteln und Emissionen aus den eingesetzten Tönen. Diese Anteile konnten dann auf die jeweiligen Produktgruppen übertragen werden. Darüber lassen sich die Emissionen aus den Verbrennungsprozessen in den jeweiligen Produktgruppen bestimmen, was eine Aufteilung des gesamten Erdgaseinsatzes ermöglicht. Bei Verwendung eines Emissionsfaktors für Erdgas von  $0,056 \text{ t CO}_2/\text{GJ}^4$  weichen die dann berechneten Emissionen um knapp 0,6 % gegenüber den Emissionen aus dem Register des EU ETS nach oben ab. Aus Gründen der Konservativität wurde als Ausgangswert der höhere Wert veranschlagt.

4 Quelle: DEHSt (2020)

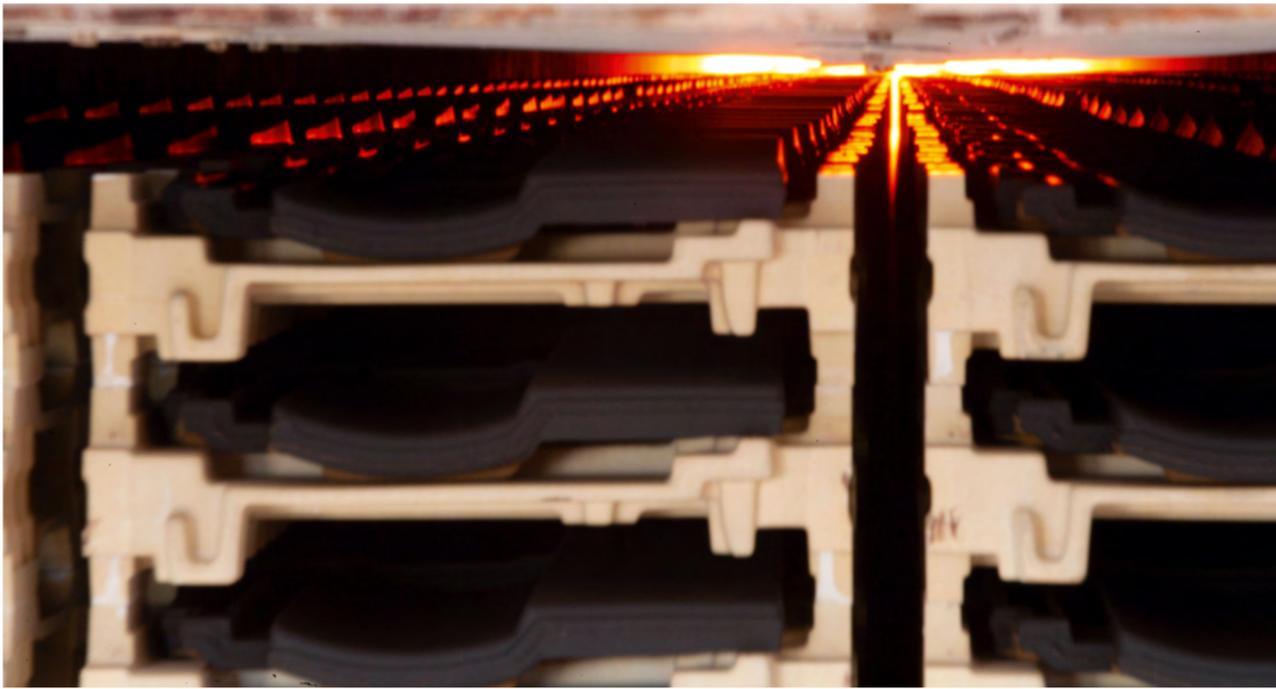


Abbildung 7: Brennvorgang von Dachziegeln im Tunnelofen; Quelle: ERLUS AG

### 4.3 Skizzierung der drei Pfade

Die Roadmap gliedert sich in der weiteren Betrachtung in drei unterschiedliche Pfade.

In Pfad 1, dem Referenzpfad, werden keine expliziten Minderungsmaßnahmen getroffen, die über gewisse Effizienzmaßnahmen hinausgehen. Hier wird von business as usual ausgegangen, um einen Vergleichswert für die weiteren Pfade zu berechnen. Bereits heute bekannte Rahmenbedingungen fließen auch in diesen Pfad mit ein.

Die Pfade 2 und 3 unterscheiden sich grundlegend vom Referenzpfad, da hier die Auswirkungen konkreter Minderungsmaßnahmen in den Werken modelliert werden.

In Pfad 2, dem Technologiepfad, ist dafür jährlich ein Investitionsbudget festgelegt, das für einen ehrgeizigen und ambitionierten Minderungskurs der Ziegelindustrie steht.

Im Klimaneutralitätspfad (Pfad 3) wird dann auf eine solche Beschränkung verzichtet. Hier wird die Minderung der Emissionen auf null erzwungen und bestimmt, welches jährliche Investitionsbudget dafür vonnöten ist.

### 4.4 Grundlegende Annahmen und Berechnungsparameter

Zur Modellierung des zeitlichen Verlaufs der Emissionen und der damit einhergehenden Entwicklungen bei Energieträgereinsatz und Kosten ist es nötig, eine Reihe von Annahmen

zu treffen. Diese grundlegenden Annahmen wurden im Rahmen der Roadmap zwischen allen drei Pfaden gleich gehalten, um die Vergleichbarkeit zu gewährleisten.

### Produktionsentwicklung

Es wird davon ausgegangen, dass das Produktionsniveau bis 2050 konstant auf dem Ausgangsniveau (Durchschnitt der Produktion der Jahre 2014 bis 2018) bleibt. Nur so ist es möglich, vergleichende Aussagen in Bezug auf heute zu treffen und die Minderungsbeiträge der Ziegelindustrie mit Fokus auf die Produktionsanlagen aussagekräftig zu beurteilen. Auch (in beide Richtungen denkbare) Substitutionseffekte im Baustoffwettbewerb werden nicht betrachtet bzw. unterstellt.



Abbildung 8: Ziegelwerk; Quelle: Schlagmann Poroton GmbH & Co. KG

## Effizienzsteigerungen und Investitionen mit Wirkung auf die Energieeffizienz

Sowohl für den Brennstoff- als auch den Stromeinsatz wird für das erste Jahr der Modellierung eine konservative Effizienzsteigerung von 1 % angesetzt, die im Verlauf von 20 Jahren dann asymptotisch auf null absinkt. Derartige Effizienzgewinne lassen sich etwa durch die Optimierung bestehender Verfahren und den Einsatz moderner Querschnittstechnologien erreichen. Im Verlauf der Zeit wird es allerdings immer schwieriger und damit teurer, derartige Einsparungen zu realisieren.

Es wird davon ausgegangen, dass für diese Effizienzgewinne 40 % der durchschnittlichen jährlichen Investitionen in Maschinen der Branche aufgewendet werden müssen. Sie belaufen sich in den Jahren 2014 bis 2018 im Durchschnitt auf 71,02 Mio. €/a. 40 % entsprechen somit einem Betrag von 28,41 Mio. €/a. Diese Investitionen dienen nicht allein den Effizienzsteigerungen, sondern insbesondere auch dem Ersatz von Anlagen und damit der Aufrechterhaltung des Betriebs. Die Investitionsquote der Branche beträgt heute rund 4,5 %. Die Effizienzsteigerungen gehen mit einem Teil der maschinenbezogenen Investitionen einher. Zur Weiterführung des Betriebs müssen diese Investitionen auch dann noch getätigt werden, wenn keine Effizienzgewinne auf diesem Weg mehr erzielt werden, da die Möglichkeiten der Optimierung durch Querschnittstechnologien ausgeschöpft sind. Insgesamt werden auf diesem Weg Einsparungen gegenüber dem Basisniveau bei Erdgas- und Stromeinsatz von rund 10 % erreicht.

## Emissionsfaktoren

Der Emissionsfaktor von Erdgas sinkt im zeitlichen Verlauf der Roadmap von 0,056 t CO<sub>2</sub>/GJ auf etwa 0,047 t CO<sub>2</sub>/GJ ab. Dies ist auf die Beimischung von Biogas oder anderem klimaneutralem Gas im Sinne der Erneuerbaren Energien Richtlinie – RED II zurückzuführen. Dabei spielt es für die Betrachtungen hier keine Rolle, welches klimaneutrale Gas eingespeist wird und auch nicht, ob dies auf überregionaler und regionaler Ebene erfolgt oder ob dies nur einzelne Unternehmen tun.

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 Kohle, bis 2050 auf null. Voraussetzung ist die Umsetzung des Kohleausstiegs nach aktueller Gesetzeslage.

## Energiepreise

Die Energiepreise unterliegen historisch gesehen starken Schwankungen und können auch standortspezifisch Unterschiede aufweisen. Im Rahmen der Studie werden der Einfachheit halber die Energiepreise für Strom, Erdgas und Holzpellets über den Betrachtungszeitraum konstant gehalten. Die Preise sind zudem an den Energiebedarf der Ziegelindustrie angepasst. Da die CO<sub>2</sub>-Kosten separat betrachtet werden, wurde der angenommene Strompreis<sup>5</sup> um den CO<sub>2</sub>-Anteil bereinigt, enthält die dort inkludierten CO<sub>2</sub>-Kosten also nicht, da diese gesondert ausgewiesen werden.

Neben den klassischen Energieträgern wie Strom und Erdgas kommen zudem Wasserstoff und Synthesegas für neue Technologien in Betracht. Die Herstellung dieser Energieträger befindet sich derzeit noch in der Entwicklung bzw. am Beginn der Markteinführung, wodurch sich auch der diesbezügliche Energiepreis mit Stand der Entwicklung und Verbreitung stark verändern wird. Für die Energiepreise Wasserstoff und Synthesegas werden daher Prognosewerte aus der Literatur herangezogen. Eine Aufschlüsselung zu den Energiepreisen und den Entwicklungen können dem Anhang entnommen werden.

## CO<sub>2</sub>-Kosten und Carbon Leakage

Wie bereits aktuell zu beobachten ist, haben die Ambitionssteigerungen der europäischen Klimapolitik eine Steigerung des CO<sub>2</sub>-Preises für Emissionen, die dem EU ETS unterliegen, zur Folge. Dies betrifft alle im Rahmen der Studie betrachteten Emissionen. Die Ziegelwerke selbst unterliegen direkt dem EU ETS und damit auch die hier entstehenden Emissionen. Bei den Emissionen aus dem Strombezug wird davon ausgegangen, dass sie ebenfalls in EU ETS-pflichtigen Anlagen anfallen und damit ebenfalls mit diesem Preis zu versehen sind, der hier explizit nicht im Strompreis, sondern bei den CO<sub>2</sub>-Kosten enthalten ist. Für den Preis wird ein linearer Verlauf von einem Startwert von 25 €/EUA (2020) auf 100 €/EUA (2050) angesetzt.

---

<sup>5</sup> Neben den Kosten für Beschaffung und Vertrieb sind auch die Netzentgelte enthalten. Sämtliche Umlagen und Steuern wurden im Preis dagegen nicht berücksichtigt.

Wichtig für das Verständnis ist, dass aufgrund des langen Betrachtungszeitraums und des Fokus auf investive Maßnahmen in den Werken alle Emissionen voll bepreist und die ausgewiesenen Kosten, also Entlastungseffekte durch kostenlose Zuteilungen, nicht berücksichtigt werden. Dafür sprechen mehrere Gründe:

- Die in der Studie beleuchteten Emissionsminderungen sind mit relevanten Investitionen verbunden. Aus betriebswirtschaftlicher Sicht ist es für die Investitionsentscheidung an deutschen Standorten unerheblich, ob eine Reduktionsmaßnahme den Zukaufbedarf an Zertifikaten verringert oder sogar Erlöse durch den Verkauf von überschüssigen Zertifikaten ermöglicht. Durch die Zuteilungssystematik mithilfe von Benchmarks ist letzteres Szenario weiterhin denkbar.
- Der Ausstattungsgrad mit kostenlosen Zuteilungen kann sich bereits heute stark zwischen einzelnen Anlagen unterscheiden. Durch die Verschärfung der Benchmarks für die 4. Handelsperiode ist ein weiteres Absinken bereits absehbar. Aus Konsistenzgründen und um die Bedeutung der CO<sub>2</sub>-Kosten sichtbar zu machen, werden diese durchgehend voll bepreist.
- Für die Stromerzeugung gibt es bereits aktuell keine kostenlose Zuteilung. Daher werden die CO<sub>2</sub>-Kosten aus der Stromerzeugung voll berücksichtigt und bei den CO<sub>2</sub>-Kosten erfasst und ausgewiesen. Durch den steigenden Stromeinsatz gewinnt dieser Punkt an Bedeutung.

Natürlich stellt die kostenlose Zuteilung das wesentliche Mittel zum Schutz vor Carbon Leakage dar. Ein derartiger Schutz ist unabdingbar, um eine Verlagerung der Emissionen in Länder ohne CO<sub>2</sub>-Bepreisung zu verhindern. Nur wenn eine solche Verlagerung verhindert wird, werden auch tatsächlich Emissionen gemindert. Die ausgewiesenen CO<sub>2</sub>-Kosten zeigen die Notwendigkeit für einen wirksamen Carbon-Leakage-Schutz auf. Falls Wettbewerbsregionen bis dahin nicht auch vergleichbare CO<sub>2</sub>-Kosten aufweisen, gilt dies auch über die aktuelle Handelsperiode hinaus. Dies hat vor allem mit Blick auf den erheblichen Umfang der für Klimaneutralität notwendigen Investitionen in den Anlagen der im Wesentlichen mittelständisch geprägten Ziegelindustrie Bedeutung.

## Kosten

Die Roadmap beleuchtet nicht sämtliche Kosten der deutschen Ziegelindustrie. Es werden ausschließlich die Kosten betrachtet, die direkt im Zusammenhang mit den Themen Energie und Emissionen stehen und die daher durch die betrachteten Rahmenbedingungen und Minderungsoptionen Änderungen erfahren. Darunter fallen:

- Kosten für Energieträger
- CO<sub>2</sub>-Kosten
- Investitions- und Kapitalkosten für im Rahmen der Roadmap betrachtete Investitionen
- Betriebskosten für Öfen und Trockner (inkl. zusätzliche Personalkosten, beispielsweise für neue Technologien)
- zusätzliche Betriebskosten durch konkrete Minderungsmaßnahmen, z. B. alternative Rohstoffe

Die Kapitalkosten werden mit einem festgesetzten Zinssatz von 8 % berechnet, als Abschreibungszeitraum werden 20 Jahre angesetzt. Dieser Wert für den Abschreibungszeitraum entspricht einem Mittelwert für die relevanten Anlagen der Branche.

## Anlagenzahl

Die Anzahl an Öfen und Trocknern in einem Ziegelwerk unterscheidet sich individuell. Eine qualifizierte Schätzung ergibt etwa 1,5 Öfen pro Werk und 0,75 Trockner pro Ofen. Ausgehend von der Zahl von 106 Werken lässt sich hierüber die Anzahl an Öfen und Trocknern bestimmen, die für die weitere Modellierung verwendet wird. Zur Vereinfachung wird im Rahmen der Studie davon ausgegangen, dass die Verbräuche der einzelnen Öfen bzw. Trockner identisch sind. Ebenfalls über eine qualifizierte Schätzung durch den Verband wird angenommen, dass 60 % des Energieeinsatzes durch Brennstoffe zur Befuerung der Öfen verwendet werden. Die restlichen 40 % dienen der Beheizung der Trockner. Mit diesen Annahmen lässt sich der durchschnittliche Verbrauch eines Ofens mit ca. 18 GWh/a bestimmen. Der durchschnittliche Verbrauch eines Trockners liegt bei ca. 16 GWh/a. Es wird nicht zwischen den drei Produktgruppen unterschieden. Es wird des Weiteren angenommen, dass Öfen bzw. Trockner im Betrachtungszeitraum maximal einmal ausgetauscht oder auf einen anderen Brennstoff umgerüstet werden.

#### 4.5 Vorgehen zur Modellierung

Die Modellierung der Emissionsminderungen unterscheidet sich grundlegend zwischen dem Referenzpfad 1 und den Pfaden 2 und 3. Für den Referenzpfad wurden Emissionen, Energieeinsätze und Kosten rein auf Industriebene modelliert. Ausgehend vom Ausgangsniveau beim Energieträgereinsatz, wurde unter Beachtung der gesamtindustriellen Effizienzgewinne der zeitliche Verlauf des Energieeinsatzes berechnet. Zur Bestimmung der Emissionsminderungen wurden dann die sinkenden Emissionsfaktoren der Energieträger berücksichtigt. Die jährlichen Kosten ergeben sich durch Multiplikation der eingesetzten Energieträger sowie der resultierenden CO<sub>2</sub>-Emissionen mit ihren jeweilig geltenden Preisen. Dazu kommen noch die Kapitalkosten für die Investitionen, die zur Erzielung der Effizienzgewinne notwendig sind. Die betrachteten Betriebskosten für den Betrieb der Öfen und Trockner bleiben über den gesamten Zeitraum konstant.

Im Technologie- und Klimaneutralitätspfad wird die Modellierung im Gegensatz dazu nicht auf Industriebene, sondern auf Basis „virtueller Werke“ durchgeführt und ist dementsprechend ungleich komplexer. Sämtliche für den Referenzpfad angeführten Einflussfaktoren werden in diesen beiden Pfaden ebenso berücksichtigt. Darüber hinaus werden individuell in den Werken Minderungsmaßnahmen durchgeführt. Dazu wurden im ersten Schritt Maßnahmen mit dem Begleitkreis abgestimmt. Die Maßnahmen lassen sich nach ihren Wirkungsbereichen kategorisieren.

Sie wirken auf

- ganze Werke (unterschieden nach HMZ, DZ, VMZ),
- einzelne Öfen oder
- einen Ofen-Trockner-Verbund.

Um die Maßnahmen modelltechnisch umsetzen zu können, wurden die bereits angesprochenen virtuellen Werke definiert. Ausgehend von der Gesamtzahl an Öfen, Trocknern und Werken sind drei verschiedene Typen notwendig, um die Situation im Modell abbilden zu können. Ein virtuelles Werk besteht entweder aus

- einem Ofen und einem Trockner,
- zwei Öfen und einem Trockner oder
- drei Öfen und zwei Trocknern.

Jeweils ein Ofen und Trockner werden modelltechnisch immer als Ofen-Trockner-Verbund betrachtet. Jeder Ofen oder Ofen-Trockner-Verbund stellt für die Modellierung einen definierten Werksabschnitt dar. Pro Werk gibt es damit maximal drei dieser Werksabschnitte. Jeder Werksabschnitt hat zu Beginn den Erdgaseinsatz eines durchschnittlichen Ofens und gegebenenfalls den Erdgaseinsatz eines durchschnittlichen Trockners. Individuell durchgeführte Maßnahmen und die allgemeinen Effizienzgewinne üben im zeitlichen Verlauf Einfluss auf die Energieeinsätze der Werksabschnitte aus.



Abbildung 9: Werkstypen der virtuellen Werke; Quelle: FutureCamp

Die drei Werkstypen werden dann noch nach Hintermauer-, Vormauer- und Dachziegelwerk unterschieden, sodass im Endeffekt neun unterschiedliche Werkstypen betrachtet werden. Hinsichtlich des Stromverbrauchs in der Ausgangssituation werden nach Werkstyp keine Unterscheidungen gemacht. Jedes Werk weist zu Beginn der Modellierung den gleichen durchschnittlichen Stromverbrauch auf. Auch hinsichtlich der Prozessemissionen wird nur zwischen den Bereichen HMZ, VMZ und DZ unterschieden und nicht noch einmal hinsichtlich der Werkstypen. Alle virtuellen Hintermauerziegelwerke starten somit mit Prozessemissionen in identischer Höhe. Bei den Vormauer- und Dachziegelwerken ist dies analog der Fall. Bei Hintermauerziegelwerken werden die Prozessemissionen darüber hinaus noch nach Porosierung und Ton unterschieden. In den beiden anderen Fällen ist eine solche Unterscheidung nicht nötig, da die Porosierung keine Anwendung findet. Prozessemissionen werden im Rahmen der Roadmap immer nur auf Werksebene modelliert, nicht auf Ebene der Werksabschnitte, auch wenn sie modelltechnisch immer dem Werksabschnitt I eines virtuellen Werks zugerechnet werden. Maßnahmen, die ein ganzes Werk betreffen, werden ebenfalls immer im Werksabschnitt I betrachtet. Falls eine solche Maßnahme allerdings Auswirkungen auf den Energieeinsatz hat, so wird der Effekt in möglichen weiteren Werksabschnitten ebenfalls direkt berücksichtigt.

Natürlich gibt es in der Realität noch ganz andere Konstellationen in den Werken, und auch die Annahme, dass jedes Werk aus den drei Bereichen identische Prozessemissionen aufweist, ist eine Vereinfachung. Die Betrachtungen lassen sich somit nicht direkt auf reale Werke übertragen. Über die gesamte Industrie bilden die Annahmen die Situation dennoch sehr gut ab und ermöglichen damit eine aussagekräftige Modellierung.

In den Pfaden 2 und 3 steht für konkrete Minderungsmaßnahmen ein jährliches Investitionsbudget zur Verfügung (Pfad 2), oder Investitionsbedarfe werden bestimmt (Pfad 3). Welche Maßnahmen in einem bestimmten Jahr umgesetzt werden, ist abhängig von den Vermeidungskosten in diesem Jahr. Dazu wurden für jede denkbare Maßnahme die Vermeidungskosten über den gesamten Betrachtungszeitraum modelliert. In die Vermeidungskosten fließen dabei mehrere Faktoren ein, nämlich die geänderten Energiekosten, gegebenenfalls zusätzliche Betriebskosten und die Kapitalkosten einer Maßnahme. Die Vermeidungskosten ändern sich im Laufe des Betrachtungszeitraums, da beispielsweise die allgemeinen Effizienzgewinne die Energieeinsparungen beeinflussen, Preise bestimmter Energieträger variieren und sich relevante Emissionsfaktoren ändern. Anhand der Vermei-

dungskosten werden die Maßnahmen jedes Jahr aufsteigend gereiht. Die Maßnahme mit den niedrigsten Vermeidungskosten ist wirtschaftlich am attraktivsten und sollte dementsprechend zuerst umgesetzt werden.

Im Modell wird auf Basis der virtuellen Werke zunächst bestimmt, welche Maßnahme zu Beginn wie oft umgesetzt werden könnte. Das ergibt die theoretisch maximale Anzahl an Umsetzungen für jede einzelne Maßnahme. Aus der Anzahl der Ofen-Trockner-Verbünde ergibt sich beispielsweise die maximale denkbare Anzahl an Umsetzungen für die Maßnahme „Entkopplung des Ofen-Trockner-Verbunds und Einsatz von Wärmepumpe“. Dann wird die Maßnahme mit den niedrigsten Vermeidungskosten im ersten Jahr, also mit dem Rank 1, betrachtet. Die theoretisch maximale Anzahl an Umsetzungen für diese Maßnahme ist bereits aus dem vorigen Schritt bekannt. Es wird das Investitionsbudget durch die Investitionsausgaben dieser Maßnahme geteilt und abgerundet. Dadurch ergibt sich die Anzahl der finanziell möglichen Umsetzungen in diesem Jahr. Das Minimum aus beiden Werten wird schließlich angesetzt. Im Anschluss erfolgt diese Berechnung für die Maßnahme mit dem Rank 2. Allerdings wird hier das verfügbare Investitionsbudget in dem Umfang reduziert, wie für die Durchführung der ersten Maßnahme nötig. Anschließend wird für alle weiteren Maßnahmen infolge des Rankings ebenso verfahren, wobei das Investitionsbudget immer um den Betrag aller höher bewerteten und umsetzbaren Maßnahmen reduziert wird.

Im Anschluss werden die nach der obigen Logik ermittelten Minderungsmaßnahmen in den einzelnen Werksabschnitten umgesetzt. Dabei gilt, dass pro Werksabschnitt und Jahr maximal eine Maßnahme durchgeführt wird. Kann eine weitere Maßnahme nur noch in Werksabschnitten durchgeführt werden, in denen in diesem Jahr bereits eine höher gerankte Maßnahme umgesetzt wurde, so reduziert sich die Anzahl der tatsächlichen Umsetzungen für die weitere Maßnahme in dem Jahr.

Auf Basis aller tatsächlichen Umsetzungen werden anschließend die Investitionen dieses Jahres final bestimmt. Das Restbudget wird ins Folgejahr übertragen und erhöht dort entsprechend das zur Verfügung stehende Investitionsbudget. Damit wird verhindert, dass die hier genannte Restriktion von nur einer Maßnahme pro Werksabschnitt und Jahr einen nennenswerten Einfluss auf den zeitlichen Verlauf der Minderungen hat. Auf Basis der tatsächlichen Umsetzung der Maßnahmen wird die Anzahl der theoretisch noch möglichen Umsetzungen für das nächste Jahr reduziert. Dieser Prozess wird in den Folgejahren wiederholt.

## 5 Betrachtete Technologien und Maßnahmen

### 5.1 Ofen-Trockner-Verbund

Der relevante Brennstoffeinsatz in der Ziegelindustrie findet beinahe vollständig im Ofen-Trockner-Verbund<sup>6</sup> statt. Aktuell werden fast alle Öfen und Trockner der Ziegelindustrie im Verbund betrieben. Die Kühlluft des Ofens wird über eine Rohrleitung an den Trockner geleitet und reduziert den Energiebedarf des Trockners erheblich. Allerdings bieten aktuelle technologische Entwicklungen neue Ansätze zur Erhöhung der Effizienz bei Ofen und Trockner.

Der Ofen-Trockner-Verbund ist der entscheidende Ansatzpunkt für die Reduktion der Emissionen aus dem Brennstoffeinsatz. Zu den denkbaren Maßnahmen in diesem Bereich gehören etwa Optimierungen an den Brennern. Die Entkopplung des Ofen-Trockner-Verbunds ist eine ausschlaggebende Maßnahme in diesem Zusammenhang, da sie entscheidende Optimierungen am Brennprozess ermöglicht und darüber hinaus Voraussetzung für den Einsatz zukunfts-trächtiger Technologien, wie der Hochtemperaturwärmepumpe, zur Bereitstellung der Wärme für die Trocknung ist. Der Austausch oder die Umrüstung bestehender Anlagen in Verbindung mit einem Wechsel des Energieträgers ist dann der letzte Schritt zur vollständigen Reduktion der Emissionen aus dem Energieträgereinsatz. In diesen Bereich fallen neben der bereits genannten Wärmepumpe etwa die Umrüstung der Öfen für den Einsatz von Wasserstoff oder der Einbau von elektrischen Öfen. Dabei wird vorausgesetzt, dass elektrisch beheizte Tunnelöfen eingesetzt werden können, auch wenn in Europa derzeit noch kein elektrischer Ofen in der Ziegelindustrie in Betrieb ist. Es handelt sich dabei um komplett neue bzw. in einem starken Umfang umgebaute Öfen mit entsprechend hohem Investitionsaufwand. Auch beim Wasserstoffeinsatz besteht noch Forschungs- und Entwicklungsbedarf, beispielsweise über die Auswirkung von Wasserstoffeinsatz auf die Produkteigenschaften, wie etwa die Farbentwicklung der Tone während des Brennprozesses. Eine vollständige Liste der im Rahmen der Roadmap betrachteten Minderungsmaßnahmen befindet sich im Anhang.



Abbildung 10: Absorptionswärmepumpe; Quelle: Wienerberger GmbH

### 5.2 Rohstoffe

Der entscheidende Ansatzpunkt zur Reduktion der Prozess-emissionen ist die eingesetzte Rohstoffbasis. Fossiler Kohlenstoff bzw. Karbonate in den Rohstoffen werden während des Brennprozesses in  $\text{CO}_2$  umgesetzt. Durch den Einsatz biogener Zuschlagstoffe zur Porosierung von Hintermauerziegeln werden in diesem Bereich bereits Einsparungen erzielt. Die Porosierung erfolgt zur Senkung der Wärmeleitfähigkeit des Ziegels. Hierbei werden Porosierungsmittel dem Ton beigemischt, welche beim Brennprozess zu  $\text{CO}_2$ -Emissionen führen. Eine betrachtete Maßnahme im Rahmen der Studie ist die deutliche Ausweitung des Einsatzes biogener bzw.  $\text{CO}_2$ -neutraler Porosierungsmittel. An dieser Stelle muss allerdings angemerkt werden, dass deren Verfügbarkeit zumindest umstritten ist, da auch weitere Branchen an diesen Stoffen interessiert sind. Dementsprechend wird hier ebenfalls von einer relevanten Kostensteigerung im Vergleich zur derzeit eingesetzten Rohstoffbasis ausgegangen. Darüber hinaus handelt es sich bei den aktuell verwendeten Zuschlagstoffen überwiegend um Abfallstoffe. Dies sollte bei der Bilanzierung der entstehenden Emissionen nicht außer Acht gelassen werden. Solange diese Stoffe, wie etwa die Papierfangstoffe, weiter anfallen, ist es sinnvoller, diese in der Ziegelproduktion stofflich einzusetzen, als sie rein thermisch zu verwerten. Die Umstellung von Porosierungsmitteln bedarf zudem weiterer Forschungs- und Entwicklungsarbeit in den Werken, da neue Porosierungsmittel andere energetische und werkstofftechnische Eigenschaften haben und dadurch die Produkterezeptur angepasst werden muss.

<sup>6</sup> Der Ofen-Trockner-Verbund ist aktuell im Beste-Verfügbare-Technik-Merkblatt der Keramikindustrie (2007/C 202/02) als „Beste Verfügbare Technik“ für Energieeffizienz gelistet.

Die übrigen Prozessemissionen entstehen durch die Umsetzung des in Tonen enthaltenen fossilen Kohlenstoffs bzw. Karbonats. Bei den Tonen handelt es sich um ein Naturprodukt. Änderungen an der Rohstoffbasis sind hier nur durch die Erschließung neuer Vorkommen möglich. Aktuell wird ein Großteil der eingesetzten Tone in Gruben in direkter Nachbarschaft zu den Werken abgebaut und dann dort verwendet. Wenn nahezu kalkfreie oder zumindest deutlich weniger kalkhaltige Tone eingesetzt werden sollen, können die Vorkommen aus diesen Gruben in aller Regel nicht mehr genutzt werden. Diese Werke müssen ihre Rohstoffe dann an anderen Orten abbauen oder fremdbeziehen. Der Abbau in neuen Gruben bzw. der Fremdbezug kalkfreier Tone geht mit deutlichen Mehrkosten einher, da diese Qualität schwieriger zu beschaffen ist. Außerdem müssen die Tone über weite Strecken zu den Werken transportiert werden, was die Kosten weiter erhöht und die Maßnahme damit unter den aktuellen Bedingungen sehr unwirtschaftlich macht. Darüber hinaus verursachen die gestiegenen Transportstrecken natürlich einen relevanten Energiemehrbedarf und, je nach Art des Energieeinsatzes, auch zusätzliche Emissionen. Da diese nicht unter den Scope der Studie fallen, werden sie allerdings nicht weiter betrachtet. Es gilt an dieser Stelle allerdings festzuhalten, dass die deutsche Ziegel-

industrie ihre Emissionen nur durch die Nutzung solcher kalkfreier Tone (= rohstoffbedingte Emissionen) vollständig auf null reduzieren kann. Neben den immensen Mehrkosten gehen damit allerdings gegebenenfalls Mehremissionen in anderen Bereichen, hier explizit dem Transportwesen, einher. Selbst bei einer vollständigen Dekarbonisierung des Verkehrswesens entsteht hierdurch ein relevanter Energiemehrbedarf. Aus übergeordneter Perspektive ist es somit zumindest fraglich, ob eine vollständige Reduktion der Prozessemissionen aus dem Einsatz von tonigen Rohstoffen wirklich sinnvoll ist. Gegebenenfalls sollten hier gewisse Residualemissionen aus dem natürlichen Rohstoff Ton zugelassen werden, um die negativen Auswirkungen auf andere Bereiche abzuwenden und den dann notwendigen Energiemehrbedarf anderweitig nutzen zu können.

Im Rahmen der Studie wird vereinfachend davon ausgegangen, dass sämtliche Änderungen an der Rohstoffbasis keinen nennenswerten Einfluss auf den Energiebedarf ausüben.

Neben den alternativen Tonen können die Prozessemissionen zu einem geringen Teil durch Recyclingmaterial reduziert werden. Der Einsatz von recyceltem Ziegelbruch erfordert ein sortenreines Material und ist zudem durch die Qualitätsanforderungen des Ziegels begrenzt.



Abbildung 11: Rohstoffgewinnung; Quelle: Ziegelwerk Bellenberg Wiest GmbH & Co. KG

## Recycling von Ziegeln

Altziegel sind heute ein gesuchter Wertstoff. Voraussetzung ist ein möglichst sortenreiner Rückbau oder Abbruch, um eine Wiederverwendung etwa als Dachindeckung oder als Wandbildner zu ermöglichen.

Aus Abbruchmaterial können dank moderner Recyclinganlagen Materialien für eine hochwertige technische Gesteinskörnung im Straßen-, Wege- und Sportplatzbau oder als Vegetationssubstrat erzeugt werden. Mit der Aufbereitung von Ziegelbruch können nicht nur Rohstoffe für die Produktion neuer Ziegel substituiert werden, sondern insbesondere auch Primärkörnungen eingespart und damit Ressourcen in vielen anderen Produktbereichen geschont werden. Neue Entwicklungen in der Trenn- und Sortiertechnik führen dazu, dass Körnungen mit definierter Qualität für gezielte Anwendungen hergestellt werden können.

Es bleibt zu beachten, dass sortenreiner Ziegelbruch nur im begrenzten Maße bei der Ziegelproduktion eingesetzt werden kann. Der Ziegelbruch ersetzt dabei den Sand als Magerungsmittel. Die in den drei Pfaden angesetzten Mengen entsprechen neuesten Forschungsergebnissen und sind insbesondere in Pfad 3 äußerst ambitioniert. Da der Ziegelbruch bereits gebrannt wurde, fallen keine zusätzlichen rohstoffbedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen mehr an.



Abbildung 12: Ziegelmehl;

Quelle: Bundesverband der Deutschen Ziegelindustrie e. V.

## 5.3 Gewichtsreduktion

Durch Gewichtsreduktionen der produzierten Ziegel kann es gelingen, sowohl die Energieeinsätze als auch die Prozessemissionen zu reduzieren. Für die Bereiche Hintermauer-, Vormauer- und Dachziegel wurden deshalb individuelle Maßnahmen definiert. Bei den Hintermauerziegeln ist etwa eine Anpassung der Lochanteile sowie eine Verkleinerung der Wandstärke unter Beibehaltung der relevanten Eigenschaften wie z. B. der Wärmedämmeigenschaften, Schallschutz oder der Druckfestigkeit unter Berücksichtigung des jeweiligen Einsatzgebietes denkbar. Bei Dachziegeln kann die Geometrie noch dahingehend optimiert werden, dass mehr Dachfläche mit vergleichbarer Masse abgedeckt wird. Im Bereich Vormauerziegel wird im Rahmen der Studie die Option betrachtet, dass ein gewisser Anteil der Werke auf die Produktion von Riemchen umgestellt wird. Da dies relevante Änderungen am Werk mit sich bringt, wird diese Maßnahme modelltechnisch allerdings nur dann möglich, wenn ein Werk bereits relevante Maßnahmen an Ofen und Trockner umgesetzt hat.

Allen Maßnahmen zur Gewichtsreduktion ist gemein, dass dadurch die notwendige Einsatzmenge an Ton sinkt. Die Prozessemissionen aus dem Toneinsatz sinken entsprechend analog. Darüber hinaus sinkt die zu trocknende bzw. brennende Masse in Trockner und Ofen. Entsprechend verringert sich hier der notwendige Energieeintrag, was eine Reduzierung des Energieträgereinsatzes ermöglicht und dadurch auch in dieser Hinsicht Einsparungen realisiert.

## 6 Ausgangsbasis

Die durchschnittlichen Werte des Basiszeitraums 2014 bis 2018 ergeben die Ausgangswerte für das Basisjahr 2020. Dementsprechend beziehen sich alle in der Studie gemachten Angaben zu Energieträgereinsätzen und Emissionen des Jahres 2020 auf den Durchschnitt des Basiszeitraums.

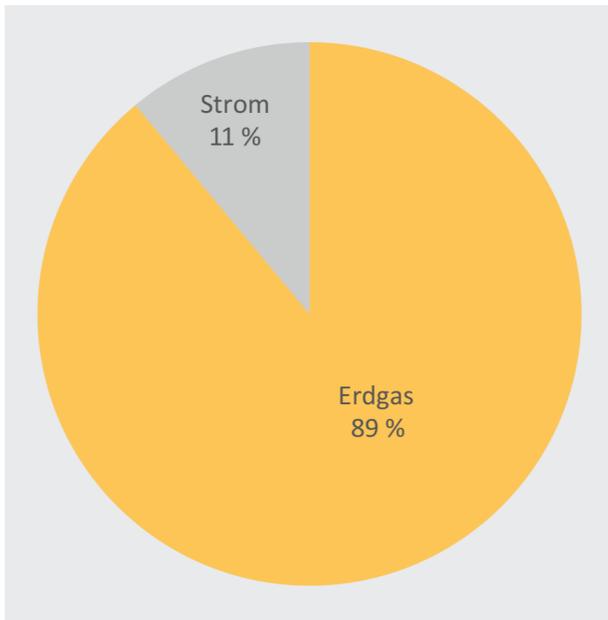


Abbildung 13: Aufteilung Energieträger im Basisjahr 2020

### 6.1 Energieeinsatz und -träger

Wie bereits beschrieben, beruht der Energieeinsatz der Ziegelindustrie heute nahezu vollständig auf Erdgas und Strom. Der Beitrag weiterer Energieträger ist verschwindend gering und wird daher nicht weiter betrachtet. Insgesamt beträgt der Energieeinsatz der deutschen Ziegelindustrie im Basisniveau knapp 5,4 TWh. Davon entfallen beinahe 90 % auf den Energieträger Erdgas, was erneut die Bedeutung des Ofen-Trockner-Verbunds für das Erreichen der Minderungsziele hervorhebt. Der Einsatz von Strom ist im Vergleich dazu von deutlich untergeordneter Bedeutung. Er beträgt im Ausgangsniveau knapp 0,6 TWh.

### 6.2 Emissionen

Die oben beschriebenen Energieträgereinsätze sind der primäre Treiber für die Gesamtemissionen der Branche. Im Basiszeitraum liegen die durchschnittlichen jährlichen Emissionen der deutschen Ziegelindustrie bei 1,73 Mio. t CO<sub>2</sub>. Wie Abbildung 14 zeigt, ist der Erdgaseinsatz hauptverantwortlich für die Entstehung der Emissionen der Ziegelindustrie. Etwas mehr als die Hälfte der gesamten Emissionen

sind auf diesen zurückzuführen. Die restlichen Emissionen verteilen sich zu etwa gleichen Teilen auf den Stromeinsatz, die Prozessemissionen aus Ton und die Prozessemissionen aus der Porosierung. Insgesamt entfallen damit 70 % der Emissionen der deutschen Ziegelindustrie auf den Energieträgereinsatz. Bei den übrigen 30 % handelt es sich um Prozessemissionen, die nicht mit klassischen Effizienzmaßnahmen oder durch Brennstoffwechsel zu mindern sind und damit eine besondere Herausforderung darstellen.

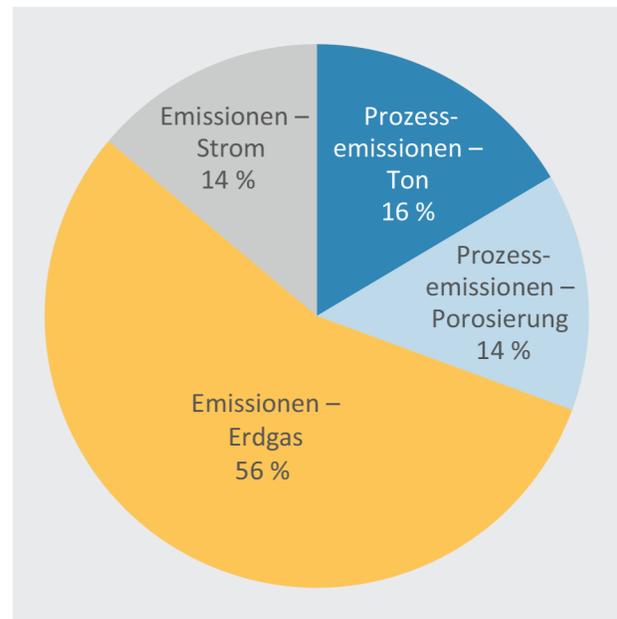


Abbildung 14: Aufteilung der CO<sub>2</sub>-Emissionen im Basisjahr 2020

### 6.3 Energiebezogene Kosten

Im Rahmen der Studie werden ausschließlich Kosten, die in direktem Zusammenhang mit Emissionen und Energieträgern stehen, betrachtet. Dazu zählen neben den CO<sub>2</sub>-Kosten und den Kosten für die Energieträger selbst noch gewisse Betriebs- und Kapitalkosten. Bei den Betriebskosten werden nur solche erfasst, die durch Minderungsmaßnahmen Änderungen unterliegen können. Im Ausgangsniveau werden hier nur die Betriebskosten für Öfen und Trockner angesetzt. Sämtliche Betriebskosten, die in den Pfaden betrachtet werden, fallen entweder vollständig zusätzlich zur Ausgangslage an oder beruhen auf Änderungen an Ofen und Trockner. Kapitalkosten werden für alle Pfade nur auf Basis der in der Studie explizit berücksichtigten Investitionen berechnet. Diese umfassen die allgemeinen Investitionen mit Effizienzbezug sowie die direkten Investitionen in explizite Minderungsmaßnahmen. Da im Basisniveau die Investitionen in Effizienzmaßnahmen nur einmalig berücksichtigt sind, beziehen sich die Kapitalkosten auch nur hierauf.

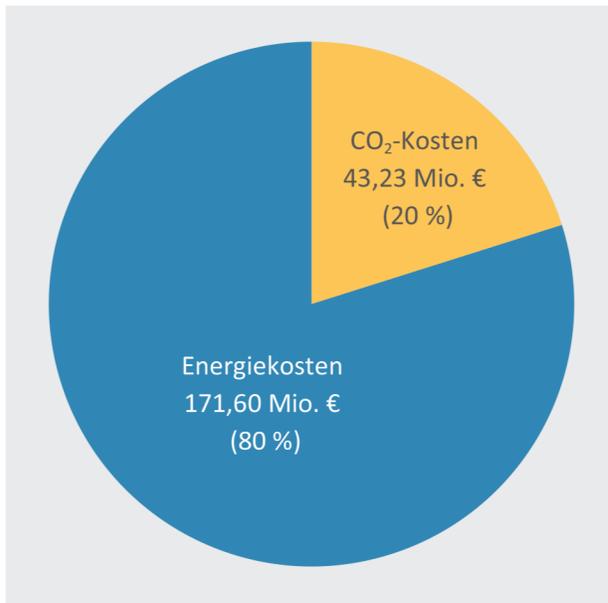


Abbildung 15: Verhältnis zwischen Energiekosten und CO<sub>2</sub>-Kosten im Basisjahr 2020

Insgesamt entstehen der deutschen Ziegelindustrie somit im Basisniveau energiebezogene Kosten von 268 Mio. €. Im weiteren Verlauf der Studie bezieht sich der Ausdruck Gesamtkosten auf die betrachteten energiebezogenen Kosten. Mit etwa 172 Mio. € sind die Kosten für Energieträger hier am relevantesten. Diese verursachen, gemeinsam mit den Prozessemissionen, zusätzlich noch 43 Mio. € an CO<sub>2</sub>-Kosten. Wie Abbildung 15 veranschaulicht, entspricht der Anteil der CO<sub>2</sub>-Kosten an den direkt durch die Energieträger verursachten Kosten im Basisniveau einem Fünftel. Ohne Maßnahmen zur Reduktion der Emissionen wird dieser Anteil durch die steigenden CO<sub>2</sub>-Preise massiv zunehmen. Die übrigen Kosten verteilen sich auf Betriebs- und Kapitalkosten, wobei die Betriebskosten mit ca. 50 Mio. € deutlich überwiegen.



Abbildung 16: Vollautomatisierte Ziegelproduktion; Quelle: Ziegelwerk Klosterbeuren Ludwig Leinsing GmbH + Co. KG

## 7 Referenzpfad (Pfad 1)

### 7.1 Maßnahmen

Der Referenzpfad modelliert die Emissionsentwicklung in einem Business-as-usual-Szenario und dient vor allem als Vergleichswert für die anderen beiden Pfade. Im Referenzpfad werden ausschließlich die jährlichen Investitionen von 28,41 Mio. €/a fortgeschrieben, die auch im Basiszeitraum bereits für Investitionen mit Effizienzbezug identifiziert wurden. Die dank dieser Investitionen erzielten Effizienzgewinne beim Einsatz von Strom und analog Erdgas belaufen sich insgesamt auf gute 10 %, wie aus Abbildung 17 hervorgeht.

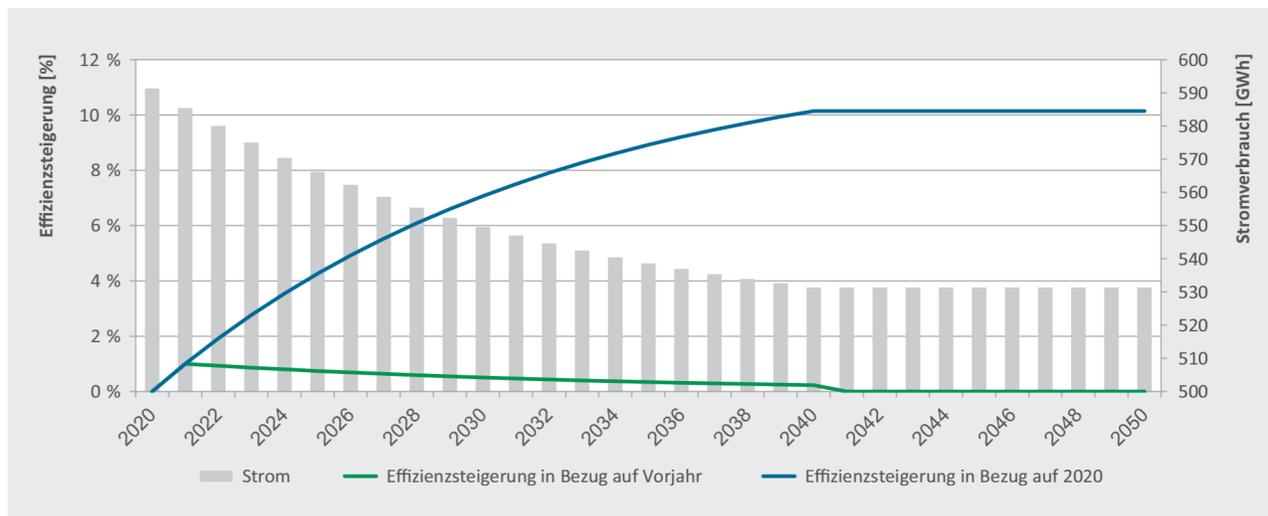


Abbildung 17: Effizienzsteigerung Erdgas und Strom, beispielhafte Darstellung Strom

Diese Effizienzgewinne wirken sich auch entsprechend positiv auf die Emissionsentwicklung aus. Weitere konkrete Minderungsmaßnahmen werden in diesem Pfad nicht durchgeführt. Auch der Einsatz von kohlenstofffreiem Recyclingmaterial als Rohstoff, im Weiteren als Recyclingquote bezeichnet, bleibt über den betrachteten Zeitraum konstant. Die angesetzten Werte sind in Tabelle 4 aufgeführt.

	2020 <sup>7</sup>	2050
Hintermauerziegel	3 %	3 %
Vormauerziegel	3 %	3 %
Dachziegel	0 %	0 %

Tabelle 4: Recyclingquote Referenzpfad nach EPDs

Darüber hinaus wirken sich auch die absinkenden Emissionsfaktoren der eingesetzten Energieträger positiv auf die Emissionsentwicklung aus. Beim Erdgas sinkt dieser von 0,056 t CO<sub>2</sub>/GJ auf etwa 0,047 t CO<sub>2</sub>/GJ ab.

Deutlich stärker sinkt der Emissionsfaktor des bezogenen Strommixes, sodass der Strom 2050 CO<sub>2</sub>-frei bereitgestellt wird.

<sup>7</sup> Quelle: IBU (2015), IBU (2016), IBU (2018)

## 7.2 Entwicklung des Energieeinsatzes

Im Referenzpfad sinkt der Energieeinsatz nur aufgrund der beschriebenen Effizienzgewinne. Vom Ausgangsniveau von 5,4 TWh reduziert sich der Einsatz auf 4,8 TWh. Die Anteile von Strom und Erdgas bleiben dabei unverändert. Ab 2040 werden im Referenzpfad keine weiteren Energieeinsparungen erzielt.

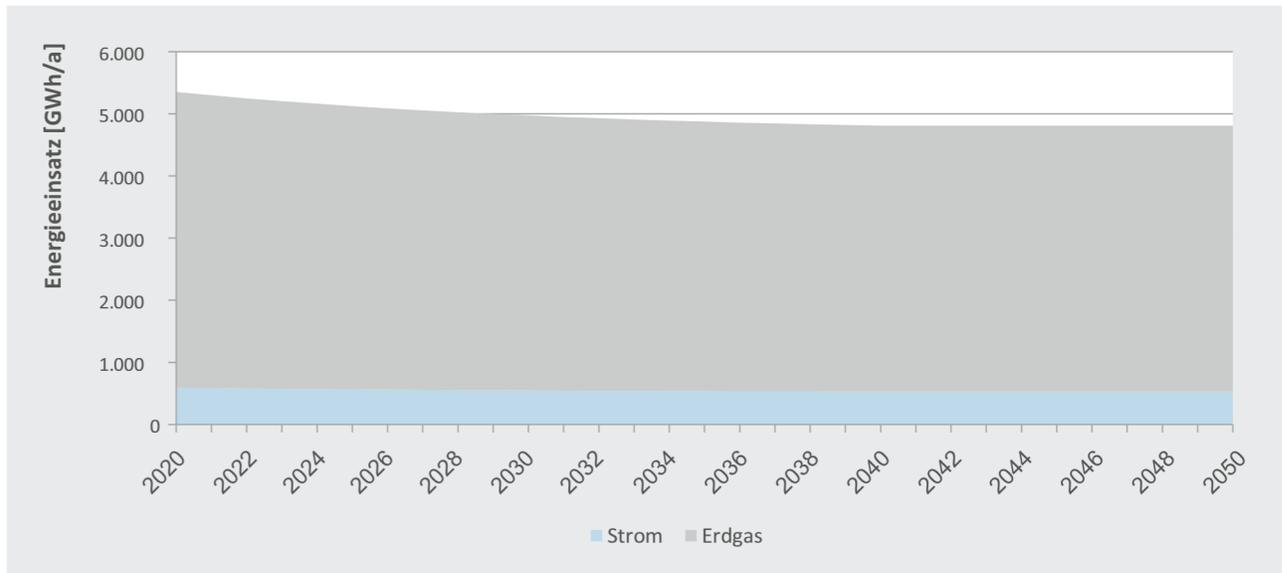


Abbildung 18: Entwicklung des Energieträgereinsatzes bis 2050 im Referenzpfad

## 7.3 Entwicklung der CO<sub>2</sub>-Emissionen

Die Emissionen sinken im Referenzpfad in größerem Umfang als der Energieeinsatz, da die abnehmenden Emissionsfaktoren noch zusätzlich zu den Effizienzgewinnen wirken. Vom Ausgangswert in Höhe von 1,73 Mio. t CO<sub>2</sub>/a im Jahr 2020 gelingt eine Reduktion auf 1,26 Mio. t CO<sub>2</sub>/a bis zum Zieljahr 2050. 2030 entstehen noch 1,45 Mio. t CO<sub>2</sub>/a. Völlig unverändert bleiben in diesem Pfad die Prozessemissionen. Sie betragen auch im Jahr 2050 noch 0,53 Mio. t CO<sub>2</sub>/a. Ihre relative Bedeutung steigt dementsprechend an, wie Abbildung 19 verdeutlicht. Trotz einer deutlichen Reduktion der Emissionen liegt der Referenzpfad erwartungsgemäß weit entfernt vom Ziel der Treibhausgasneutralität. Weitere Maßnahmen sind damit im Hinblick auf dieses Ziel zwingend nötig.

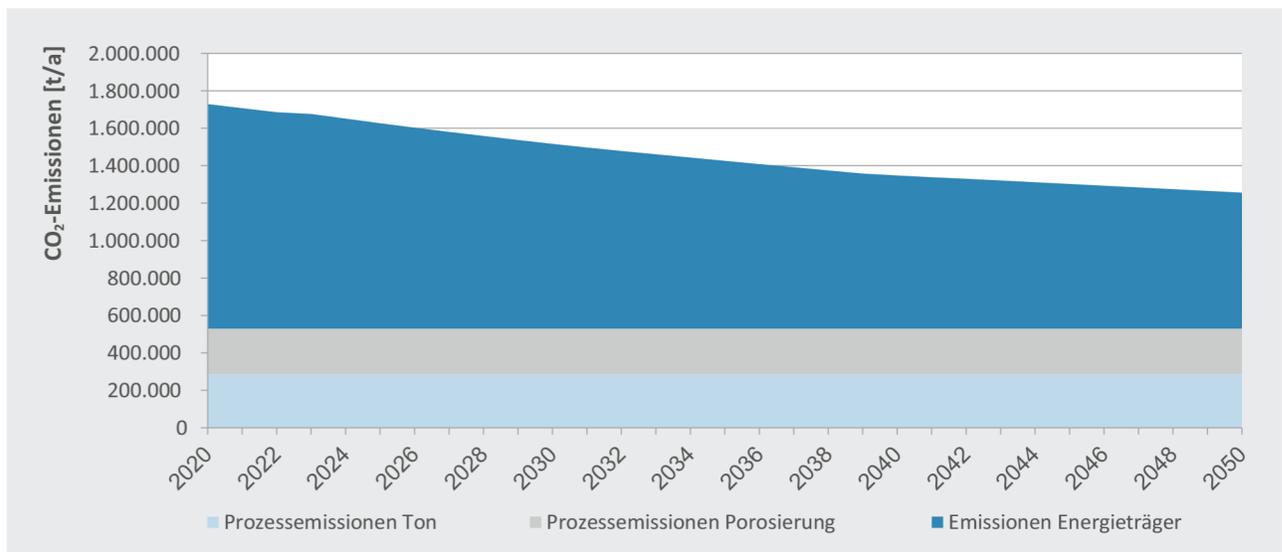


Abbildung 19: Entwicklung der CO<sub>2</sub>-Emissionen bis 2050 im Referenzpfad

## 7.4 Entwicklung der energiebezogenen Kosten

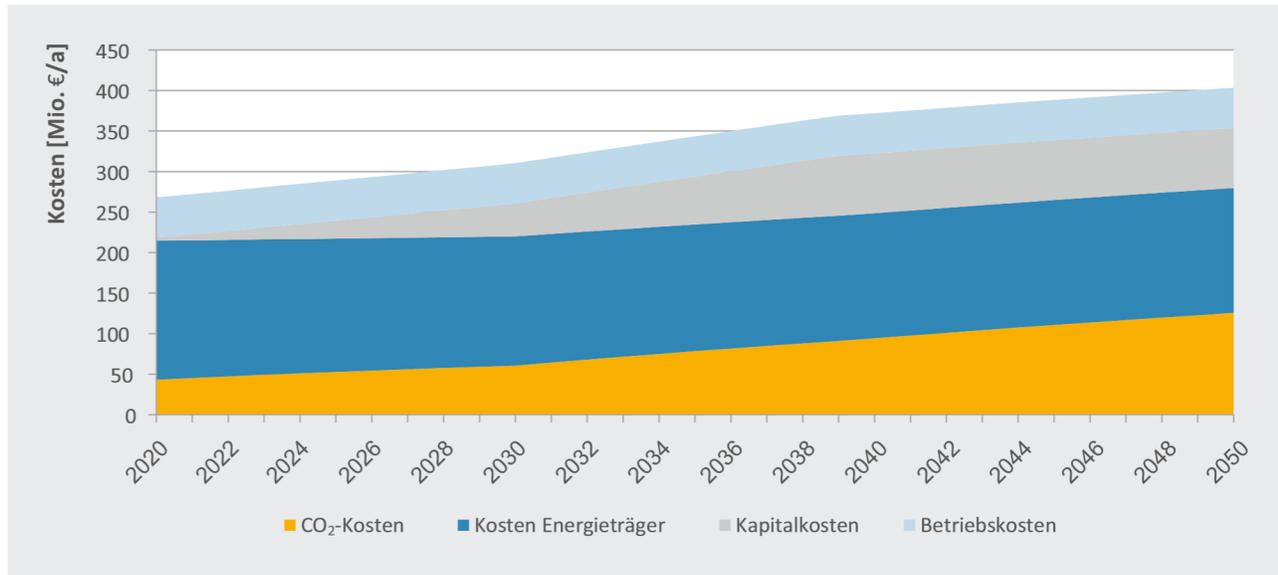


Abbildung 20: Entwicklung des Verhältnisses zwischen Energiekosten und CO<sub>2</sub>-Kosten im Referenzpfad

Bereits im Referenzpfad muss die deutsche Ziegelindustrie mit relevanten Mehrkosten gegenüber dem Basisjahr rechnen. Von 268 Mio. €/a steigen die Gesamtkosten um etwa 50 % auf 403 Mio. €/a. Eine Absenkung nach dem Betrachtungszeitraum ist hier nicht zu erwarten. Auch im Durchschnitt liegen die Kosten mit 340 Mio. €/a bereits weit über dem aktuellen Vergleichswert. Trotz der sinkenden Gesamtemissionen zeigt Abbildung 20, dass steigende CO<sub>2</sub>-Kosten ein relevanter Treiber dieser Entwicklung sind. Die angenommene Preisentwicklung überwiegt damit die erzielten Minderungen bei Weitem. Die Bedeutung der CO<sub>2</sub>-Kosten im Verhältnis zu den Energiekosten nimmt drastisch zu, wie Abbildung 21 veranschaulicht. Während die CO<sub>2</sub>-Kosten 2020 noch nur für 20 % dieser Kosten stehen, machen sie 2050 beinahe die Hälfte der Kosten aus. Dies zeigt erneut deutlich die wirtschaftliche Notwendigkeit, sich mit Minderungsoptionen zu befassen. Auch die steigenden Kapitalkosten durch die Investitionen in Effizienzmaßnahmen treiben die Gesamtkosten in die Höhe. Dieser Anstieg kann durch den leichten Rückgang bei den Energiekosten nicht abgefangen werden. Die Betriebskosten bleiben im Referenzpfad konstant. Die gesamten Investitionen liegen bei 881 Mio. €. Dieser Kapitaleinsatz wäre notwendig, um die angesprochenen Minderungen zu erreichen.

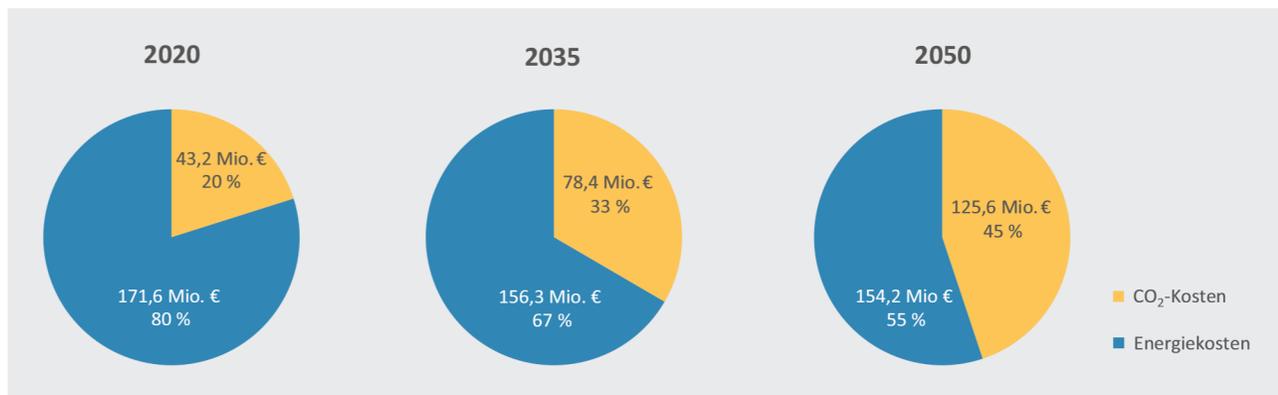


Abbildung 21: Entwicklung des Verhältnisses zwischen Energiekosten und CO<sub>2</sub>-Kosten im Referenzpfad

## 7.5 Wesentliche Erkenntnisse

In einem Business-as-usual-Szenario ohne weitere Minderungsmaßnahmen gelingt eine Reduktion der jährlichen Emissionen im Vergleich zum Ausgangswert 2020 um 28 % auf 1,26 Mio. t CO<sub>2</sub>/a. Bis 2030 werden 12 % Minderung erzielt. Im Referenzpfad ist man damit, wie erwartet, noch weit vom Ziel der Treibhausgasneutralität entfernt. Dennoch steigen die energiebezogenen Kosten hier bis 2050 bereits von 268 Mio. €/a auf 403 Mio. €/a an, wesentlich getrieben durch die steigenden CO<sub>2</sub>-Preise. Hier nimmt die relative Bedeutung der Prozessemissionen immer weiter zu. Es müssen daher auch Wege gefunden werden, diese Emissionen zu reduzieren. Über den Betrachtungszeitraum entstehen

insgesamt Mehrkosten von 2,23 Mrd. €. Dieser immense Kostenanstieg führt klar vor Augen, dass Emissionsminderungen längst keine rein umweltpolitische Entscheidung, sondern eine wirtschaftliche Notwendigkeit darstellen. Der EU ETS übt, bei den derzeit absehbaren Entwicklungen, deutlich spürbaren Druck auf die Industrie aus. Ausschlaggebend sind die sinkenden kostenlosen Zuteilungen bei gleichzeitig deutlich gestiegenen Preisen. Dabei gilt es allerdings auch festzuhalten, dass die zusätzlichen finanziellen Belastungen den Investitionsspielraum der stark mittelständisch geprägten Industrie immer weiter einengen. Daher gilt es Rahmenbedingungen zu schaffen, die es der Branche ermöglichen, die notwendigen Anstrengungen dennoch zu bewältigen.



Abbildung 22: Verlegung am Dach; Quelle: BMI Steildach GmbH

## 7.6 Steckbrief Referenzpfad (Pfad 1)

Referenzpfad (Pfad 1)	
<b>Beschreibung Maßnahmen</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>kontinuierliche Effizienzsteigerung beim Einsatz von Strom und Erdgas (interner Einflussfaktor)</li> <li>Reduktion Emissionsfaktoren Strom und Erdgas (externer Einflussfaktor)</li> </ul>
<p><b>Emissionsentwicklung bis 2030:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Senkung auf 1,5 Mio. t CO<sub>2</sub></li> </ul> <p><b>Emissionsentwicklung bis 2050:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Senkung auf 1,3 Mio. t CO<sub>2</sub></li> </ul>	<p>CO<sub>2</sub>-Emissionen [t/a]</p> <p>2020 2022 2024 2026 2028 2030 2032 2034 2036 2038 2040 2042 2044 2046 2048 2050</p> <p>■ Prozessemissionen Ton ■ Prozessemissionen Porosierung ■ Emissionen Energieträger</p>
<b>Wesentliche Einflussfaktoren auf Emissionsentwicklung:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Reduktion Emissionsfaktor Strom</li> <li>Reduktion Emissionsfaktor Erdgas</li> <li>Effizienzsteigerung beim Einsatz von Erdgas und Strom</li> </ul>
<p><b>Kostenentwicklung (energiebezogen):</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>mittlere Kosten Ø 2021–2050: 340 Mio. €/a</li> <li>Kosten Zieljahr 2050: 403 Mio. €</li> <li>Gesamtinvestitionsausgaben: 881 Mio. €</li> </ul>	<p>Kosten [Mio. €/a]</p> <p>2020 2022 2024 2026 2028 2030 2032 2034 2036 2038 2040 2042 2044 2046 2048 2050</p> <p>■ CO<sub>2</sub>-Kosten ■ Kosten Energieträger ■ Kapitalkosten ■ Betriebskosten</p>
<b>Wesentliche Einflussfaktoren auf Kostenentwicklung:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>steigende CO<sub>2</sub>-Kosten infolge der Preisentwicklung</li> <li>steigende Kapitalkosten für Investitionen in Effizienzmaßnahmen</li> </ul>

Tabelle 5: Steckbrief Referenzpfad (Pfad 1)

## 8 Technologiepfad (Pfad 2)

Dieser Pfad beleuchtet, wie die Emissionen unter den gegebenen Annahmen durch ambitionierte Investitionssteigerungen in Minderungsmaßnahmen weiter reduziert werden könnten. Auch in diesem Pfad wird die Treibhausgasneutralität nicht erreicht werden können. Die Maßnahmen werden primär danach ausgewählt, welche Minderungen unter einer gegebenen Budgetrestriktion wirtschaftlich am sinnvollsten sind. Dies bedeutet allerdings nicht zwangsläufig, dass die ergriffenen Maßnahmen aus heutiger Sicht tatsächlich wirtschaftlich sind. Darüber hinaus ermöglichen Entscheidungen für bestimmte Maßnahmen zwar die höchsten Minderungen unter den für diesen Pfad geltenden Restriktionen, aber das bedeutet nicht zwingend, dass dies auch die wirtschaftlichsten Maßnahmen zur Erreichung der Klimaneutralität sind. Dementsprechend ist es für die Industrie von elementarer Bedeutung, dass die relevanten politischen Rahmenbedingungen möglichst frühzeitig und langfristig gesetzt und bekannt gemacht werden. Nur dann können die notwendigen Investitionsentscheidungen so getroffen werden, dass die verfügbaren Mittel möglichst effizient zur Erreichung der Ziele genutzt werden.

### 8.1 Maßnahmen

Der Technologiepfad baut auf den Annahmen des Referenzpfades auf. Sämtliche Minderungen, die dort veranschlagt werden, finden sich auch im Technologiepfad. Die Anstrengungen werden also vom Niveau des Referenzpfades aus erhöht. Das verfügbare Investitionsbudget aus Pfad 1 wird auf 56,82 Mio. €/a verdoppelt. Die Hälfte muss für die aus dem Referenzpfad bekannten Investitionen mit Effizienzgewinnen aufgewendet werden. Die übrigen 28,41 Mio. €/a stehen als jährliches Investitionsbudget für konkrete Minderungsmaßnahmen zur Verfügung und müssen zusätzlich aufgebracht werden. Die gesamten Investitionen in Maschinen der Ziegelindustrie liegen damit bei 99,43 Mio. €/a. Mit den zusätzlichen Investitionen werden folgende Maßnahmen flächendeckend umgesetzt:

- Optimierung Ziegelgeometrie für Dachziegel
- Einsatz biogener Porosierungsmittel
- Entkopplung des Ofen-Trockner-Verbunds in Verbindung mit dem Einsatz einer Wärmepumpe für den Wärmebedarf im Trockner
- vorgewärmte Verbrennungsluft (Austausch Brenner)
- Optimierung der Brennhilfsmittel für Dachziegel

Zumindest in Teilen der betrachteten Hintermauerziegelwerke werden darüber hinaus noch weitere Maßnahmen durchgeführt:

- alternativer Rohstoff Ton HMZ
- Gewichtsreduktion HMZ

Der alternative Ton enthält dabei in der Betrachtung für Pfad 2 50 % weniger fossilen Kohlenstoff bzw. Karbonate, weshalb sich die Prozessemissionen aus Ton in diesen Werken halbieren. Diese Maßnahme ist vor allem aufgrund ihrer geringen Investitionsausgaben auch Bestandteil des Technologiepfades, obwohl die Vermeidungskosten hier sehr hoch sind.



Abbildung 23: Ofenstrecke für Dachziegelproduktion;  
Quelle: Jacobi Tonwerke GmbH

Zusätzlich wird im Technologiepfad die Recyclingquote bis 2050 kontinuierlich auf die in Tabelle 6 genannten Werte erhöht. Hierüber werden weitere Einsparungen bei den Prozessemissionen erzielt. Außerdem wird in diesem Pfad ein ambitionierteres Vorgehen in Hinblick auf emissionsfreien Strombezug hinterlegt. Die Ziegelindustrie geht hier über die Vorhaben zur Senkung des Emissionsfaktors im deutschen Strommix hinaus, indem explizit ein steigender Anteil Grünstrom bezogen wird. Ab 2045 wird dann ausschließlich Grünstrom bezogen. Die höheren Kosten werden über Grünstromzertifikate berücksichtigt. Für die Betrachtung ist es an dieser Stelle unerheblich, ob der emissionsfreie Strom zugekauft oder durch eigene Beteiligungen, etwa an Solar- oder Windparks, generiert wird.

	2020 <sup>8</sup>	2050
Hintermauerziegel	3 %	10 %
Vormauerziegel	3 %	6 %
Dachziegel	0 %	1 %

Tabelle 6: Recyclingquote Technologiepfad

8 Quelle: IBU (2015), IBU (2016), IBU (2018)

## 8.2 Entwicklung des Energieeinsatzes

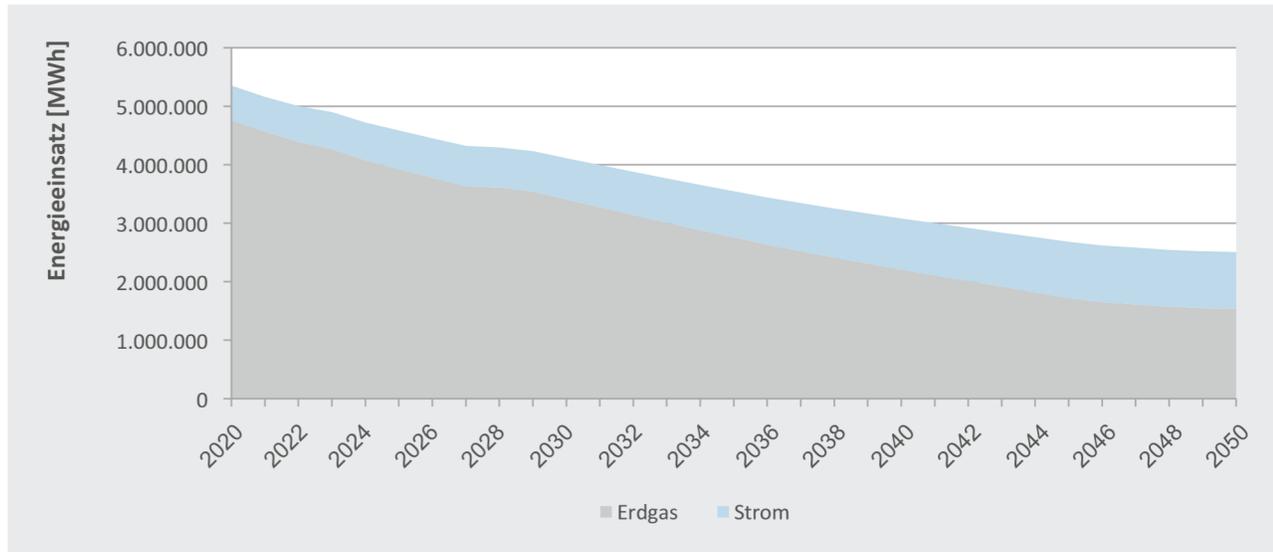


Abbildung 24: Entwicklung des Energieträgereinsatzes bis 2050 im Technologiepfad

Die Entwicklung des Energieträgereinsatzes der Branche im Technologiepfad ist in Abbildung 24 aufgeschlüsselt. Dort stechen zwei Punkte hervor. Erstens erfolgt ein beinahe durchgehender und starker Rückgang des Gesamtenergieeinsatzes. Zweitens werden im Technologiepfad keinerlei neue Energieträger eingesetzt. Als Energieträger finden weiterhin ausschließlich Erdgas und Strom Verwendung. Der Technologiepfad ist somit zumindest energiewirtschaftlich ein Effizienzpfad. Der Gesamtenergieeinsatz wird von 5,4 TWh/a auf 2,5 TWh/a reduziert und damit im betrachteten Zeithorizont mehr als halbiert. Damit erreicht man auch noch eine deutliche Reduktion gegenüber dem Referenzpfad, der bei 4,8 TWh/a endet. Haupttreiber hinter dieser Entwicklung ist die Entkopplung des Ofen-Trockner-Verbunds und der Einsatz von Wärmepumpen zur Beheizung der Trockner. Der Rückgang entfällt dabei vollständig auf den Erdgaseinsatz. Der Stromeinsatz nimmt dagegen deutlich zu, was aber vom Rückgang beim Erdgas mehr als kompensiert wird. Der steigende Stromeinsatz ist ebenfalls auf die Installation der Wärmepumpen zurückzuführen, bei denen ein Teil des eingesparten Erdgases durch Strom ersetzt werden muss. Abgesehen davon findet keinerlei Brennstoffwechsel statt, da die entsprechenden Maßnahmen höhere Vermeidungskosten mit sich bringen und unter den vorausgesetzten Bedingungen nicht zum Einsatz kommen.

## 8.3 Entwicklung der CO<sub>2</sub>-Emissionen

Der Ziegelindustrie gelingt im Technologiepfad eine Reduktion ihrer Emissionen auf 0,50 Mio. t CO<sub>2</sub>/a. Verglichen mit dem

Ausgangswert aus dem Basiszeitraum von 1,73 Mio. t CO<sub>2</sub>/a entspricht das einer Minderung der Emissionen auf weniger als ein Drittel. Abbildung 25 zeigt, dass ein bedeutender Teil der Minderungen bereits in den nächsten zehn Jahren erzielt werden kann. Hier sinken die Emissionen am schnellsten. Auffällig ist besonders das rapide Absinken in den Jahren 2028 und 2029, das auf den Einsatz größtenteils biogener Porosierungsmittel zurückzuführen ist. Innerhalb dieser zwei Jahre werden die Emissionen aus den Porosierungsmitteln um 80 % reduziert. Diese Maßnahme wird erst ab diesem Zeitpunkt umgesetzt, da ein gewisser Vorlauf notwendig ist, um die nötigen Entwicklungen voranzutreiben. In der Realität wird diese Umstellung vermutlich über einen längeren Zeitraum verteilt stattfinden. Da modelltechnisch in diesem Fall einzig die Vermeidungskosten ausschlaggebend für die Auswahl der Maßnahme sind, wird die Umstellung hier geballt umgesetzt. Um die Effekte nicht zu optimistisch in die Studie einfließen zu lassen, wird der Einsatz daher weiter nach hinten verlagert. Die weiteren Emissionsreduktionen entfallen hauptsächlich auf die Energieträger durch die hohen Einsparungen beim Energieeinsatz und zusätzlich die vollständige Umstellung auf Grünstrombezug. Die Tatsache, dass im Technologiepfad bereits 2045 ausschließlich Grünstrom bezogen wird, schlägt sich auch in einem Abflachen der Kurve nach 2045 nieder. Aber natürlich wurden die dadurch erzielbaren Einsparungen bereits entsprechend früher realisiert. In gewissem Maße führt der Einsatz von Tonen mit reduziertem Kalkgehalt in der zweiten Hälfte des Betrachtungszeitraums zu Minderungen bei den übrigen Prozessemissionen.

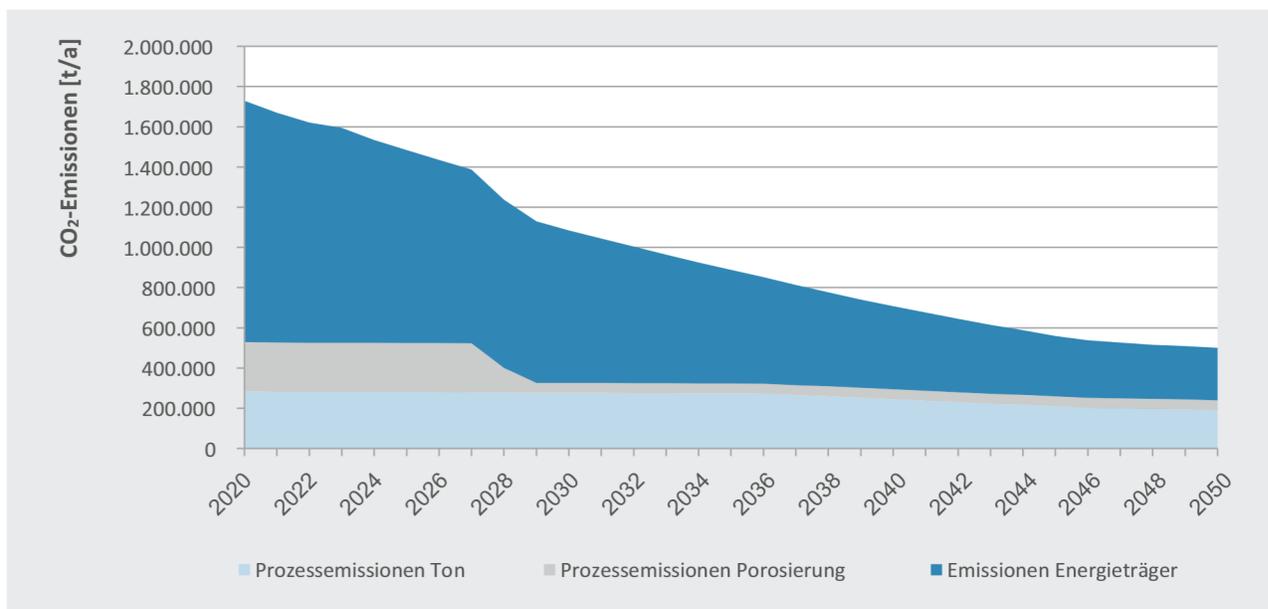


Abbildung 25: Entwicklung der CO<sub>2</sub>-Emissionen bis 2050 im Technologiepfad

Im Zieljahr gelingt auch gegenüber dem Referenzpfad noch eine beträchtliche Reduktion von beinahe 0,8 Mio. t CO<sub>2</sub>/a. Der Anteil der Prozessemmissionen an den Gesamtemissionen nimmt im Zeitverlauf deutlich zu, in erster Linie noch bedingt durch den Ton. Machen sie zu Beginn noch weniger als ein Drittel der Gesamtemissionen aus, so stehen sie 2050 beinahe für die Hälfte der noch übrigen Emissionen. Ihre Bedeutung für die Emissionsbilanz der Industrie nimmt damit immer weiter zu. Auch bis zum Jahr 2030 wird bereits eine erhebliche Emissionsminderung erreicht. Die Emissionen betragen dann noch knapp 1,1 Mio. t CO<sub>2</sub>/a. Gegenüber dem Emissionsniveau aus 1990 von etwa 2,9 Mio. t CO<sub>2</sub>/a<sup>9</sup> entspricht das einer Reduktion von über 60 %. Das 2030er-Ziel aus dem Green Deal der EU von einer Reduktion von mindestens 55 % gegenüber 1990 wird im Technologiepfad somit durch die deutsche Ziegelindustrie übererfüllt.<sup>10</sup>

#### 8.4 Entwicklung der energiebezogenen Kosten

Die erzielten Minderungen gehen allerdings bereits im Technologiepfad mit deutlichen Mehrkosten einher. Ausgehend von 268,2 Mio. €/a im Basisjahr, steigen die betrachteten Gesamtkosten auf 440,8 Mio. €/a und betragen im Mittel über den Betrachtungszeitraum 364,2 Mio. €/a. Wesentliche Treiber dieser Entwicklung sind die gestiegenen Kapital- und Betriebskosten durch die ergriffenen Minderungsmaßnahmen. Die Minderungsmaßnahmen sind im Anhang zu finden. Die Betriebskosten steigen dabei insbesondere durch den Einsatz der alternativen Tone in der zweiten Hälfte des Betrachtungszeitraums relevant an. Die Kosten für Energieträger sind im Pfad 2 deutlich rückläufig, da hohe Einsparungen erzielt werden und nur in geringerem Umfang der Wechsel von Erdgas auf teureren Strom erfolgt. Insgesamt führt das zu einem Rückgang der Energiekosten von 171,61 Mio. €/a auf 109,83 Mio. €/a.

<sup>9</sup> Quelle: RWI Essen (1999)

<sup>10</sup> Für 1990 liegen statistische Daten über die Emissionen aus dem Brennstoffeinsatz und dem Fremdstrombezug vor. Daten zu Prozessemmissionen sind nicht verfügbar. Um die Vergleichbarkeit zum Scope der Studie zu gewährleisten, wurden sie vom Verband konservativ geschätzt. Selbst bei einer noch deutlich geringeren Annahme für die Prozessemmissionen wird das Reduktionsziel von 55 % weiterhin erreicht. Die Erfüllung ist damit mit hinreichender Sicherheit gegeben.

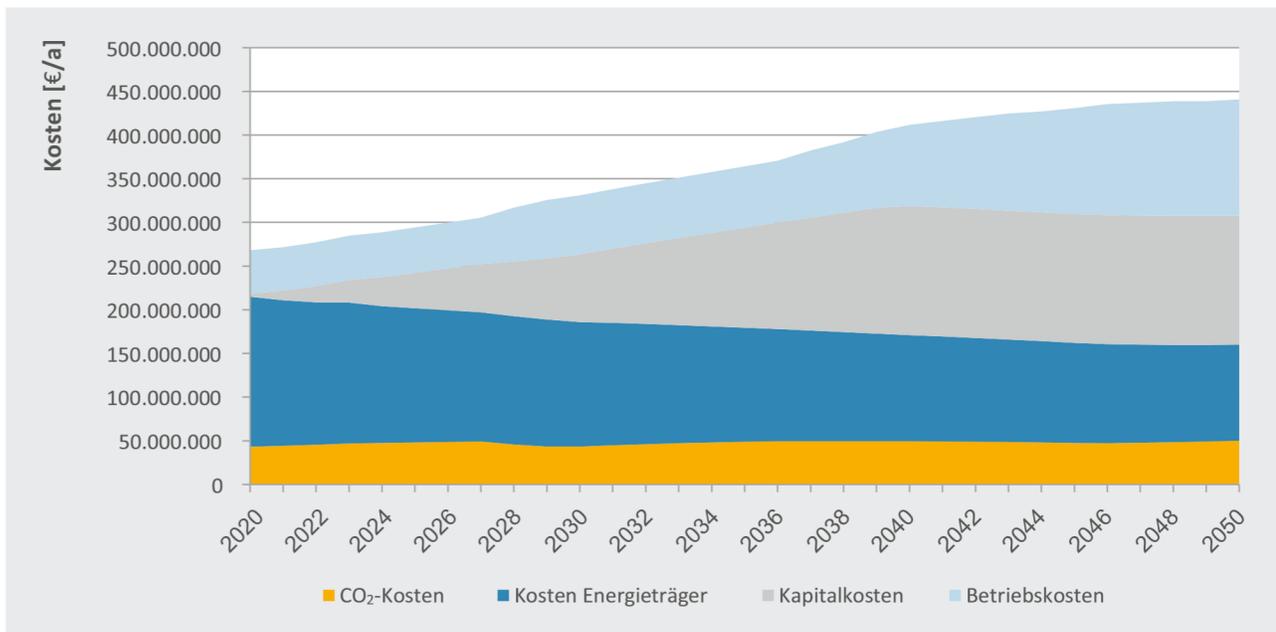


Abbildung 26: Entwicklung der jährlichen energiebezogenen Kosten bis 2050 im Technologiepfad

Die CO<sub>2</sub>-Kosten entwickeln sich trotz der relevanten Emissionsminderungen vom Ausgangsniveau aus leicht nach oben. Dies liegt im hinterlegten Anstieg der angesetzten Zertifikatspreise begründet. Abbildung 27 verdeutlicht diesen Zusammenhang. Insgesamt betrachtet gleichen sich der Rückgang der Emissionen und der Anstieg der Zertifikatskosten etwa aus, sodass das Niveau der CO<sub>2</sub>-Kosten beinahe konstant bleibt, auch wenn in einzelnen Jahren gewisse Schwankungen auftreten.

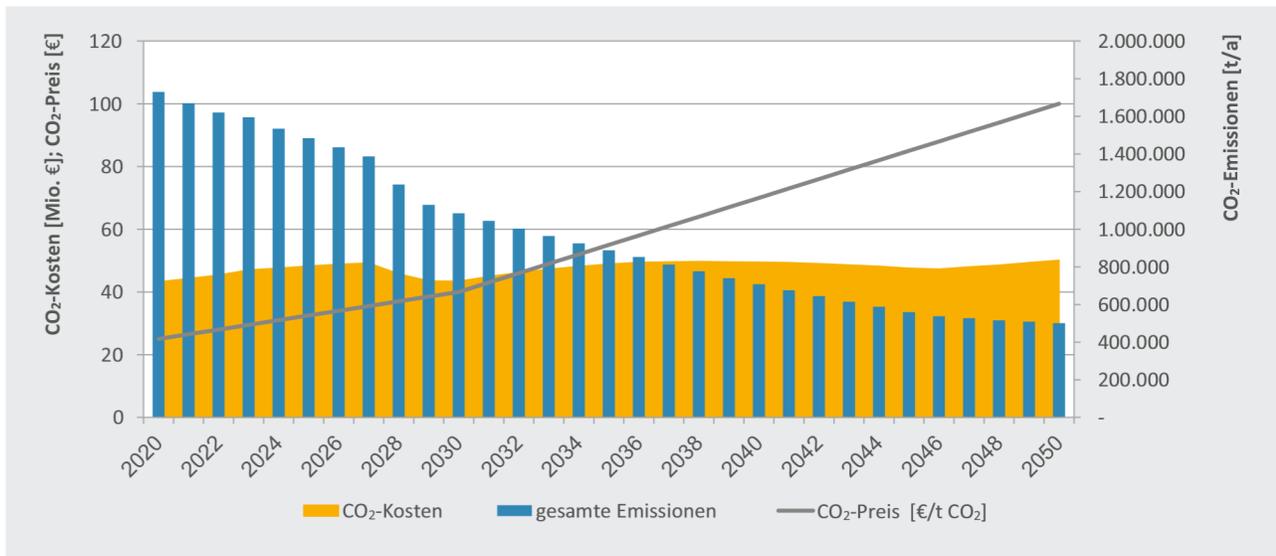


Abbildung 27: Entwicklung der CO<sub>2</sub>-Kosten im Technologiepfad

Insgesamt werden im Technologiepfad Investitionen von 1.732,5 Mio. € aufgewendet, wovon 851,9 Mio. € für spezifische Minderungsmaßnahmen fällig werden. Diese beziffern auch den Mehrbedarf, der im Vergleich zum Referenzpfad und damit auch zusätzlich zu den laufenden Investitionen der Ziegelindustrie zu tätigen ist.

Im Verhältnis zur Differenz zur Ausgangslage sind die Mehrkosten von etwa 38 Mio. €/a im Zieljahr gegenüber dem Referenzpfad für den Technologiepfad vergleichsweise moderat.

## 8.5 Sensitivitäten

Der Verlauf der Kosten und Emissionen im Technologiepfad hängt maßgeblich vom gewählten Investitionsbudget ab. Im Rahmen der Studie wurde hier ein ambitionierter Wert von 28,41 Mio. €/a gewählt, was – wie bereits beschrieben – 40 % der aktuellen jährlichen Investitionen der Ziegelindustrie entspricht. Diese Investitionsmittel muss die Branche also zusätzlich bereitstellen, um die Emissionsminderungen aus Pfad 2 zu realisieren. Hier wird nun kurz angerissen, welche Änderungen sich ergeben können, wenn statt der angesetzten 40 % ein niedrigerer Wert von 25 % oder ein höherer Wert von 55 % verwendet wird. Im ersten Fall sinkt das jährliche Investitionsbudget auf 17,76 Mio. €/a und entspricht damit noch 62,5 % des Budgets aus dem Technologiepfad. Im zweiten Fall steigt das Budget auf 39,06 Mio. €/a respektive 137,5 % des ursprünglichen Budgets.

Wie erwartet, entwickeln sich die Emissionen der drei Szenarien mit fortschreitendem Verlauf immer weiter auseinander. Die Reihung verhält sich ebenso vorhersehbar: Je höher das Investitionsbudget, desto höher fallen auch die Minderungen aus. 2050 verbleiben bei reduziertem Budget noch

0,68 Mio. t CO<sub>2</sub>/a, bei erhöhtem Budget 0,40 Mio. t CO<sub>2</sub>/a. Die Differenz zum Wert aus dem Technologiepfad von 0,50 Mio. t CO<sub>2</sub>/a fällt beim reduzierten Budget höher aus, da tendenziell immer höhere Investitionen für Minderungen anfallen, je weiter die Emissionen bereits reduziert sind. Festzuhalten ist, dass auch bei reduziertem Investitionsbudget noch deutliche Minderungen gegenüber dem Referenzpfad erbracht werden, bei dem im Jahr 2050 noch 1,26 Mio. t CO<sub>2</sub>/a ausgestoßen werden. Das ist insbesondere deshalb interessant, da im Zieljahr dafür nur moderate Mehrkosten von etwa 14 Mio. €/a anfallen. Bis zu einem gewissen Grad können Emissionen also unter den angenommenen Entwicklungen auch wirtschaftlich reduziert werden. Die Gesamtkosten belaufen sich in dieser Variante auf 417,4 Mio. €/a. Der zusätzliche Investitionsbedarf ist aber natürlich auch bereits im Szenario mit reduziertem Budget nicht zu unterschätzen. Bei erhöhtem Investitionsbudget liegt man dagegen bereits bei Kosten von 517,2 Mio. €/a. Ein relevanter Faktor für diesen massiven Kostenanstieg ist, dass hier bereits teure Maßnahmen an Öfen umgesetzt werden. Auch in den gesamten zusätzlichen Investitionen schlägt sich der Anstieg deutlich nieder.

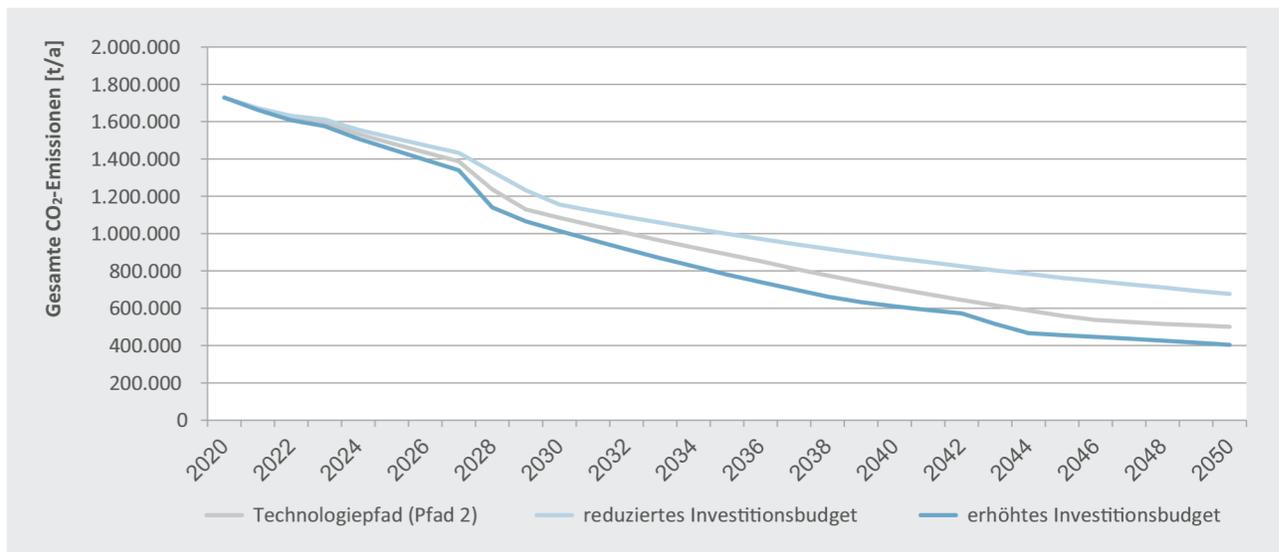


Abbildung 28: Entwicklung der CO<sub>2</sub>-Emissionen bis 2050 im Technologiepfad in Abhängigkeit der unterschiedlichen Sensitivitätsbetrachtungen des Investitionsbudgets

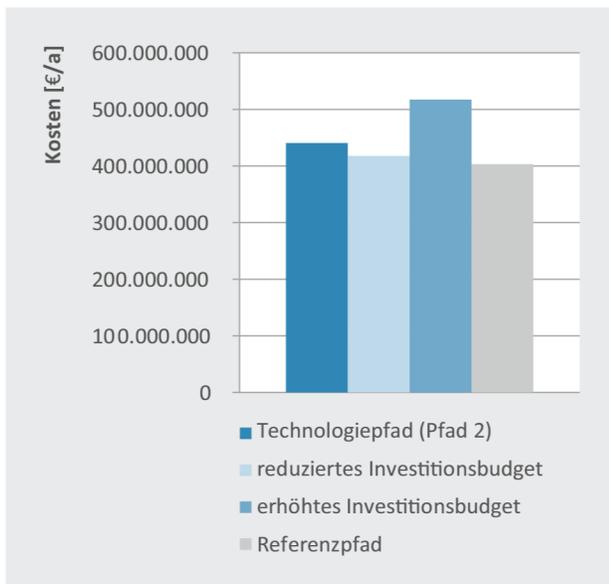


Abbildung 29: Jährliche energiebezogene Kosten 2050 im Technologiepfad, den Sensitivitätsbetrachtungen und im Referenzpfad

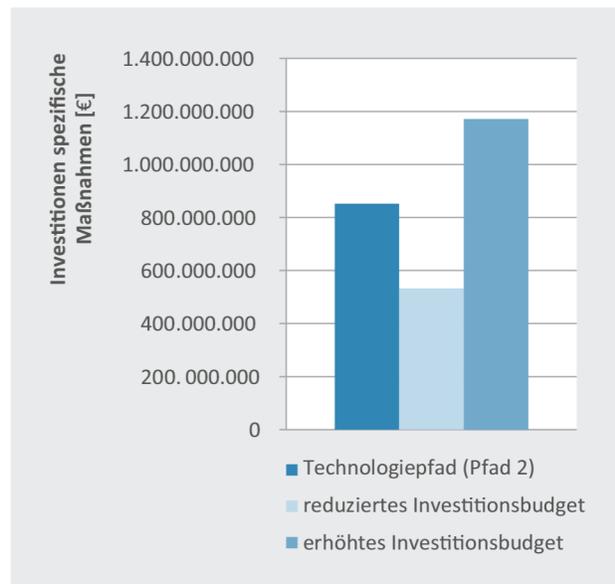


Abbildung 30: Kumuliertes Investitionsbudget bei Sensitivitätsbetrachtung im Technologiepfad

## 8.6 Wesentliche Erkenntnisse

Die Treibhausgasemissionen der Ziegelindustrie lassen sich mit moderaten Mehrkosten gegenüber dem Referenzpfad auf weniger als ein Drittel des aktuellen Werts reduzieren. Neben weiteren Optimierungen zeigen sich dafür vor allem die Entkopplung des Ofen-Trockner-Verbunds und der Einsatz von letztlich mit Grünstrom betriebenen Wärmepumpen verantwortlich. Allerdings sind die meisten der zur Erreichung dieser Minderungen nötigen Maßnahmen derzeit noch nicht wirtschaftlich umzusetzen. Abbildung 31 zeigt die Entwicklung der Vermeidungskosten ausgewählter Maßnahmen. Dies sind die Maßnahmen mit den geringsten Vermeidungskosten und damit die relevantesten Handlungsoptionen für den Technologiepfad. Die angenommenen Zertifikatspreise liegen in den meisten Fällen deutlich unter den Vermeidungskosten und nähern sich erst gegen Ende des Betrachtungszeitraums an. Dies macht aus betriebswirtschaftlicher Sicht auch deutlich, warum diese Maßnahmen bisher nicht umgesetzt wurden. Um die erheblichen Minderungen des Technologiepfads auch in der Realität zu erzielen, sind daher die notwendigen Rahmenbedingungen zu schaffen. Hier ist vor allem auch ein stabiler und bezahlbarer Preis für Strom aus erneuerbaren Energien zu nennen. Darüber hinaus können zielgerichtete Fördermechanismen und attraktive Investitionsbedingungen dazu beitragen, die ambitionierten Investitionsvorhaben in die Tat umzusetzen und auch insgesamt die Wirtschaftlichkeit der Maßnahmen zu erhöhen. Insbesondere vor dem Hintergrund der überwiegend mittelständischen Prägung der Branche sind Förder-

mechanismen auch ein wichtiges Mittel, um etwaige Nachteile beim Zugang zum Kapitalmarkt auszugleichen. Dies gilt bereits für den Technologiepfad und umso mehr für den nachfolgenden Klimaneutralitätspfad.

Für einige der genannten Maßnahmen bieten sich bestehende Förderinstrumente an, insbesondere Investitionsförderungen. Diese können auch zu einer schnelleren Umsetzung von Maßnahmen als hier angenommen beitragen. Sehr relevant zur Emissionsreduktion und auch zur Energiewende beitragende Maßnahmen der Ziegelindustrie benötigen noch Pilotierungen und Demonstrationsvorhaben. Einige Maßnahmen – zum Beispiel zur Reduktion prozessbedingter Emissionen durch alternative Tone – benötigen noch FuE-Unterstützung. Abhängig von der Entwicklung relevanter Kostenparameter, wie etwa Preise für Strom oder klimaneutrale Brennstoffe, kann gerade im Zusammenhang mit der Markteinführung komplett neuer Technologien und Verfahren auch Bedarf für eine Deckung operativer Mehrkosten bestehen, wie es beispielsweise im Innovationsfonds der EU bereits angelegt ist und auch im Zusammenhang mit „Carbon Contracts for Difference“<sup>11</sup>.

<sup>11</sup> Siehe zum Beispiel Agora Energiewende und Wuppertal Institut (2019): Klimaneutrale Industrie: Schlüsseltechnologien und Politikoptionen für Stahl, Chemie und Zement. Berlin, November 2019. Abrufbar unter: [www.agora-energiewende.de](http://www.agora-energiewende.de)

Eine deutliche Reduktion der Emissionen wird allerdings dennoch voraussichtlich mit hohen Vermeidungskosten und daraus resultierenden relevanten Mehrkosten gegenüber der aktuellen Situation einhergehen. Um die Wettbewerbs-

fähigkeit der Ziegelindustrie zu erhalten und zur Senkung der Emissionen beizutragen, müssen geeignete Regelungen geschaffen bzw. erhalten werden, die dem damit steigenden Carbon-Leakage-Risiko effektiv entgegenwirken.

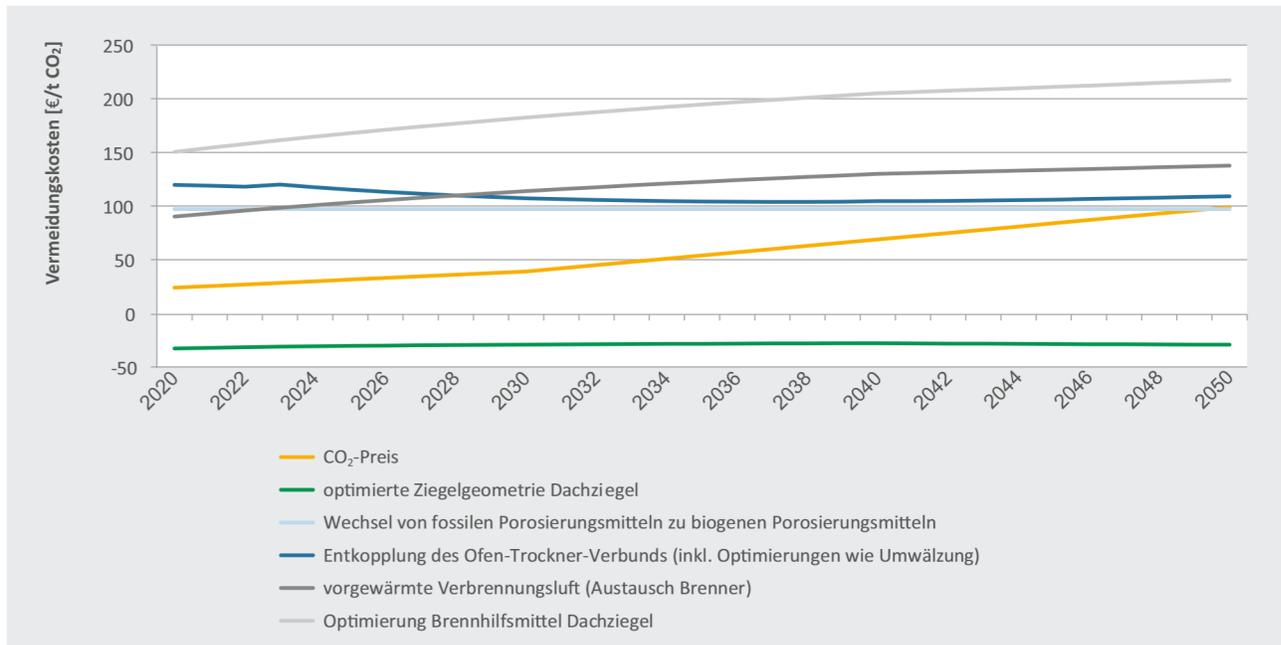


Abbildung 31: Entwicklung der Vermeidungskosten ausgewählter Technologien im Technologiepfad

## 8.7 Steckbrief Technologiepfad (Pfad 2)

Technologiepfad (Pfad 2)	
<p><b>Beschreibung Maßnahmen</b></p>	<p>Maßnahmen Pfad 1:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>kontinuierliche Effizienzsteigerung beim Einsatz von Strom und Erdgas</li> <li>Reduktion Emissionsfaktoren Strom und Erdgas</li> </ul> <p>Zusätzliche Maßnahmen (nicht abschließend):</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Entkopplung Ofen-Trockner-Verbund in Verbindung mit Wärmepumpe</li> <li>vorgewärmte Verbrennungsluft (Austausch Brenner)</li> <li>optimierte Ziegelgeometrie Dachziegel</li> <li>Einsatz biogener Porosierungsmittel</li> <li>Optimierung Brennhilfsmittel Dachziegel</li> </ul>
<p><b>Emissionsentwicklung bis 2030:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Senkung auf 1,1 Mio. t CO<sub>2</sub></li> </ul> <p><b>Emissionsentwicklung bis 2050:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Senkung auf 0,5 Mio. t CO<sub>2</sub></li> <li>zusätzlich 0,8 Mio. t CO<sub>2</sub> Minderung gegenüber Referenzpfad</li> </ul>	<p>CO<sub>2</sub>-Emissionen [t/a]</p> <p>2020 2022 2024 2026 2028 2030 2032 2034 2036 2038 2040 2042 2044 2046 2048 2050</p> <p>■ Prozessemissionen Ton ■ Prozessemissionen Porosierung ■ Emissionen Energieträger</p>
<p><b>Wesentliche Einflussfaktoren auf Emissionsentwicklung:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Effizienzsteigerung durch die Entkopplung des Ofen-Trockner-Verbunds in Verbindung mit Wärmepumpeneinsatz beim Trockner</li> <li>biogene Porosierungsmittel</li> </ul>	
<p><b>Kostenentwicklung (energiebezogen):</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>mittlere Kosten Ø 2021–2050: 364 Mio. €/a</li> <li>Kosten Zieljahr 2050: 441 Mio. €</li> <li>zusätzliche 38 Mio. €/a gegenüber Referenzpfad</li> <li>Gesamtinvestitionsausgaben: 1.733 Mio. €</li> <li>Gesamtinvestitionsausgaben spezifische Maßnahmen: 852 Mio. €</li> <li>mittlere Investitionsausgaben spezifische Maßnahmen: 28,4 Mio. €/a</li> </ul>	<p>Kosten [€/a]</p> <p>2020 2022 2024 2026 2028 2030 2032 2034 2036 2038 2040 2042 2044 2046 2048 2050</p> <p>■ CO<sub>2</sub>-Kosten ■ Kosten Energieträger ■ Kapitalkosten ■ Betriebskosten</p>
<p><b>Wesentliche Einflussfaktoren auf Kostenentwicklung:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Kapitalkosten für Maßnahmen</li> <li>Betriebskosten</li> </ul>	
<p><b>Wesentliche Hemmnisse:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>mangelnde Wirtschaftlichkeit der Minderungsoptionen</li> <li>volatile Rahmenbedingungen und fraglicher Carbon-Leakage-Schutz</li> </ul>	

Tabelle 7: Steckbrief Technologiepfad (Pfad 2)

## 9 Klimaneutralitätspfad (Pfad 3)

Ziegel lassen sich nur dann treibhausgasneutral produzieren, wenn es gelingt, den derzeit primären Energieträger Erdgas vollständig durch CO<sub>2</sub>-neutrale Energieträger zu substituieren. Dazu ist eine Umstellung auf CO<sub>2</sub>-freie synthetische Brennstoffe oder eine Elektrifizierung der Prozesse denkbar, vorausgesetzt, der Strombezug beruht rein auf erneuerbaren Energien. Darüber hinaus dürfen nur noch Rohstoffe, die frei von fossilem Kohlenstoff sind, eingesetzt werden.

### 9.1 Maßnahmen

Auch der Klimaneutralitätspfad setzt auf den Annahmen aus dem Referenzpfad auf. Die dort erreichten Minderungen sind ebenfalls Bestandteil von Pfad 3. Jedoch werden zur Erreichung der Treibhausgasneutralität noch deutlich mehr Maßnahmen zusätzlich umgesetzt als im Technologiepfad. Die zur Wahl stehenden Maßnahmen für Pfad 3 wurden um jene Maßnahmen bereinigt, die zwar gegebenenfalls einen Teil der Emissionen kosteneffizient mindern, aber für die Erreichung der Klimaneutralität nicht zielführend sind. Das verfügbare Investitionsbudget ist hier im Gegensatz zum Technologiepfad nicht vorgegeben. Die Klimaneutralität wird in diesem Pfad mit allen notwendigen Mitteln erzwungen, auch unabhängig von wirtschaftlichen Aspekten. Die dafür nötigen jährlichen Investitionen wurden nicht vorgegeben, sondern aus dem Modell abgeleitet. Für Investitionen in konkrete Minderungsmaßnahmen zur vollständigen Reduktion der Emissionen der deutschen Ziegelindustrie wird unter den getroffenen Annahmen ein zusätzliches Budget von etwa 50,00 Mio. €/a benötigt. Damit werden insgesamt im Rahmen dieses Pfades 78,41 Mio. €/a als Investitionsbudget zur Minderung der Emissionen betrachtet. Darin enthalten sind, wie gehabt, auch die Investitionen in die bereits aus dem Referenzpfad bekannten Effizienzmaßnahmen. Inklusiv der reinen Ersatzinvestitionen, die im Rahmen dieser Studie nicht betrachtet werden, steigt der jährliche Investitionsbedarf der Ziegelindustrie damit auf 121,02 Mio. €/a.

Die bedeutendsten Maßnahmen aus Pfad 3 sind:

- Entkopplung Ofen-Trockner-Verbund mit dem Einsatz einer Wärmepumpe für den Wärmebedarf im Trockner
- Neubau elektrischer Öfen
- Optimierung Ziegelgeometrie für Dachziegel
- Einsatz biogener Porosierungsmittel
- Einsatz von Wasserstoff als Ofenbrennstoff

- vorgewärmte Verbrennungsluft (Austausch Brenner)
- Optimierung der Brennhilfsmittel für Dachziegel
- Gewichtsreduktion HMZ/VMZ/DZ
- alternativer Rohstoff Ton HMZ/VMZ/DZ



Abbildung 32: Brenner auf einem Tunnelofen;  
Quelle: LEIPFINGER-BADER GmbH

Die Trockner werden im Rahmen der Betrachtung nahezu vollständig auf die Beheizung durch Wärmepumpen umgestellt. Etwa drei Viertel der Öfen werden auf Wasserstofffeuerung umgerüstet, die restlichen überwiegend durch elektrische Öfen ersetzt. In Einzelfällen kommen darüber hinaus noch weitere Maßnahmen zum Einsatz (siehe Anhang). Anders als im Pfad 2 wird bei den Maßnahmen zur Reduktion der Prozessemissionen nun eine vollständige Minderung mit entsprechend höheren Kosten angesetzt.

Die Recyclingquoten werden im Vergleich zum Technologiepfad nochmals erhöht und ermöglichen auf diesem Weg eine Reduktion der durch den Ton bedingten Emissionen. Dies allein wäre aber ohne die oben genannten konkreten Maßnahmen zur Reduktion der Prozessemissionen nicht ausreichend. Auch beim Grünstrombezug geht der Klimaneutralitätspfad noch ambitionierter voran, und bis 2035 wird der gesamte Bezug auf Grünstrom umgestellt.

	2020 <sup>12</sup>	2050 <sup>13</sup>
Hintermauerziegel	3 %	25 %
Vormauerziegel	3 %	15 %
Dachziegel	0 %	3 %

Tabelle 8: Recyclingquote Klimaneutralitätspfad

12 Quelle: IBU (2015), IBU (2016), IBU (2018)

13 Quelle: Tretau, A. und Leydolph, B. (2019)

## 9.2 Entwicklung des Energieeinsatzes

Bei der Betrachtung des Energieträgereinsatzes im Klimaneutralitätspfad in Abbildung 33 fällt auf, dass zur Minderung der Emissionen nicht einfach nur der Brennstoff Erdgas durch die getroffenen Maßnahmen substituiert wird. Der Verlauf zeigt deutlich, dass mit diesen Maßnahmen auch enorme Effizienzgewinne einhergehen, die es zwangsläufig ebenfalls zu realisieren gilt. Die Entkopplung des Ofen-Trockner-Verbunds und der Einsatz von hocheffizienten Wärmepumpen für die Trockner spielen hier eine herausgehobene Rolle. Aber auch die Mehrzahl der übrigen durchgeführten Maßnahmen trägt zu dieser deutlichen Reduzierung der Energieeinsätze bei. Der Gesamtenergieeinsatz geht von ursprünglich 5,4 TWh auf noch 2,6 TWh zurück, wird also mehr als halbiert. Wohlgermerkt weiterhin unter der Annahme, dass die Produktion konstant bleibt. Der Großteil dieser Einsparungen wird bereits bis Anfang der 2040er realisiert.

Mitte der 2020er beginnt der Wechsel auf emissionsfreie Energieträger, der in den 2030ern deutlich Fahrt aufnimmt. Insbesondere der Wasserstoffeinsatz nimmt in diesem Zeit-

raum deutlich zu. Getrieben wird diese Entwicklung durch die vorrangige Umrüstung auf wasserstoffgefeuerte Öfen im Rahmen der Entkopplung. Der Stromeinsatz steigt parallel dazu durch den vermehrten Einsatz von Wärmepumpen leicht an. Aufgrund deren hoher Effizienz fällt der Anstieg aber moderater aus. In Einzelfällen werden aufgrund der geringeren Investitionsausgaben auch Öfen auf den Einsatz von Synthesegas umgerüstet, was sich allerdings insgesamt kaum niederschlägt. Ein breiterer Einsatz wird durch die höheren Vermeidungskosten, bedingt durch die noch höheren Brennstoffkosten für Synthesegas im Vergleich zum Wasserstoff, verhindert. Etwas auffälliger ist dagegen der Einsatz von biogenem Festbrennstoff in einigen Trocknern. Auch diese Fälle sind durch die geringeren Investitionsausgaben im Vergleich zur Wärmepumpe bedingt. Bis 2048 gelingt dann der vollständige Verzicht auf Erdgas. Die letzten mit Erdgas betriebenen Öfen werden in diesem Zeitraum durch elektrische Öfen ersetzt. In den letzten Jahren des Betrachtungszeitraums liegt der Fokus dann auf der Minderung der Prozessemissionen, weshalb hier beim Energieträgereinsatz keine wesentlichen Veränderungen mehr auftreten.

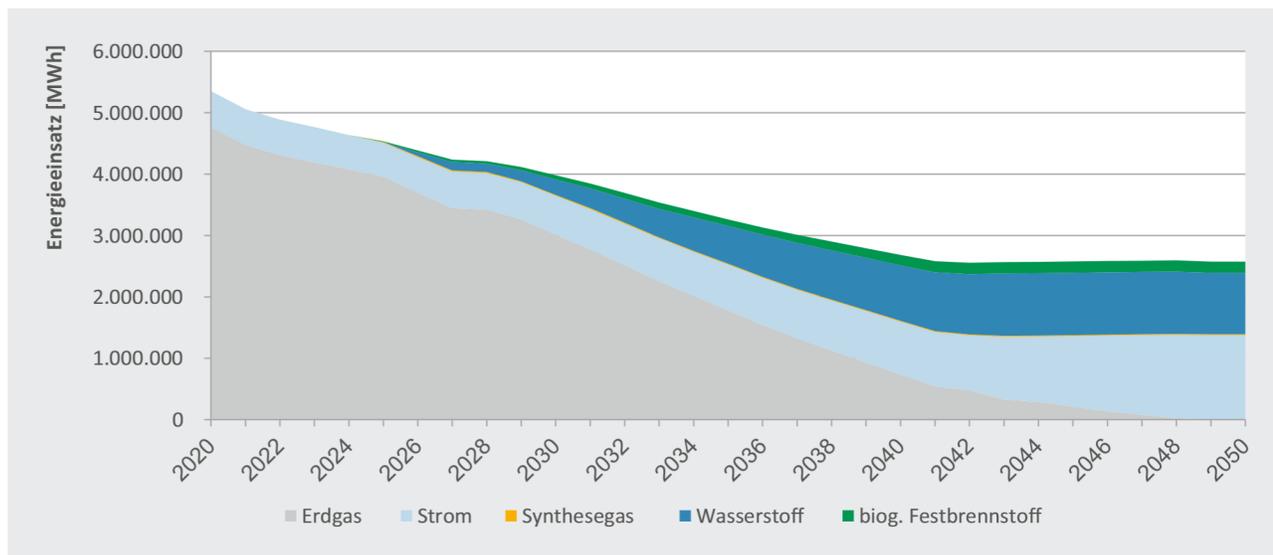


Abbildung 33: Entwicklung des Energieträgereinsatzes bis 2050 im Klimaneutralitätspfad

### 9.3 Entwicklung der CO<sub>2</sub>-Emissionen

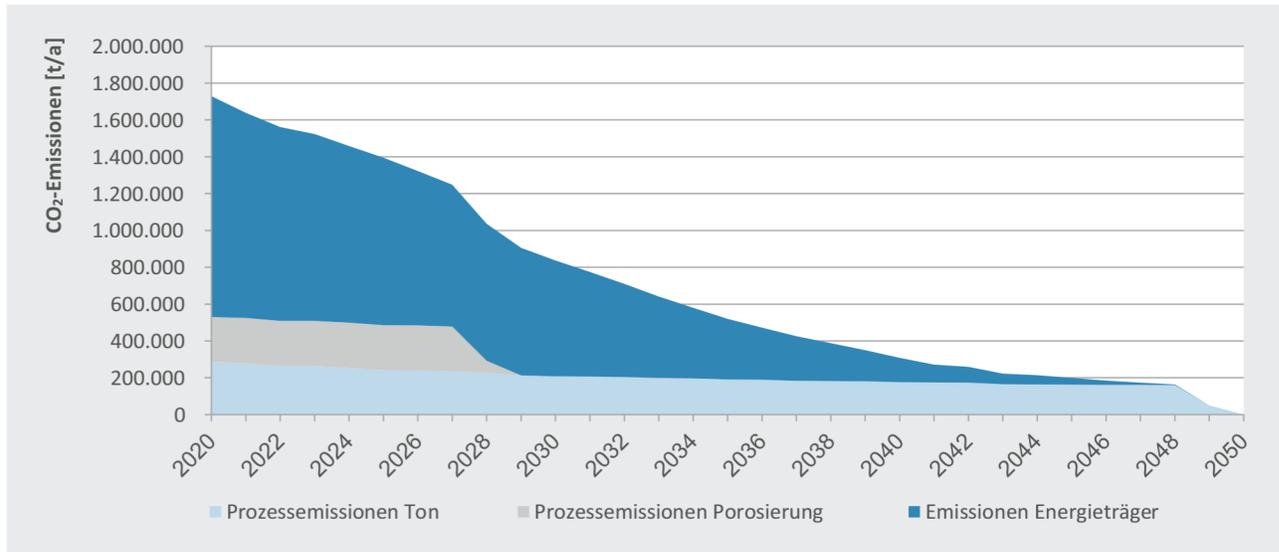


Abbildung 34: Entwicklung der CO<sub>2</sub>-Emissionen bis 2050 im Klimaneutralitätspfad

Die CO<sub>2</sub>-Emissionen der gesamten Branche gehen bis 2030 stark zurück, vor allem getrieben durch den Rückgang des Erdgaseinsatzes. Aber auch bei den Prozessemmissionen werden bereits erste Minderungen erzielt. Ende der 2020er-Jahre wird davon ausgegangen, dass die Entwicklungen für den Einsatz rein biogener Porosierungsstoffe weiter fortgeschritten sind und diese flächendeckend zum Einsatz kommen können. Aufgrund der Attraktivität dieser Maßnahme wird sie dann auch konsequent umgesetzt und reduziert die Emissionen aus Porosierung innerhalb von zwei Jahren vollständig. Danach sinken die Emissionen aus Energieträgern in einer immer flacher werdenden Kurve ab. Dies hat verschiedene Gründe. Darunter fällt insbesondere die vollständige Umstellung auf Grünstrom bereits 2035 und die Tatsache, dass die attraktivsten Maßnahmen zur Reduktion oftmals auch eine höhere Reduktion im Verhältnis zur Investition bieten. Da das jährlich verfügbare Investitionsbudget im Betrachtungszeitraum konstant bleibt, nehmen die Minderungen damit kontinuierlich ab. Je näher man der Treibhausgasneutralität kommt, desto schwieriger wird es in der Regel, die noch verbleibenden Emissionen zu mindern. Im Jahr 2049 werden schließlich keine Emissionen aus Energieträgern mehr freigesetzt. Die Prozessemmissionen aus den Tonen nehmen über den gesamten Betrachtungszeitraum, abgesehen von den letzten beiden Jahren, nur langsam ab. Zum Ende hin erfolgt dann eine rapide Absenkung auf null. Dies scheint, gerade in Hinblick auf die vorigen Ausführungen, auf den ersten Blick fragwürdig. Ein genauerer Blick auf die zugrunde liegenden Mechanismen liefert jedoch eine

plausible Erklärung. Die Reihung der Maßnahmen ergibt sich über die Vermeidungskosten. Maßnahmen mit geringen Vermeidungskosten werden, unter Beachtung etwaiger Restriktionen, zeitlich vor Maßnahmen mit hohen Vermeidungskosten umgesetzt. Die Steigung der sinkenden Emissionskurve wird dagegen, wie beschrieben, vor allem vom Verhältnis aus reduzierten Emissionen zu dafür nötigen Investitionen bedingt. Je höher, desto steiler ist der Verlauf der Kurve. Eine Maßnahme mit geringen Vermeidungskosten kann, muss aber nicht immer ein hohes Verhältnis aus reduzierten Emissionen zur Investition bieten. Umgekehrt gilt das auch für Maßnahmen mit hohen Vermeidungskosten. Die alternativen Tonrohstoffe haben sehr hohe Vermeidungskosten, weshalb sie größtenteils erst zum Ende des Betrachtungszeitraums umgesetzt werden. Da auf der anderen Seite die Investitionsausgaben für diese Maßnahmen relativ gering sind, sinken die Emissionen in den letzten beiden Jahren noch einmal sehr stark ab.

Mit erheblichem Aufwand würde es im Klimaneutralitätspfad mit den betrachteten Maßnahmen also tatsächlich gelingen, die Emissionen der deutschen Ziegelindustrie komplett zu mindern. Bereits im Jahr 2030 sinken die Emissionen auf 0,84 Mio. t CO<sub>2</sub>/a. Das entspricht mehr als einer Halbierung gegenüber dem Ausgangsniveau von 1,73 Mio. t CO<sub>2</sub>/a aus 2020.

## 9.4 Entwicklung der energiebezogenen Kosten

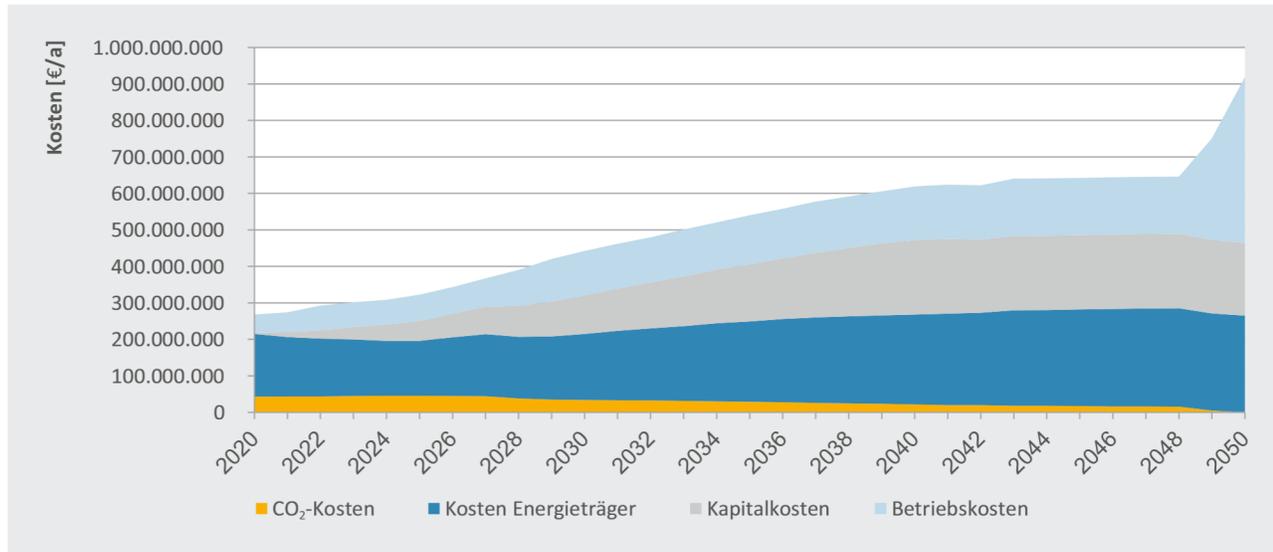


Abbildung 35: Entwicklung der jährlichen energiebezogenen Kosten bis 2050 im Klimaneutralitätspfad

Wie im vorigen Abschnitt dargelegt, führt der Pfad 3 zu einer Treibhausgasneutralität bis 2050. Dies kann allerdings nur mit erheblichen finanziellen Anstrengungen erreicht werden und geht unter den gegebenen Bedingungen und den getroffenen Annahmen mit einer Explosion der betrachteten Gesamtkosten in den letzten Jahren einher. Die jährlichen Kosten steigen im Betrachtungszeitraum um mehr als den Faktor 3 von 268,17 Mio. €/a auf 918,86 Mio. €/a. Im Mittel fallen im Betrachtungszeitraum Kosten von 514,89 Mio. €/a an.

Während die CO<sub>2</sub>-Kosten in den Pfaden 1 und 2 noch ein relevanter Faktor sind, gehen sie hier schon relativ früh im Verlauf unter. Dass CO<sub>2</sub>-Kosten in einem Treibhausgasneutralitätsszenario früher oder später verschwinden, liegt in der Natur der Sache. Aber hier schwindet deren Bedeutung nicht in erster Linie durch den eigenen Rückgang, sondern vielmehr durch den immensen Anstieg der übrigen Kosten, die selbst den Startwert von untergeordneter Bedeutung erscheinen lassen. Ein Teil dieses Anstiegs ist auf die Mehrkosten bei den Energieträgern zurückzuführen. Diese Kosten steigen von 171,60 Mio. €/a auf 264,82 Mio. €/a und erreichen damit schon alleine fast das gesamte Niveau der Basiskosten. Wohlgermerkt findet diese Steigerung trotz der Reduzierung des Energieeinsatzes um mehr als die Hälfte statt. Zurückzuführen ist das auf die Umstellung auf höherpreisige Energieträger, in erster Linie den Wasserstoff, aber auch den Strom. Ein relevanter Anstieg wird vor allem auch durch die betrachteten Kapitalkosten verursacht. In den letzten zehn Jahren des Betrachtungszeitraums betragen diese immer etwa 200 Mio. €/a.

Hier spielen insbesondere die großen Umstellungen an Öfen und Trocknern eine herausgehobene Rolle. Die größte Kostensteigerung entfällt allerdings auf die gestiegenen Betriebskosten. Infolge der immensen Kosten für die alternativen Tone schießen diese in den letzten Jahren regelrecht nach oben und liegen damit 2050 bei 454,78 Mio. €/a. Mit diesen Kosten muss dann auch für die Folgejahre gerechnet werden.

Abbildung 36 stellt den Verlauf Prozessemissionen aus Ton direkt dem Anstieg der Betriebskosten gegenüber. Auch wenn die gestiegenen Betriebskosten nicht allein auf die alternativen Tone zurückzuführen sind und noch weitere Maßnahmen die Entwicklung der Emissionen beeinflussen, so zeigt sich dennoch über den gesamten Betrachtungszeitraum ein starker Zusammenhang zwischen den beiden Verläufen. Besonders deutlich wird dies in den letzten beiden Jahren, in denen der Anstieg der Betriebskosten ausschließlich auf den Einsatz der kalkfreien Tonsorten zur vollständigen Reduktion der Prozessemissionen zurückzuführen ist. Dagegen bleiben die Betriebskosten in den fünf Jahren zuvor, in denen keinerlei Maßnahmen bei den Tonen ergriffen werden, konstant. Maßgeblicher Treiber für die gestiegenen Betriebskosten ist damit der Einsatz von alternativen Tonen zur Reduzierung der Prozessemissionen.

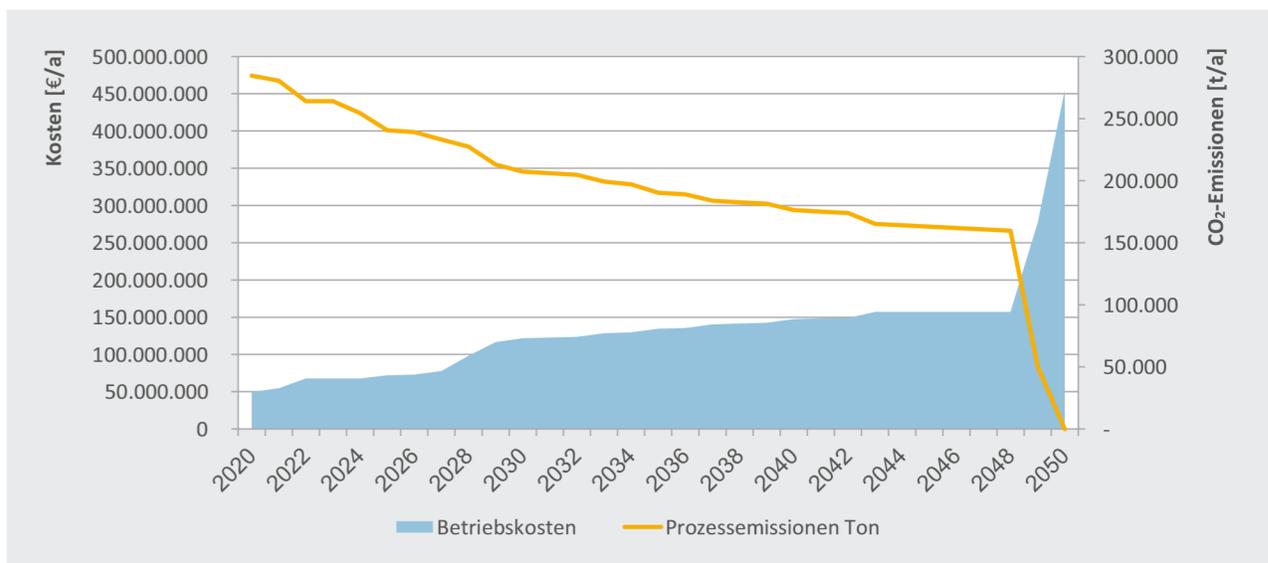


Abbildung 36: Gegenüberstellung Betriebskosten und Prozessemissionen aus eingesetztem Ton

Für die energiebezogenen Investitionen werden zur Erreichung der Treibhausgasneutralität in diesem Pfad insgesamt 2,35 Mrd. € benötigt. Auf spezifische Minderungsmaßnahmen entfallen davon 1,46 Mrd. €. Im Mittel bedeutet das für die deutsche Ziegelindustrie zusätzliche jährliche Investitionen in Höhe von 48,8 Mio. €/a für diese Maßnahmen. Im Verhältnis zu den jährlichen Investitionen in Maschinen aus dem Betrachtungszeitraum von 71,02 Mio. €/a stellt dies natürlich eine erhebliche Mehrbelastung dar. Eine Steigerung des Investitionsbudgets um beinahe 70 % wird ohne flankierende Maßnahmen nicht zu realisieren sein.

## 9.5 Sensitivitäten

Viele Entscheidungen im Verlauf der Modellierung und natürlich auch in der Realität hängen von externen Rahmenbedingungen und Faktoren ab, die nicht genau vorhersehbar sind. Daher wird in diesem Kapitel beleuchtet, welche Auswirkungen Änderungen an bestimmten Vorgaben oder Parametern haben können.

### 9.5.1 Pfad 3 ohne den Einsatz von alternativen Tonrohstoffen

Entscheidend für die Ziegelindustrie ist auch die Frage, wie mit den entstehenden Prozessemissionen, insbesondere aus dem Ton, verfahren wird. Während sich die Prozessemissionen aus den Zuschlagstoffen noch mit vertretbarem Aufwand mindern lassen, verursacht der Einsatz von kalkfreien Tönen, wie bereits beschrieben, massive Zusatzkosten und darüber hinaus energetische Mehraufwände im Transportwesen. Daher wird an dieser Stelle untersucht, wie sich Emissionsminderungen und Kostensteigerungen verhalten, wenn auf den Einsatz der alternativen Tonsorten komplett verzichtet wird.



Abbildung 37: Tongrube; Quelle: JUWÖ Poroton-Werke Ernst Jungk & Sohn GmbH

Abbildung 38 zeigt die erwartete Emissionsentwicklung unter diesen neuen Bedingungen. Der Verlauf ist grundsätzlich sehr ähnlich zum Klimaneutralitätspfad (vgl. Abbildung 34). Die Emissionen aus Energieträgern und Porosierungsmitteln verlaufen beinahe identisch. Der Verlauf wird hier nur etwas gestreckt, da die notwendigen Investitionen zur Reduzierung der energie-seitigen Emissionen über zwei zusätzliche Jahre verteilt werden können und damit in den Vorjahren etwas niedrigere Investitionen ausreichen. Deutliche Unterschiede gibt es dagegen bei den Prozessemissionen aus dem Ton. Während diese im Klimaneutralitätspfad in den letzten beiden Jahren mit einem auffälligen Knick auf null sinken, bleiben sie bei der Sensitivätsbetrachtung beinahe auf dem Niveau des Ausgangswerts. 2050 werden in diesem Fall noch 0,21 Mio. t CO<sub>2</sub>/a emittiert, die vollständig durch den natürlichen Rohstoff Ton bedingt sind. Die Minderungen bis 2030 fallen mit dann noch 0,93 Mio. t CO<sub>2</sub>/a auch nur unwesentlich geringer aus als im Klimaneutralitätspfad.

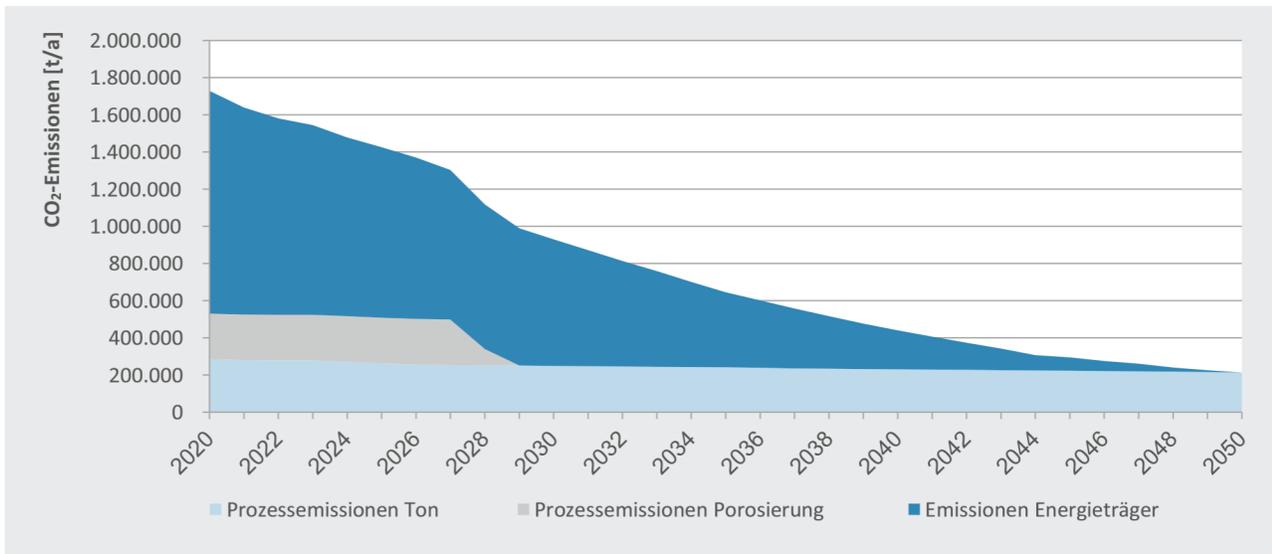


Abbildung 38: Entwicklung der CO<sub>2</sub>-Emissionen bis 2050 im Pfad 3 ohne alternative Tonrohstoffe

Aus Kostensicht ergeben sich dagegen deutlich relevantere Unterschiede. Da auf gewisse Maßnahmen im Vergleich zum Pfad 3 verzichtet wird, sinkt das insgesamt benötigte Investitionsvolumen in spezifische Maßnahmen auf 1,30 Mrd. € ab. Damit sinkt entsprechend das jährlich notwendige Budget für diese Maßnahmen auf 43,50 Mio. €/a ab. Das ist natürlich immer noch eine massive Zusatzbelastung zur aktuellen Situation, die nur unter geeigneten Voraussetzungen zu realisieren ist. Die gesamten energiebezogenen Investitionen betragen in diesem Fall 2,18 Mrd. € für den gesamten Betrachtungszeitraum.

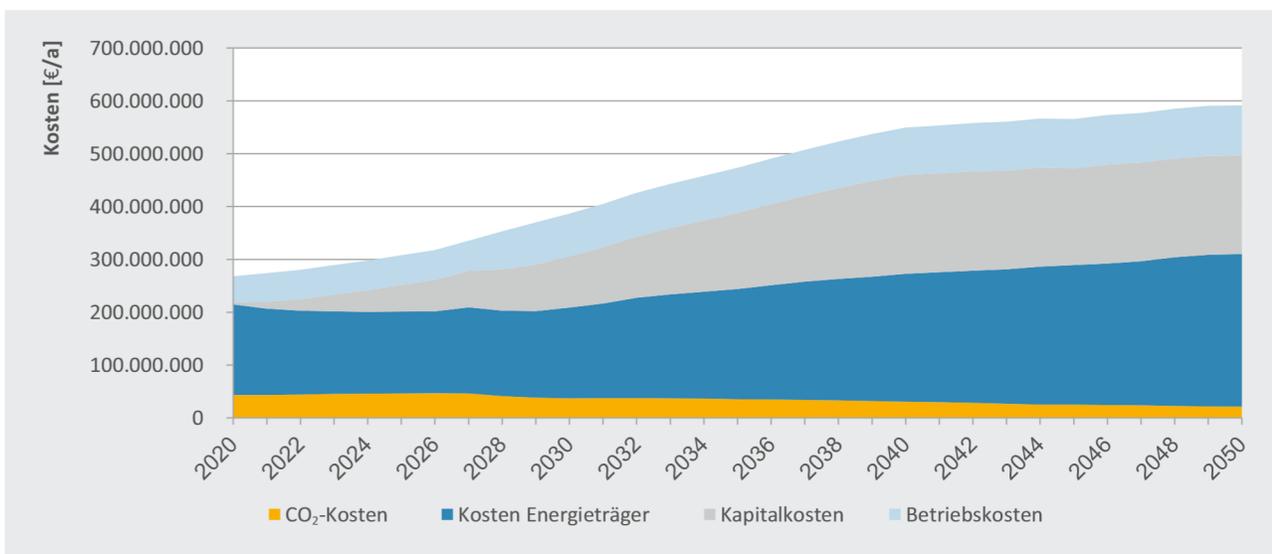


Abbildung 39: Entwicklung der jährlichen energiebezogenen Kosten bis 2050 im Pfad 3 ohne alternative Tonrohstoffe

Besonders deutlich werden die Unterschiede allerdings beim Blick auf die Gesamtkosten in Abbildung 39. Gegenüber dem Klimaneutralitätspfad reduzieren sich die Kosten im Zieljahr um über 300 Mio. €/a bzw. mehr als ein Drittel, wenn auf den Einsatz der kalkfreien Tone verzichtet wird. Die gesamten energiebezogenen Kosten betragen dann im Zieljahr 591,54 Mio. €/a, was natürlich immer noch eine immense Steigerung gegenüber dem Ausgangswert und auch dem Zielwert des Referenzpfades darstellt. Die Kosten für Energieträger verhalten sich ähnlich wie im Klimaneutralitätspfad. Die Kapitalkosten fallen wegen der etwas geringeren Investitionen ein wenig niedriger aus. Da die Emissionen im Gegensatz zum Klimaneutralitätspfad nicht vollständig gemindert werden können, fallen hier noch CO<sub>2</sub>-Kosten in Höhe von 21,32 Mio. €/a an, die aber im Verhältnis zu den übrigen Kosten von untergeordneter Bedeutung sind. Die Differenz bei den Betriebskosten ist allerdings gewaltig. Zwar verdoppeln sich auch in der Sensitivitätsbetrachtung die Betriebskosten beinahe auf einen Wert von dann 94,66 Mio. €/a. Wenn man allerdings bedenkt, dass sich die Betriebskosten in Pfad 3 etwa verneunfachen, fällt der Anstieg im direkten Vergleich geradezu moderat aus.

Für die Reduktion von diesen etwas mehr als 200.000 t CO<sub>2</sub>/a an Prozessemissionen zeichnet sich verstärkter Forschungsbedarf ab, um die Kosten deutlich zu senken bzw. alternative Minderungsoptionen zu etablieren. Insbesondere die Tongrubenerforschung in der näheren Umgebung der kalkreichen Tone könnte eine große Rolle spielen, da auch kleinräumig große Unterschiede auftreten können.

## 9.5.2 Entkopplung des Ofen-Trockner-Verbunds und Einsatz Wärmepumpe beim Trockner

Eine wesentliche Entscheidung auf dem Weg zur Klimaneutralität ist, wie mit dem Ofen-Trockner-Verbund umgegangen wird. Zwar handelt es sich in der Realität hier sicherlich um eine Einzelfallentscheidung, die werkspezifisch zu behandeln ist, aber diese Entscheidung wird von externen Rahmenbedingungen maßgeblich beeinflusst. Aufgrund der hohen anfallenden Investitionsausgaben kann es hier zu Lock-In-Effekten kommen, da eine nachträgliche Revidierung der Entscheidung, etwa infolge sich ändernder Rahmenbedingungen, mit dem hohen Aufwand der erneuten Investition verbunden ist. An der Entkopplung des Ofen-Trockner-Verbunds führt in der Zukunft wohl kein Weg vorbei. Auch die Hochtemperaturwärmepumpe kristallisiert sich unter den getroffenen Annahmen als attraktive Möglichkeit auf dem Weg zur treibhausgasneutralen Beheizung des Trockners heraus. Die Frage nach der zukünftigen Ausgestaltung des Ofens ist allerdings stark von externen Faktoren abhängig. Bei den Rahmenbedingungen, die dieser Studie zugrunde liegen, ist die Befuerung des Ofens mit Wasserstoff in Verbindung mit Entkopplung und Wärmepumpe die attraktivste Maßnahme in diesem Bereich. Unter geänderten Rahmenbedingungen wäre es allerdings auch denkbar, dass elektrische Öfen wirtschaftlicher betrieben werden können als wasserstoffbefeuerte Öfen. Daher wird untersucht, wie sich die Änderung bestimmter externer Faktoren auf die Vermeidungskosten der beiden genannten Maßnahmen auswirken. Jeder Faktor wird dabei individuell

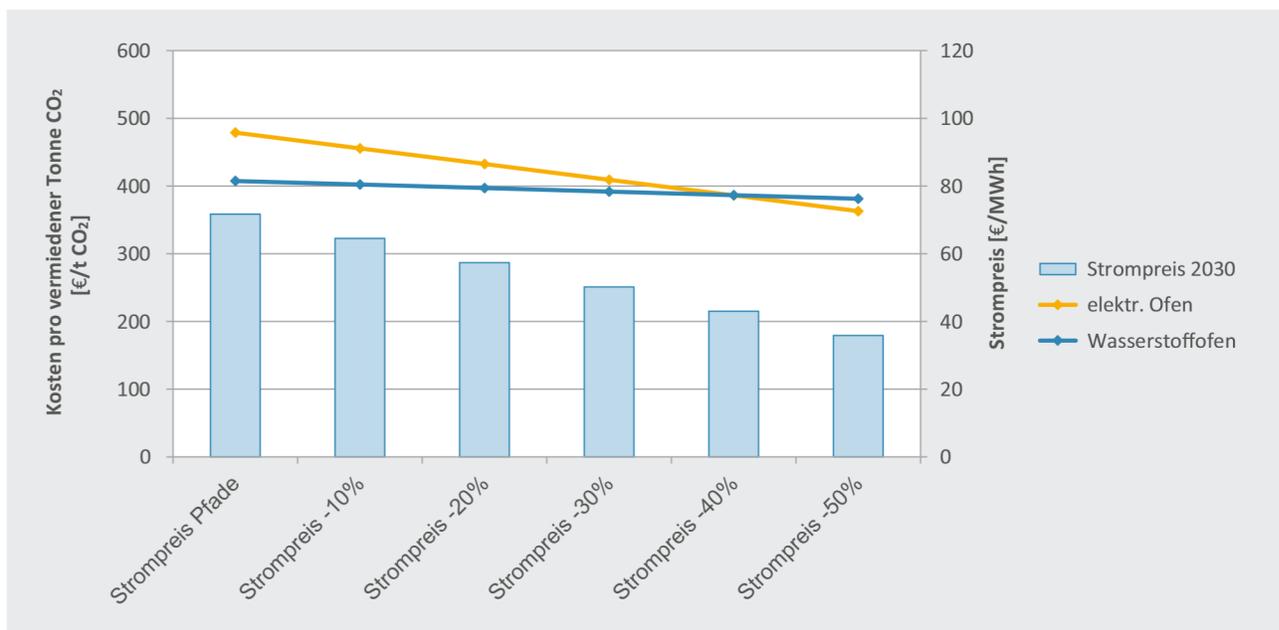


Abbildung 40: Vergleich der Vermeidungskosten von elektrischem Ofen und Wasserstofföfen – Sensitivität Strompreis 2030

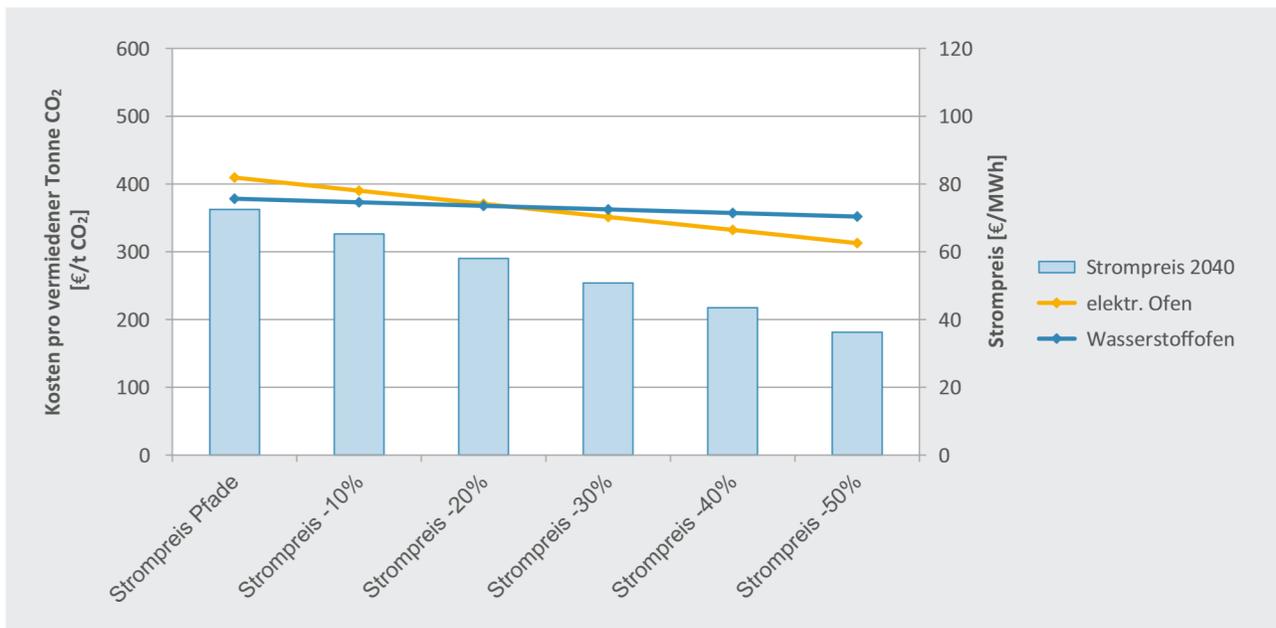


Abbildung 41: Vergleich der Vermeidungskosten von elektrischem Ofen und Wasserstoffofen – Sensitivität Strompreis 2040

betrachtet. Da die Vermeidungskosten nicht statisch sind, sondern sich im Laufe der Zeit verändern können, werden exemplarisch die Jahre 2030 und 2040 dargestellt.

### Sensitivität Strompreis – Vergleich elektrischer Ofen und Wasserstoffofen

Ein relevanter Faktor beim Vergleich der beiden Maßnahmen ist der Strompreis. Da die Ziegelindustrie derzeit einen relativ geringen Bezug von Strom aufweist, liegt der durchschnittlich zu zahlende Preis von 70,01 €/MWh<sup>14</sup> hier höher als in anderen stromintensiveren Branchen. Befreiungen von gewissen Kosten sind in diesem Zusammenhang bei einer steigenden Elektrifizierung zumindest denkbar. Daher wird betrachtet, welche Auswirkungen ein geringerer Strompreis auf die Vermeidungskosten hat.

Die Vermeidungskosten verringern sich für beide Maßnahmen durch die sinkenden Stromkosten. Da auch in der Wasserstoffvariante der Trockner über eine Wärmepumpe beheizt wird, beeinflussen auch hier die Strompreise die Vermeidungskosten. Aufgrund des geringeren Stromeinsatzes im Vergleich zur vollständigen Elektrifizierung sinken die Vermeidungskosten aber langsamer.

Wie Abbildung 40 zeigt, ist im Jahr 2030 ein um nahezu 40 % niedrigerer Strompreis als derzeit angesetzt notwendig, damit die Vermeidungskosten der Elektrifizierung niedriger liegen. Dagegen kann man Abbildung 41 entnehmen, dass im Jahr 2040 bereits eine Reduktion um etwas mehr als 20 % ausreichen würde, um die Rangfolge der Maßnahmen zu vertauschen. Ein relevanter Treiber dieser Entwicklung ist vor allem die Tatsache, dass 2040 im Klimaneutralitätspfad bereits vollständig Grünstrom eingesetzt wird. Die Elektrifizierung eines Ofens vermeidet also 2040 mehr Emissionen als 2030, da der angesetzte Emissionsfaktor des Stroms dann bereits null beträgt. 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.

14 Quelle: BDEW (2020)

## Sensitivität Wasserstoffpreis – Vergleich elektrischer Ofen und Wasserstoffofen

Auch der angesetzte Wasserstoffpreis treibt die Entwicklungen im Rahmen der Studie. Sollten sich die Rahmenbedingungen in diesem Bereich, gerade was den Transport angeht, allerdings nicht entsprechend entwickeln, sind auch noch höhere Wasserstoffpreise nicht ausgeschlossen. Die damit einhergehenden Auswirkungen sollten ebenfalls im Blick behalten werden. Abbildung 42 und Abbildung 43 zeigen die steigenden Vermeidungskosten der Wasserstoffvariante bei steigenden Preisen. Da Wasserstoff bei der Elektrifizierung keine Rolle spielt, bleibt der Vergleichswert konstant. Im Jahr 2030 erreichen die beiden Maßnahmen bei einer Preissteigerung des Wasserstoffs von etwa 20 % das gleiche Niveau hinsichtlich der Vermeidungskosten. 2040 dagegen wird die Elektrifizierung bereits bei 10 % Mehrkosten für den Wasserstoff zur wirtschaftlich attraktiveren Alternative. Dementsprechend ist absehbar, dass Investitionen in wasserstoffbasierte Lösungen erst dann getätigt werden können, wenn ein nachhaltig stabiles und konkurrenzfähiges Preisniveau für Wasserstoff garantiert ist.

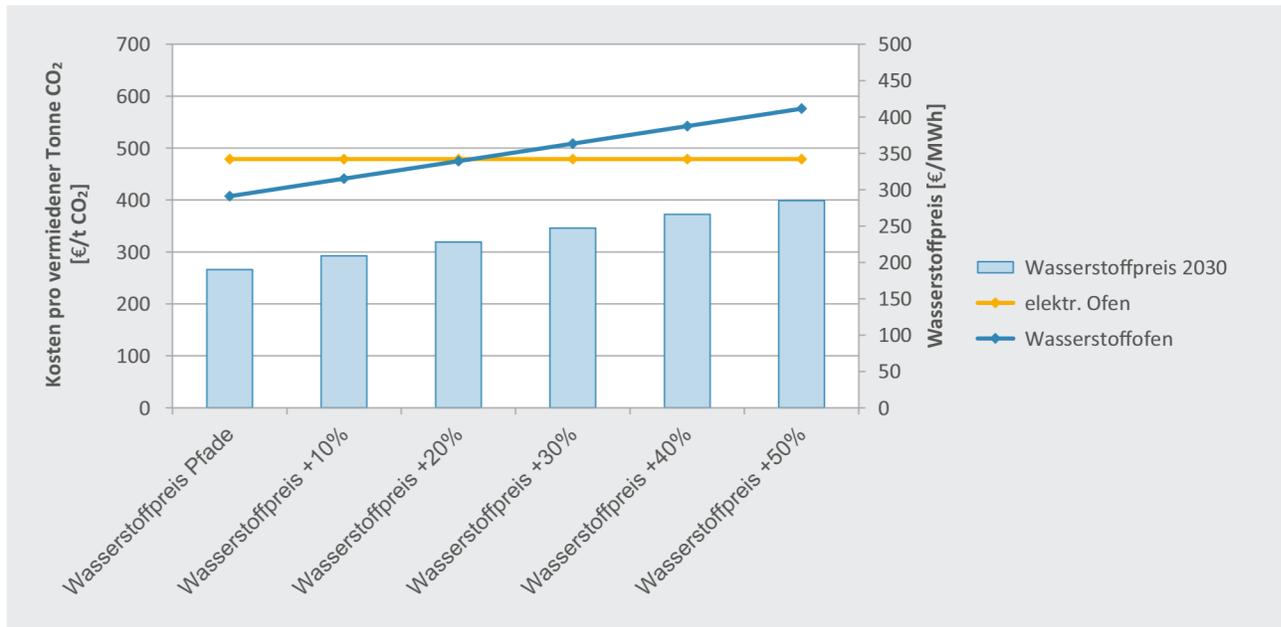


Abbildung 42: Vergleich der Vermeidungskosten von elektrischem Ofen und Wasserstoffofen – Sensitivität Wasserstoffpreis 2030

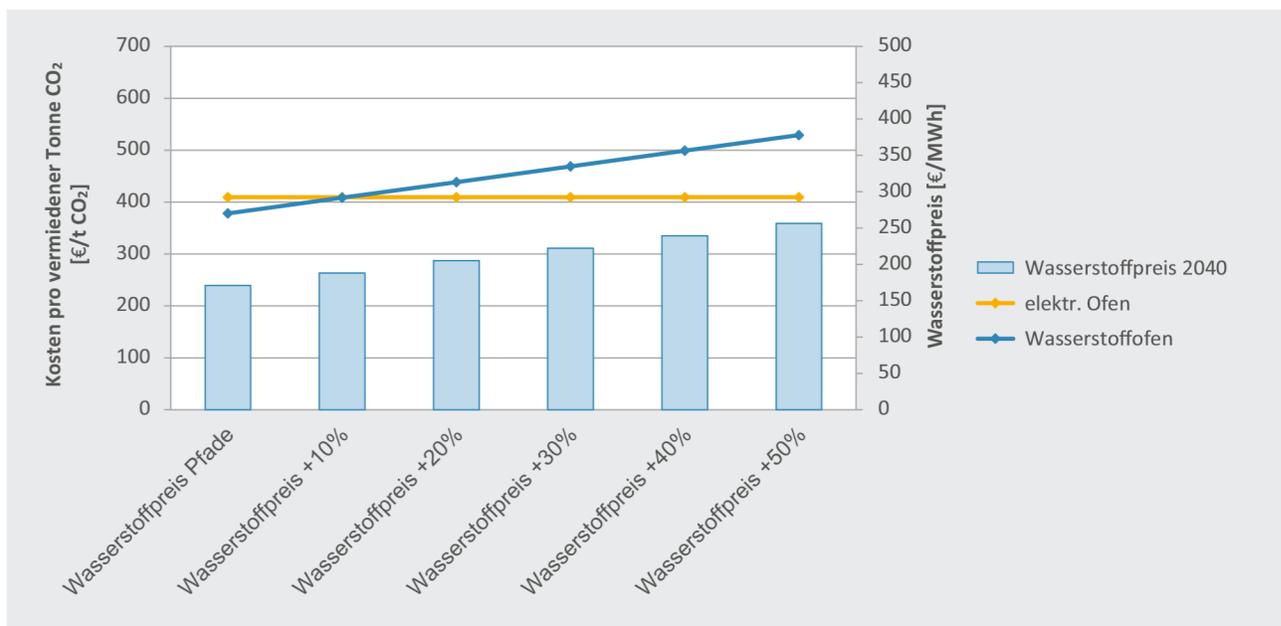


Abbildung 43: Vergleich der Vermeidungskosten von elektrischem Ofen und Wasserstoffofen – Sensitivität Wasserstoffpreis 2040

## Sensitivität Investitionsausgaben – Vergleich elektrischer Ofen und Wasserstoffofen

Als dritter externer Faktor werden noch die Investitionsausgaben beider Maßnahmen betrachtet. Da die Investitionsausgaben bei der Elektrifizierung deutlich höher liegen als bei der Wasserstoffvariante, liegen auch die Kapitalkosten höher. Sie machen auch einen größeren Anteil an den Gesamtkosten der Maßnahme aus als im Falle des Wasserstoffs. Wenn die Investitionsausgaben für beide Maßnahmen anteilig gleich reduziert werden, sinken daher die Vermeidungskosten bei der Elektrifizierung schneller, weshalb auch hier ein Schnittpunkt der beiden Graphen existieren muss. Eine Reduzierung der Investitionsausgaben ist auf der einen Seite durch positive, derzeit nicht vorhersehbare, Entwicklungen im Anlagenbau denkbar. Auf der anderen Seite spielen aber vor allem auch Fördermittel an dieser Stelle eine bedeutende Rolle, da sie, je nach Ausgestaltung, die nötige Gesamtinvestition des Unternehmens verringern können. Wie aus Abbildung 44 hervorgeht, ist 2030 eine Reduzierung der Investitionsausgaben um beinahe 30 % nötig, um die Reihung der Maßnahmen zu verändern. 2040 dagegen reicht bereits eine Verringerung der Investitionsausgaben um weniger als 20 % aus, um die Vermeidungskosten der Elektrifizierung unter die des Wasserstoffofens zu drücken. Das entspricht einer Förderquote von weniger als 25 %.

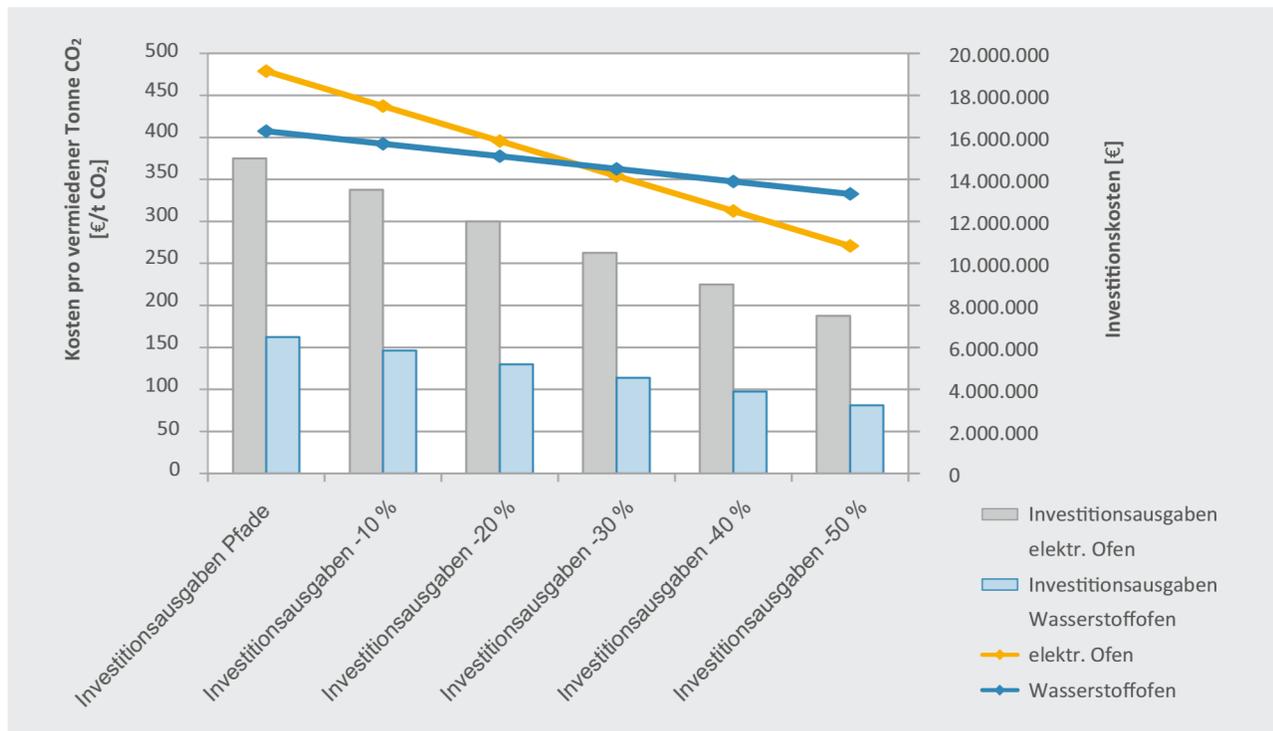


Abbildung 44: Vergleich der Vermeidungskosten von elektrischem Ofen und Wasserstoffofen 2030 – Sensitivität Investitionsausgaben

Die Betrachtung der Sensitivitäten zeigt, dass externe Faktoren wichtige Einflüsse auf die Minderungsmaßnahmen der Ziegelindustrie 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.

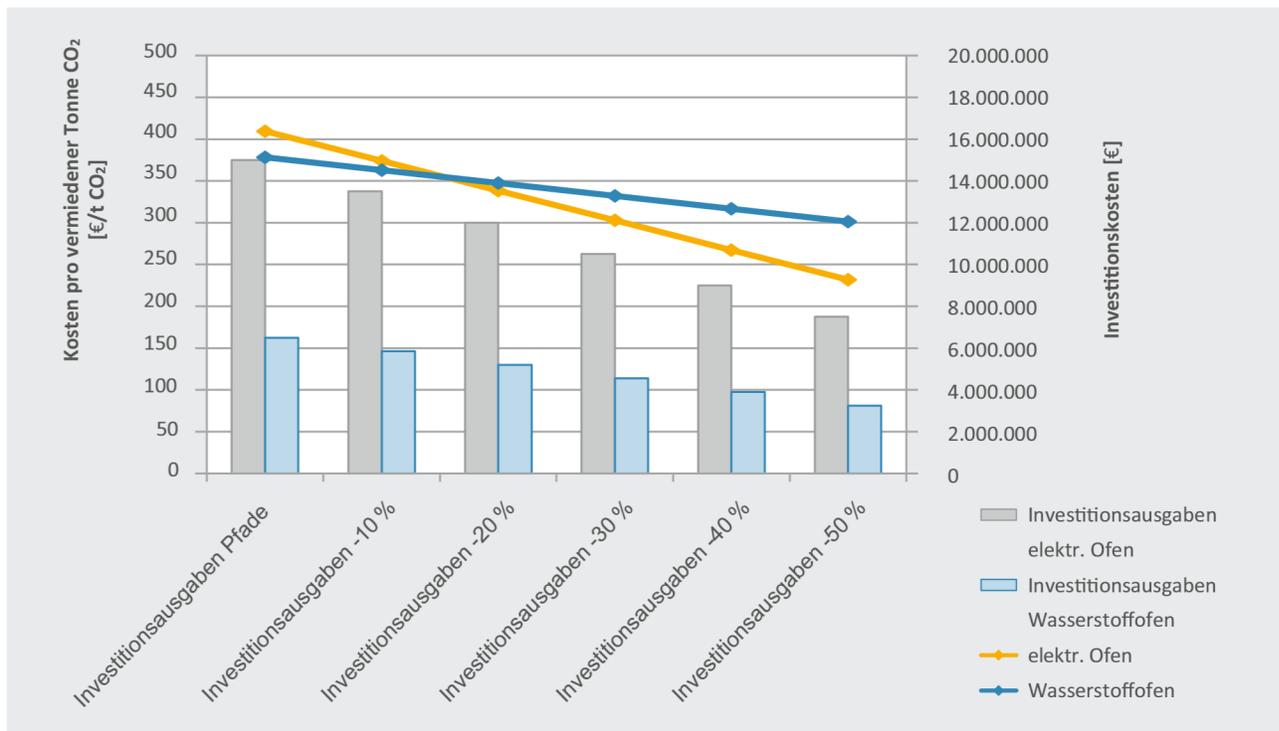


Abbildung 45: Vergleich der Vermeidungskosten von elektrischem Ofen und Wasserstoffofen 2040 – Sensitivität Investitionsausgaben

## 9.6 Wesentliche Erkenntnisse

Eine bis 2050 treibhausgasneutrale Ziegelindustrie in Deutschland ist möglich, und auch bis 2030 können bereits relevante Minderungen erfolgen. Die dafür nötigen Maßnahmen sind im Wesentlichen bereits heute bekannt und eine Umsetzung bis zum Zieljahr ist zumindest technisch denkbar. Die wesentlichen Treiber hinter der Entwicklung sind die bereits genannten Maßnahmen an Öfen und Trocknern und der damit einhergehende Wechsel von Erdgas auf Wasserstoff und Strom, sowie der Wechsel auf Rohstoffe ohne fossilen Kohlenstoff und Karbonate. Die Entscheidung für bestimmte Technologien hängt allerdings stark von externen Faktoren wie Energiekosten ab. Darüber hinaus geht die Klimaneutralität mit massiven Kostensteigerungen einher. Investitionsseitig müssen 48,8 Mio. €/a an zusätzlichem Budget bereitgestellt werden, um die notwendigen Maßnahmen ergreifen zu können. Unter Einbeziehung geeigneter Fördermechanismen ist das Aufbringen dieser Mittel noch denkbar. Allerdings ist das wesentliche Hemmnis für die Umsetzung der meisten Maßnahmen deren mangelnde wirtschaftliche Rentabilität. Dies zeigt sich bei den explodierenden energiebezogenen Kosten, die im Betrachtungszeitraum von 268,17 Mio. €/a auf über 900 Mio. €/a ansteigen und sich damit mehr als verdreifachen.

Besonders der direkte Vergleich mit dem Umsatz der Ziegelindustrie, der in den vergangenen Jahren bei etwa 1,5 bis 1,6 Mrd. €/a lag, macht die gravierenden Folgen deutlich. Die im Rahmen der Roadmap betrachteten Kostensteigerungen belaufen sich in Summe auf über 40 % des aktuellen Umsatzes. Wenn nicht anderweitig relevante Kosteneinsparungen erzielt werden können, von denen aktuell nicht auszugehen ist, muss der Umsatz entsprechend gesteigert werden, um die derzeitige Profitabilität halten zu können. Da eine der Grundannahmen der Roadmap eine konstante Produktion ist, ist dies gleichbedeutend mit einer notwendigen Preissteigerung (bei gleichbleibendem Deckungsbeitrag) von mehr als 40 %. Es ist zwar davon auszugehen, dass ein Teil der Verbraucher bereit ist, Mehrkosten für emissionsfreie Produkte in Kauf zu nehmen, aber dass das in diesem Umfang geschieht, darf zumindest bezweifelt werden. Eine klimaneutrale Ziegelindustrie ist daher nur vorstellbar, wenn zum einen geeignete Rahmenbedingungen geschaffen werden, die eine kostengünstige und effiziente Transformation erlauben, und zum anderen Emissionen von Konkurrenzprodukten entsprechend bepreist werden. Je früher Investitionsicherheit für bestimmte Minderungsmaßnahmen gegeben ist, desto früher lassen sich die Emissionen reduzieren.

## 9.7 Steckbrief Klimaneutralitätspfad (Pfad 3)

Klimaneutralitätspfad (Pfad 3)	
<p><b>Beschreibung Maßnahmen</b></p>	<p>Maßnahmen Pfad 1:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>kontinuierliche Effizienzsteigerung beim Einsatz von Strom und Erdgas</li> <li>Reduktion Emissionsfaktoren Strom und Erdgas</li> </ul> <p>Zusätzliche Maßnahmen (nicht abschließend):</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Entkopplung Ofen-Trockner-Verbund in Verbindung mit Wärmepumpe und Tunnelöfen mit Wasserstoffbeheizung</li> <li>elektrischer Ofen</li> <li>Einsatz biogener Porosierungsmittel</li> <li>alternativer Rohstoff Ton HMZ/VMZ/DZ</li> </ul>
<p><b>Emissionsentwicklung bis 2030:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Senkung auf 0,8 Mio. t CO<sub>2</sub></li> </ul> <p><b>Emissionsentwicklung bis 2050:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Senkung auf 0,0 Mio. t CO<sub>2</sub></li> <li>zusätzlich 1,3 Mio. t CO<sub>2</sub> Minderung gegenüber Referenzpfad</li> </ul>	<p>CO<sub>2</sub>-Emissionen [t/a]</p> <p>2020 2022 2024 2026 2028 2030 2032 2034 2036 2038 2040 2042 2044 2046 2048 2050</p> <p>■ Prozessemissionen Ton ■ Prozessemissionen Porosierung ■ Emissionen Energieträger</p>
<p><b>Wesentliche Einflussfaktoren auf Emissionsentwicklung:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Effizienzsteigerung durch die Entkopplung des Ofen-Trockner-Verbunds</li> <li>Ersatz Erdgas durch Wasserstoff und Strom</li> <li>Austausch Rohstoffe</li> </ul>	
<p><b>Kostenentwicklung (energiebezogen):</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>mittlere Kosten Ø 2021–2050: 515 Mio. €/a</li> <li>Kosten Zieljahr 2050: 919 Mio. €</li> <li>zusätzliche 516 Mio. €/a gegenüber Referenzpfad</li> <li>Gesamtinvestitionsausgaben: 2.345 Mio. €</li> <li>Gesamtinvestitionsausgaben spezifische Maßnahmen: 1.465 Mio. €</li> <li>mittlere Investitionsausgaben spezifische Maßnahmen: 48,8 Mio. €/a</li> </ul>	<p>Kosten [€/a]</p> <p>2020 2022 2024 2026 2028 2030 2032 2034 2036 2038 2040 2042 2044 2046 2048 2050</p> <p>■ CO<sub>2</sub>-Kosten ■ Kosten Energieträger ■ Kapitalkosten ■ Betriebskosten</p>
<p><b>Wesentliche Einflussfaktoren auf Kostenentwicklung:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Betriebskosten v. a. für alternative Tone ab 2049</li> <li>Kapitalkosten für Maßnahmen</li> <li>Energiepreise</li> </ul>	
<p><b>Wesentliche Hemmnisse:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>hohe Vermeidungskosten i. V. m. zumindest fraglichem Carbon-Leakage-Schutz</li> <li>massiver Investitionsbedarf unter unsicheren Rahmenbedingungen</li> </ul>	

Tabelle 9: Steckbrief Klimaneutralitätspfad (Pfad 3)

## 10 Gegenüberstellung der Ergebnisse

	Kosten [Mio. €/a]			Invest. [Mio. €] <sup>15</sup>	Invest. spez. Maßnahmen [Mio. €] <sup>16</sup>	CO <sub>2</sub> -Emissionen [Mio. t/a]		
	Basis	Ø 2021–2050	2050	kumuliert	kumuliert	Basis	Ø 2021–2050	2050
Referenzpfad	268	340	403	881	0	1,7	1,5	1,3
Technologiepfad	268	364	441	1.733	852	1,7	1,0	0,5
Pfad 3a (ohne alternative Tonrohstoffe)	268	452	592	2.184	1.303	1,7	0,8	0,2
Klimaneutralitätspfad	268	515	919	2.345	1.465	1,7	0,7	0,0

Tabelle 10: Gegenüberstellung der Ergebnisse der Pfade

Unter den gegebenen Parametern ist der Technologiepfad mit signifikanten Mehrkosten gegenüber dem Referenzpfad verbunden. Er führt jedoch zu deutlich höheren Einsparungen. Förderungen können den Verlauf beschleunigen und die Wirtschaftlichkeit erhöhen.

Auch der Investitionsmehrbedarf des Klimaneutralitätspfads gegenüber dem Technologiepfad bewegt sich überwiegend im Rahmen vorstellbarer Förderquoten insbesondere unter Berücksichtigung des KMU-Status vieler Unternehmen der Branche. Jedoch werden die Kosten bezüglich der Erzwingung von Nullemissionen bei einem relevanten Teil der prozessbedingten Emissionen sehr hoch.

### 10.1 Treibhausgasminderung

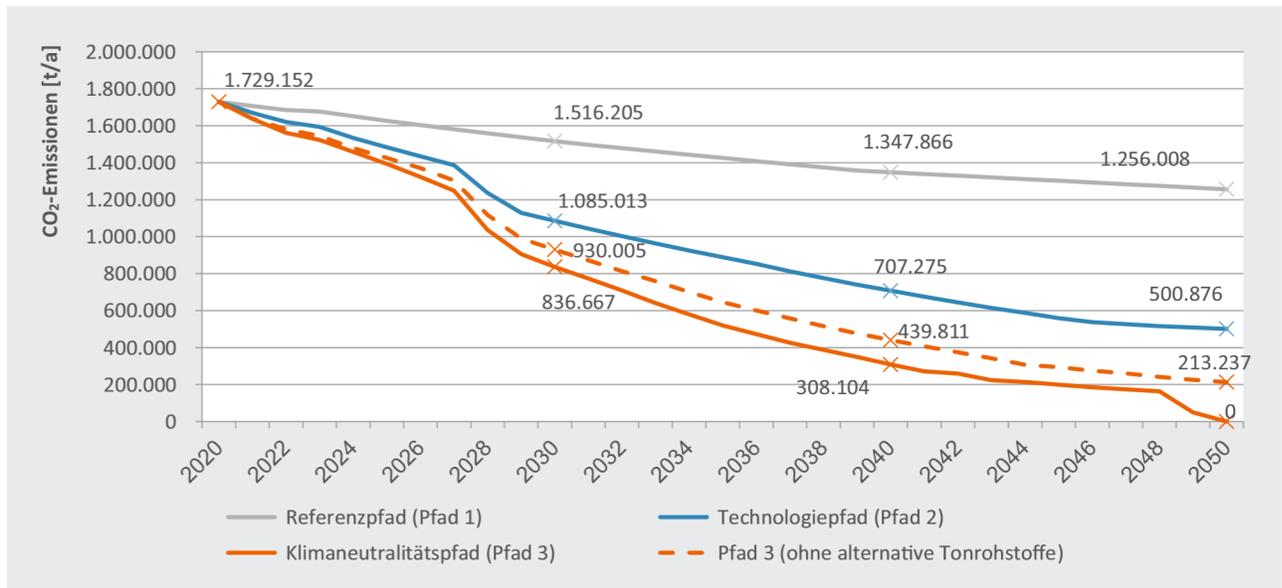


Abbildung 46: Entwicklung der CO<sub>2</sub>-Emissionen bis 2050 – Gegenüberstellung aller drei Pfade

Abbildung 46 zeigt die Entwicklung der Treibhausgasemissionen für die betrachteten Transformationspfade im direkten Vergleich. Im Referenzpfad erfolgt eine stetige, aber langsame Reduktion. Die anderen Pfade folgen grundsätzlich alle einem ähnlichen Verlauf, wobei die Linien etwas verschoben zueinander sind. Dies ist vor allem auf die unterschiedlich ambitionierten Investitionsbudgets zurückzuführen. Zu Beginn erfolgt in allen drei Varianten eine vor allem energiewirtschaftlich getriebene starke Reduktion der Emissionen, die 2028 in einen noch steileren Abfall mündet. Dieser ist auf den Einsatz biogener Porosierungs-

<sup>15</sup> Dies sind die energiebezogenen Investitionen für spezifische Maßnahmen und Effizienzsteigerungen.

<sup>16</sup> Der Begriff „spezifische Maßnahmen“ umfasst u. a. die Umrüstung oder den Austausch von Öfen und Trocknern. Eine umfassende Liste der Maßnahmen befindet sich im Anhang.

mittel zurückzuführen. Danach erfolgen weitere starke Emissionsreduktionen. Mit zunehmendem zeitlichem Verlauf gehen die Reduktionen allerdings deutlich zurück und die Kurven flachen ab. Im Klimaneutralitätspfad erfolgt in den letzten beiden Jahren dann noch eine rapide Reduktion der übrigen Prozessemissionen.

## 10.2 Investitionsbedarf

Wie in Tabelle 10 aufgeführt, fallen im Betrachtungszeitraum relevante Investitionen an, die nötig sind, um die beschriebenen Emissionsminderungen zu erzielen. Dabei ist zu erwarten, dass die Investitionen in spezifische Maßnahmen zusätzlich zu den ohnehin notwendigen Investitionen der Ziegelindustrie zu leisten sind, bei denen mindestens von einem gleichbleibenden Niveau ausgegangen wird. Für den Technologiepfad ergibt sich damit bereits ein kumulierter Mehrbedarf von 852 Mio. € über den gesamten Zeitraum. Im Klimaneutralitätspfad steigt der Mehrbedarf auf 1.465 Mio. € an. Falls Residualemissionen aus dem Toneinsatz zugelassen sind, mindert sich der Bedarf etwas auf 1.303 Mio. €. Hier 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.

## 10.3 Energiebezogene Kosten

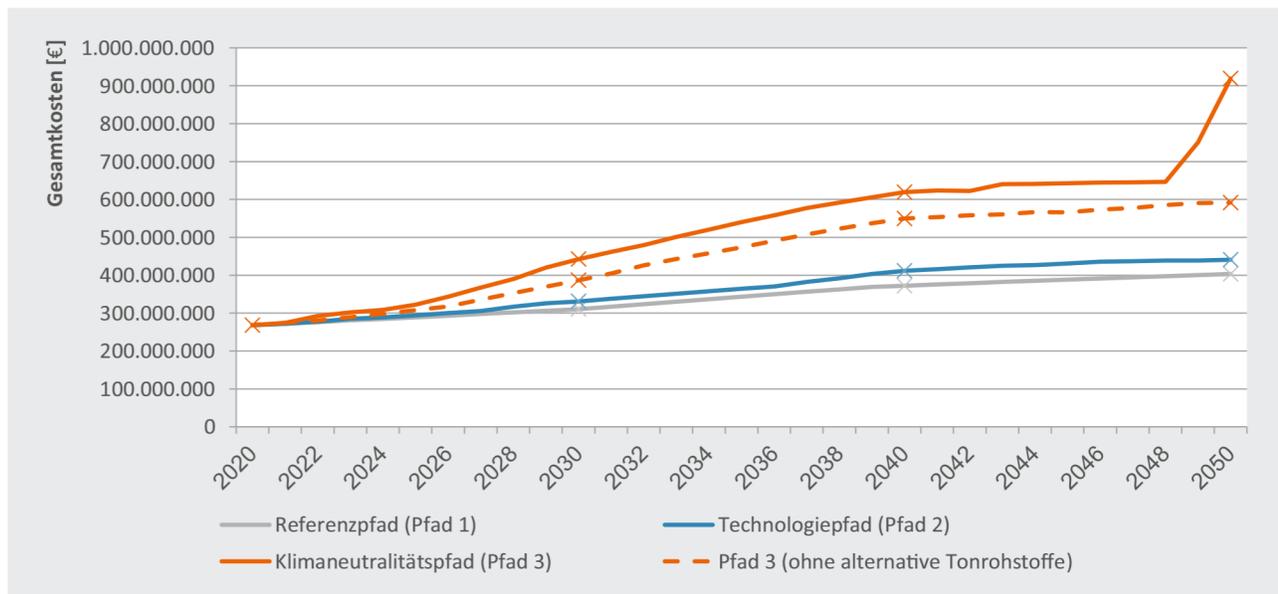


Abbildung 47: Entwicklung der jährlichen energiebezogenen Kosten bis 2050 – Gegenüberstellung aller drei Pfade

In Abbildung 47 ist die Entwicklung der energiebezogenen Kosten für die betrachteten Pfade dargestellt. Enthalten sind die Kosten für die eingesetzten Energieträger, die CO<sub>2</sub>-Kosten, sowie die Kapital- und Betriebskosten. Bereits im Referenzpfad steigen die im Scope der Roadmap enthaltenen Gesamtkosten um etwa 50 % gegenüber dem Ausgangswert an. Der Technologiepfad hebt sich vom Referenzpfad im Laufe der Zeit etwas ab und führt insgesamt zu spürbaren Mehrkosten gegenüber diesem. In Hinblick auf die Wirtschaftlichkeit und Konkurrenzfähigkeit der heimischen Ziegelproduktion ist natürlich auch an dieser Stelle der Vergleich mit der heutigen Situation relevant. Hierauf bezogen sind die Kostensteigerungen erheblich. Die Kosten des Klimaneutralitätspfades setzen sich ab Mitte der 2020er-Jahre deutlich von den anderen Pfaden ab und steigen zum Ende sprunghaft an. Gerade dieser letzte Anstieg ist durch die immensen Betriebskosten zur Reduzierung der Prozessemissionen aus dem Ton bedingt. Ohne diese Maßnahmen liegt der Verlauf gerade im Zieljahr deutlich näher am Technologiepfad. Die zusätzlichen Kosten stehen in Zusammenhang mit Emissionsminderungsmaßnahmen an den Öfen, die im Technologiepfad aus Kostengründen nicht umgesetzt werden: Der Einsatz von mit Wasserstoff befeuerten oder in geringerem Umfang elektrisch betriebenen Öfen führt zu noch einmal deutlich erhöhten Energie- und Kapitalkosten im Vergleich zum Technologiepfad, die durch die reduzierten CO<sub>2</sub>-Kosten nicht aufgefangen werden können.

## 11 Schlussfolgerungen und Handlungsbedarf

Die deutsche Ziegelindustrie wird mit Blick auf die aktuellen und zu erwartenden Rahmenbedingungen im Zuge der weiteren Ausgestaltung des Green Deals in der EU ambitionierte Maßnahmen ergreifen müssen, um den Ausstoß an Treibhausgasen weiter zu reduzieren. Wie bereits der Referenzpfad trotz der dort veranschlagten energetischen Optimierungen aufzeigt, muss die Ziegelindustrie dies im Spannungsfeld deutlich steigender Kosten leisten. Über den Referenzpfad hinaus bestehen relevante Minderungspotenziale durch das Ergreifen spezifischer Maßnahmen zur Reduktion der Emissionen. Mit einem ambitionierten Investitionsvorhaben lassen sich die Treibhausgasemissionen im Technologiepfad bereits auf weniger als ein Drittel des aktuellen Werts von 1,7 Mio. t CO<sub>2</sub>/a reduzieren. Allerdings ist unter den getroffenen Annahmen der Großteil der notwendigen Maßnahmen noch nicht wirtschaftlich.

Um das langfristige Ziel einer klimaneutralen Ziegelproduktion in Deutschland zu erreichen, sind gegenüber dem Technologiepfad noch einmal deutlich höhere Investitionen nötig, um auch die Emissionen aus der Befeuerung der Öfen und den eingesetzten Tonen vollständig zu reduzieren. Die dafür notwendigen Maßnahmen liegen derzeit noch weiter von der wirtschaftlichen Machbarkeit entfernt..

### 11.1 Relevante Maßnahmen

Die Ziegelindustrie verfügt über verschiedene Handlungsoptionen, um Emissionen zu reduzieren. Unter den der Roadmap zugrunde liegenden Annahmen kristallisieren sich einige Maßnahmen heraus, die die Transformation der Ziegelindustrie maßgeblich bestimmen. Da Änderungen bei bestimmten Einflussfaktoren erhebliche Auswirkungen auf die Vermeidungskosten einzelner Maßnahmen haben können, sind möglichst stabile Rahmenbedingungen Voraussetzung für eine kosteneffiziente Transformation.

Die relevantesten Maßnahmen sind:

- **Entkopplung des Ofen-Trockner-Verbunds:** Durch die Entkopplung sind energetische Optimierungen am Ofen möglich, die dort zu erheblichen Einsparungen beim Energieeinsatz führen. Darüber hinaus wird dadurch der Einsatz von Wärmepumpen beim Trockner ermöglicht.
- **Einsatz von Hochtemperaturwärmepumpen:** Der Einsatz von hocheffizienten Wärmepumpen reduziert den Energieeinsatz an den Trocknern erheblich. Durch den

Einsatz von Strom aus regenerativen Quellen gelingt darüber hinaus der Wechsel auf einen emissionsfreien Energieträger.

- **Wasserstoffbefeuerte Öfen:** Der Brennstoffwechsel auf Wasserstoff, der emissionsfrei produziert wurde, reduziert die übrigen Emissionen aus dem Energieeinsatz im Ofen.
- **Elektrische Öfen:** Auch die komplette Elektrifizierung des Herstellungsprozesses bei Einsatz von Grünstrom ist ein relevantes Mittel zur Reduzierung der Emissionen.
- **Einsatz biogener Porosierungsmittel:** Durch den Wechsel auf Zuschlagstoffe ohne fossilen Kohlenstoffgehalt gelingt es, die entsprechenden Prozessemissionen zu mindern.

Darüber hinaus kommen noch eine Vielzahl an Optimierungsmaßnahmen zum Tragen, die entweder direkt den Energieeinsatz reduzieren oder durch verringerten Materialbedarf die Prozessemissionen mindern und gegebenenfalls darüber hinaus auch den Energiebedarf senken.

Des Weiteren ist der **Einsatz von alternativen Tonen** ohne fossilen Kohlenstoff und Karbonate, also kalkfreien Tonen, derzeit die einzig denkbare Alternative zur vollständigen Reduktion der Prozessemissionen.

### 11.2 Kosten

Die jährlichen energiebezogenen Kosten steigen bis 2050 bereits im Referenzpfad um ca. 50 % gegenüber dem Basiszeitraum an. Im Technologiepfad liegen sie noch etwas darüber. Der Klimaneutralitätspfad führt sogar zu Mehrkosten von über 240 % gegenüber dem Ausgangswert. Ein Großteil davon entfällt auf die Betriebskosten zur Reduzierung der Prozessemissionen aus den eingesetzten Tonen.

Trotz der angenommenen relevanten CO<sub>2</sub>-Preissteigerungen liegt eine deutliche Kostendifferenz vor, die Investitionsentscheidungen in Richtung Klimaneutralität aus ökonomischen Gesichtspunkten erheblich erschwert.

### 11.3 Externe Rahmenbedingungen

Durch die Anpassung externer Rahmenbedingungen kann es gelingen, die immensen Kostennachteile des Klimaneutralitätspfades auszugleichen oder zumindest abzumildern. Im Rahmen der Roadmap wurden einige Aspekte als besonders relevant identifiziert:

- **Wasserstoff:** Die Verfügbarkeit von bezahlbarem und emissionsfrei erzeugtem Wasserstoff ist entscheidend, um die Emissionen aus der Befeuerung der Öfen zu reduzieren. Es gilt, die entsprechenden Herstellungskapazitäten aufzubauen und die notwendige Infrastruktur zu schaffen. Die Kosten für die verbrauchenden Unternehmen müssen konkurrenzfähig werden, was insbesondere auch bei der Abgabenbelastung künftig zu berücksichtigen ist. Die deutsche Ziegelindustrie benötigt 2050 etwa 1,0 TWh grünen Wasserstoff, um unter den betrachteten Bedingungen klimaneutral zu werden. Diese Menge müsste entsprechend bereitgestellt werden.
- **Strompreis:** Die Entwicklung des Strompreises hat einen wesentlichen Einfluss auf die Kostenentwicklung und auch einzelne Investitionsentscheidungen. Unter Umständen wäre hier sogar eine vollständige Verdrängung des Wasserstoffeinsatzes denkbar. Derzeit liegen die Beschaffungskosten der Ziegelindustrie auch wegen Netzentgelten und bestimmten Abgaben über den Kosten für andere Branchen. Eine Anpassung der Rahmenbedingungen, die zu dieser erhöhten Kostenbelastung führen, ist entscheidend, um die Minderungsmaßnahmen zur wirtschaftlichen Umsetzbarkeit zu führen. Langfristig stabile und bezahlbare Preise für regenerativ erzeugten Strom sind damit eine Voraussetzung zur nachhaltigen Senkung der Emissionen. Im modellierten Klimaneutralitätspfad hat die Branche 2050 einen Grünstrombedarf von etwas weniger als 1,4 TWh.
- **Genehmigungsverfahren:** Die Genehmigungsverfahren müssen vor dem Hintergrund der in dieser Roadmap beschriebenen technischen Maßnahmen deutlich beschleunigt werden. Dies betrifft beispielsweise Verfahren des Bundesimmissionsschutzgesetzes sowie Planfeststellungsverfahren in etwa für die Genehmigung von Tongruben. Andernfalls können die anlagen- und rohstoffbezogenen Maßnahmen ggf. nicht schnell genug umgesetzt werden.
- **Investitionsausgaben:** Der Mehrbedarf an Investitionsmitteln stellt die Ziegelbranche vor große Herausforderungen auf dem Weg zur Treibhausgasneutralität, insbesondere da Entwicklungen wie steigende CO<sub>2</sub>-Kosten den finanziellen Spielraum der betroffenen Unternehmen weiter einschränken. Geeignete Fördermechanismen und stabile Rahmenbedingungen, die Investitionssicherheit geben, sind daher nötig, um die Transformation voranzutreiben. Darüber hinaus können zielgerichtete Fördermechanismen und attraktive Investitionsbedingungen dazu beitragen, die ambitionierten Investitions-

vorhaben in die Tat umzusetzen und auch insgesamt die Wirtschaftlichkeit der Maßnahmen zu erhöhen. Insbesondere vor dem Hintergrund der überwiegend mittelständischen Prägung der Branche sind Fördermechanismen auch ein wichtiges Mittel, um etwaige Nachteile beim Zugang zum Kapitalmarkt auszugleichen. Dies gilt bereits für den Technologiepfad und umso mehr für den nachfolgenden Klimaneutralitätspfad. Für einige der genannten Maßnahmen bieten sich bestehende Förderinstrumente an, insbesondere Investitionsförderungen. Diese können auch zu einer schnelleren Umsetzung von Maßnahmen als hier angenommen beitragen. Sehr relevant zur Emissionsreduktion und auch zur Energie-wende beitragende Maßnahmen der Ziegelindustrie benötigen noch Pilotierungen und Demonstrationsvorhaben. Einige Maßnahmen – zum Beispiel zur Reduktion prozessbedingter Emissionen durch alternative Tone – benötigen noch FuE-Unterstützung. Abhängig von der Entwicklung relevanter Kostenparameter, wie etwa Preise für Strom oder klimaneutrale Brennstoffe, kann gerade im Zusammenhang mit der Markteinführung komplett neuer Technologien und Verfahren auch Bedarf für eine Deckung operativer Mehrkosten bestehen, wie es beispielsweise im Innovationsfonds der EU bereits angelegt ist und auch im Zusammenhang mit den nachfolgend kurz erörterten „Carbon Contracts for Difference“ u. a. für die Zementproduktion diskutiert wird.

- **CO<sub>2</sub>-Preis:** Im Referenzpfad wird die Kostenentwicklung wesentlich durch die steigenden CO<sub>2</sub>-Preise getrieben. Diese Entwicklung federt die Kostennachteile der weiteren Pfade im Verhältnis dazu etwas ab. Dennoch ist auch der hinterlegte Preisanstieg auf 100 €/EUA bei Weitem nicht ausreichend, um die wirtschaftlichen Nachteile im Klimaneutralitätspfad auszugleichen. Verschärfende Vorgaben im EU ETS könnten den Preis über dieses Niveau ansteigen lassen, was allerdings unter Umständen mit negativen Auswirkungen auf die Investitionsspielräume der Unternehmen einhergeht. Darüber hinaus ist es in solch einem Fall unerlässlich, dass die internationale Wettbewerbsfähigkeit der Industrie nicht gefährdet wird, wie unter dem Punkt Carbon-Leakage-Schutz ausgeführt wird. Ein kurzfristiges Instrument zur Überbrückung der Differenz zwischen tatsächlichem CO<sub>2</sub>-Preis und den für bestimmte Investitionen erforderlichen CO<sub>2</sub>-Preisen könnte in dem aktuell diskutierten Instrument Carbon Contracts for Difference (CCfD) bestehen. Die Vermeidungskosten einiger relevanter Maßnahmen liegen etwa im Bereich zwischen 100 und 300 €/t CO<sub>2</sub>.



Abbildung 48: Luftansicht eines Ziegelwerkes; Quelle: JUWÖ Poroton-Werke Ernst Jungk & Sohn GmbH

Ein CcFd könnte die Differenz zwischen den insbesondere im EU-Emissionshandel bestehenden CO<sub>2</sub>-Preisen – und damit den für einen Ziegelhersteller relevanten CO<sub>2</sub>-Kosten – und den Vermeidungskosten in Form einer vertraglich für eine Laufzeit definierten Ausgleichszahlung kompensieren und so die notwendigen Investitionen wirtschaftlich absichern. Je nach Ausgestaltung eines CcFd kann sich diese Zahlung auf Kostendifferenzen bei Kapitalkosten (CAPEX) oder operativen Kosten (OPEX) oder beides beziehen.<sup>17</sup>

- Carbon-Leakage-Schutz:** Die deutsche Ziegelindustrie steht in direktem auch internationalem Wettbewerb zu anderen Baustoffen. Einige dieser Baustoffe werden unter Umständen in Ländern produziert, in denen keine entsprechend strenge CO<sub>2</sub>-Bepreisung erfolgt und können daher kostengünstig, aber mit hohen Emissionen hergestellt werden. Wenn die deutsche Ziegelindustrie infolge der hiesigen klimapolitischen Rahmenbedingungen Anstrengungen zur Erreichung der Treibhausgasneutralität unternimmt, führen die steigenden Kosten zu einer sinkenden internationalen Wettbewerbsfähigkeit.

Ohne geeigneten Carbon-Leakage-Schutz kann das zu einem Abwandern der Produktion in Gegenden mit weniger ambitionierten Klimaschutzvorhaben führen und damit global gesehen die Emissionen sogar erhöhen. Es gilt daher, entweder entsprechende Rahmenbedingungen zu schaffen, damit die heimische Produktion auf dem aktuellen Niveau wettbewerbsfähig bleibt. Oder Baustoffe, deren Emissionen bei der Produktion nicht unter vergleichbar strenge Bepreisungsmechanismen fallen, müssen mit einem entsprechenden Preisaufschlag versehen werden.

Wie durch die Sensitivitätsbetrachtungen verdeutlicht, können Veränderungen bei den externen Rahmenbedingungen, etwa den Energiepreisen oder den Investitionsausgaben, spürbare Auswirkungen auf die Attraktivität einzelner Minderungsmaßnahmen haben. Um einen kosteneffizienten Weg zur Treibhausgasneutralität beschreiten zu können, müssen die dafür notwendigen Rahmenbedingungen sobald wie möglich geschaffen und ein Fortbestehen garantiert werden. Nur dann haben Unternehmen die nötige Investitionssicherheit, um die notwendige, aber auch tiefgreifende Transformation voranzutreiben.

<sup>17</sup> Kurzdarstellung des Instruments siehe: Agora Energiewende und Wuppertal Institut (2019): Klimaneutrale Industrie: Schlüsseltechnologien und Politikoptionen für Stahl, Chemie und Zement. Berlin, November 2019. Abrufbar unter: [www.agora-energiewende.de](http://www.agora-energiewende.de), S. 110 ff.

## 12 Anhang

### 12.1 Emissionsfaktoren

	Emissionsfaktor Startwert 2020	Quelle	Bemerkung
Strom	405,8 kg CO <sub>2</sub> /MWh	DECHEMA-Berechnung	
Erdgas	0,056 t CO <sub>2</sub> /GJ	DEHSt 2020: Leitfaden zur Erstellung von Überwachungsplänen 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 <sub>2</sub> /GJ bis 2050 (= jährliche Reduktion durch steigenden Anteil von erneuerbaren Energien von rund 0,57 %/a).
Synthesegas	–		Nutzung von klimaneutralem Gas
Wasserstoff	–		Nutzung von klimaneutralem Gas

Tabelle 11: Für die Modellierung verwendete Emissionsfaktoren

### 12.2 Energiepreise

	Wert	Quelle	Bemerkung
Erdgas	27,35 €/MWh	European Commission (2018): Composition and Drivers of Energy Prices and Costs; Table 16	Mittelwert 2014–2017 (2018 nicht verfügbar), ohne Energiesteuer
Strom	70,01 €/MWh	BDEW (2020): Strompreisanalyse Januar 2020, S. 25	Mittelwert 2014–2018 der Beschaffungskosten bereinigt um den CO <sub>2</sub> -Anteil im Strompreis (Annahme: preissetzendes Grenzkraftwerk: Steinkohle), ohne Umlagen
Grünstrom	72,51 €/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
biogener Festbrennstoff	45,50 €/MWh	DEPI (2020): Pelletpreis/ Wirtschaftlichkeit	aktueller Pelletpreis (Stand: Oktober 2020)

Tabelle 12: Annahmen zu den für die Modellierung verwendeten Energiepreisen

### 12.3 Annahmen zur Entwicklung von Emissionsfaktoren sowie zu Preisentwicklungen

	Emissionsfaktor Strommix [kg CO <sub>2</sub> /MWh]	Emissionsfaktor Erdgas [t CO <sub>2</sub> /GJ]	EUA Preis [€/EUA]	Synthesegas Preis [€/MWh]	Wasserstoff Preis [€/MWh]
<b>2020</b>	<b>405,8</b>	<b>0,056</b>	<b>25,00</b>	<b>332,00</b>	<b>219,00</b>
2021	397,3	0,056	26,50	327,60	216,10
2022	388,7	0,055	28,00	323,20	213,20
2023	399,2	0,055	29,50	318,80	210,30
2024	380,3	0,055	31,00	314,40	207,40
2025	361,3	0,054	32,50	310,00	204,50
2026	342,1	0,054	34,00	305,60	201,60
2027	322,6	0,054	35,50	301,20	198,70
2028	302,9	0,053	37,00	296,80	195,80
2029	282,9	0,053	38,50	292,40	192,90
<b>2030</b>	<b>262,8</b>	<b>0,053</b>	<b>40,00</b>	<b>288,00</b>	<b>190,00</b>
2031	245,6	0,053	43,00	284,90	188,10
2032	228,2	0,052	46,00	281,80	186,20
2033	210,6	0,052	49,00	278,70	184,30
2034	192,8	0,052	52,00	275,60	182,40
2035	174,8	0,051	55,00	272,50	180,50
2036	156,4	0,051	58,00	269,40	178,60
2037	137,7	0,051	61,00	266,30	176,70
2038	118,9	0,051	64,00	263,20	174,80
2039	99,8	0,050	67,00	260,10	172,90
<b>2040</b>	<b>92,5</b>	<b>0,050</b>	<b>70,00</b>	<b>257,00</b>	<b>171,00</b>
2041	83,7	0,050	73,00	254,60	169,60
2042	74,9	0,049	76,00	252,20	168,20
2043	66,0	0,049	79,00	249,80	166,80
2044	56,9	0,049	82,00	247,40	165,40
2045	47,7	0,049	85,00	245,00	164,00
2046	38,4	0,048	88,00	242,60	162,60
2047	29,0	0,048	91,00	240,20	161,20
2048	19,5	0,048	94,00	237,80	159,80
2049	9,8	0,047	97,00	235,40	158,40
<b>2050</b>	<b>0,0</b>	<b>0,047</b>	<b>100,00</b>	<b>233,00</b>	<b>157,00</b>

Tabelle 13: Annahmen zur Entwicklung des Emissionsfaktors für den Strommix und Erdgas sowie zu der Preisentwicklung EUA, Synthesegas und Wasserstoff<sup>18</sup>

### 12.4 Annahmen zur Wirtschaftlichkeitsberechnung

		Quelle	Bemerkung
Abschreibungszeitraum	20 a	AfA-Tabelle	Mittelwert aus AfA-Liste für Ziegelindustrie
Diskontsatz	8 %		Realistischer Diskontsatz

Tabelle 14: Annahmen zu Abschreibungszeitraum und Diskontsatz

18 Quellen: siehe Tabelle 9 und Tabelle 10; Synthesegas- und Wasserstoffpreise: Die Jahre ohne Preisangaben wurden berechnet.

## 12.5 Annahmen zu den technischen Maßnahmen zur Emissionsreduktion

Die folgenden Angaben basieren auf Annahmen in Abstimmung mit dem Begleitkreis der Studie.

Maßnahme	Betriebskosten [€/a]
Ofen (konventionell)	200.000 €/a
Trockner (konventionell)	150.000 €/a

Tabelle 15: Annahmen zu den Betriebskosten eines durchschnittlichen Ofens und Trockners – Status quo

Nr.	Maßnahme	Investitions- ausgaben gesamt	Zusätzliche Betriebs- kosten	Einsparung Erdgas	Energie- mehrverbrauch – Energieträger	Energie- mehrverbrauch
1	Vorgewärmte Verbrennungsluft (Austausch Brenner)	290.000 €	40.000 €/a	5 %	–	–
	Anpassung Ofen- Trockner-Verbund			5 %	–	–
2	Optimierung Brennhilfsmittel Dachziegel	2.000.000 €	–	25 %	–	–
3	Tunnelofen mit biogenem Synthesegas (Umrüstung)	800.000 €	50.000 €/a	100 %	Synthesegas	100 %
4	elektrischer Ofen (Neubau)	10.000.000 €	–	100 %	Strom	110 %
5	Hybridofen (Strom und Synthesegas) (Umrüstung)	4.300.000 €	125.000 €/a	100 %	Synthesegas	60 %
					Strom	50 %
6	Hybridofen (Strom und Gas) (Umrüstung)	3.500.000 €	75.000 €/a	40 %	Strom	50 %
7	Hybridofen (Strom und Wasserstoff) (Umrüstung)	5.000.000 €	175.000 €/a	100 %	Wasserstoff	60 %
					Strom	50 %
8	Tunnelofen mit Wasserstoffbeheizung (Umrüstung)	1.500.000 €	100.000 €/a	100 %	Wasserstoff	100 %
9	Hydrothormaler Brand/ Autoklaven	12.000.000 €	150.000 €/a	100 %	Strom	110 %
10	Tunnelofen mit biogenem Synthesegas (Umrüstung)	1.600.000 €	100.000 €/a	100 %	Synthesegas	100 %
	Trockner mit biogenem Synthesegas (Umrüstung)			100 %	Synthesegas	100 %

Nr.	Maßnahme	Investitions- ausgaben gesamt	Zusätzliche Betriebs- kosten	Einsparung Erdgas	Energie- mehrverbrauch – Energieträger	Energie- mehrverbrauch
11	Tunnelofen mit biogenem Synthesegas (Umrüstung)	3.600.000 €	100.000 €/a	100 %	Synthesegas	60 %
	Entkopplung des Ofen- Trockner-Verbunds (inkl. Optimierungen wie Umwälzung)					
	Trockner mit biogenem Synthesegas (Umrüstung)			100 %	Synthesegas	100 %
12	Tunnelofen mit biogenem Synthesegas (Umrüstung)	3.600.000 €	110.000 €/a	100 %	Synthesegas	60 %
	Entkopplung des Ofen- Trockner-Verbunds (inkl. Optimierungen wie Umwälzung)					
	Trockner mit biogenem Feststoff (Umrüstung)			100 %	biog. Fest- brennstoff	100 %
13	Tunnelofen mit biogenem Synthesegas (Umrüstung)	5.800.000 €	70.000 €/a	100 %	Synthesegas	60 %
	Entkopplung des Ofen- Trockner-Verbunds (inkl. Optimierungen wie Umwälzung)					
	Einsatz einer Wärmepumpe (für Trockner)			100 %	Strom	28 %
14	Entkopplung des Ofen- Trockner-Verbunds (inkl. Optimierungen wie Umwälzung)	5.000.000 €	20.000 €/a	40 %	–	–
	Einsatz einer Wärmepumpe (für Trockner)			100 %	Strom	28 %
15	Entkopplung des Ofen- Trockner-Verbunds (inkl. Optimierungen wie Umwälzung)	4.000.000 €	–	40 %	–	–
	elektrischer Trockner			100 %	Strom	100 %
16	elektrischer Ofen (Neubau entkoppelt)	12.000.000 €	–	100 %	Strom	66 %
	elektrischer Trockner			100 %	Strom	100 %
17	elektrischer Ofen (Neubau entkoppelt)	15.000.000 €	70.000 €/a	100 %	Strom	66 %
	Einsatz einer Wärmepumpe (für Trockner)			100 %	Strom	28 %

Nr.	Maßnahme	Investitions- ausgaben gesamt	Zusätzliche Betriebs- kosten	Einsparung Erdgas	Energie- mehrverbrauch – Energieträger	Energie- mehrverbrauch
18	Hybridofen (Strom und Synthesegas) (Umrüstung)	5.100.000 €	175.000 €/a	100 %	Strom	50 %
	Synthesegas				60 %	
	Trockner mit biogenem Synthesegas (Umrüstung)			100 %	biog. Fest- brennstoff	100 %
19	Hybridofen (Strom und Synthesegas) (Umrüstung)	7.100.000 €	175.000 €/a	100 %	Strom	30 %
	Synthesegas				36 %	
	Entkopplung des Ofen- Trockner-Verbunds (inkl. Optimierungen wie Umwälzung)					
	Trockner mit biogenem Synthesegas (Umrüstung)			100 %	Synthesegas	100 %
20	Hybridofen (Strom und Gas) (Umrüstung)	6.300.000 €	135.000 €/a	64 %	Strom	30 %
	Entkopplung des Ofen- Trockner-Verbunds (inkl. Optimierungen wie Umwälzung)					
	Trockner mit biogenem Feststoff (Umrüstung)					100 %
21	Hybridofen (Strom und Wasserstoff) (Umrüstung)	8.000.000 €	245.000 €/a	100 %	Strom	30 %
	Wasserstoff				36 %	
	Entkopplung des Ofen- Trockner-Verbunds (inkl. Optimierungen wie Umwälzung)					
	Trockner mit Wasserstoff (Umrüstung)			100 %	Wasserstoff	100 %
22	Hybridofen (Strom und Gas) (Umrüstung)	8.500.000 €	95.000 €/a	64 %	Strom	30 %
	Entkopplung des Ofen- Trockner-Verbunds (inkl. Optimierungen wie Umwälzung)					
	Einsatz einer Wärmepumpe (für Trockner)					100 %
23	Tunnelofen mit Wasserstoffbeheizung (Umrüstung)	2.500.000 €	170.000 €/a	100 %	Wasserstoff	100 %
	Trockner mit Wasserstoff (Umrüstung)					100 %

Nr.	Maßnahme	Investitions- ausgaben gesamt	Zusätzliche Betriebs- kosten	Einsparung Erdgas	Energie- mehrverbrauch – Energieträger	Energie- mehrverbrauch
24	Tunnelofen mit Wasserstoffbeheizung (Umrüstung)	4.300.000 €	160.000 €/a	100 %	Wasserstoff	60 %
	Entkopplung des Ofen-Trockner-Verbunds (inkl. Optimierungen wie Umwälzung)					
	Trockner mit biogenem Feststoff (Umrüstung)			100 %	biog. Festbrennstoff	100 %
25	Tunnelofen mit Wasserstoffbeheizung (Umrüstung)	4.500.000 €	170.000 €/a	100 %	Wasserstoff	60 %
	Entkopplung des Ofen-Trockner-Verbunds (inkl. Optimierungen wie Umwälzung)					
	Trockner mit Wasserstoff (Umrüstung)			100 %	Wasserstoff	100 %
26	Tunnelofen mit Wasserstoffbeheizung (Umrüstung)	6.500.000 €	120.000 €/a	100 %	Wasserstoff	60 %
	Entkopplung des Ofen-Trockner-Verbunds (inkl. Optimierungen wie Umwälzung)					
	Einsatz einer Wärmepumpe (für Trockner)			100 %	Strom	28 %
27	Hydrothormaler Brand/ Autoklaven	14.800.000 €	200.000 €/a	100 %	Strom	66 %
	Entkopplung des Ofen-Trockner-Verbunds (inkl. Optimierung wie Umwälzung)					
	Trockner mit biogenem Synthesegas (Umrüstung)			100 %	biog. Festbrennstoff	100 %
28	Hydrothormaler Brand/ Autoklaven	14.800.000 €	210.000 €/a	100 %	Strom	66 %
	Entkopplung des Ofen-Trockner-Verbunds (inkl. Optimierung wie Umwälzung)					
	Trockner mit biogenem Feststoff (Umrüstung)			100 %	biog. Festbrennstoff	100 %

Nr.	Maßnahme	Investitions- ausgaben gesamt	Zusätzliche Betriebs- kosten	Einsparung Erdgas	Energie- mehrverbrauch – Energieträger	Energie- mehrverbrauch
29	Hydrothermaler Brand/ Autoklaven	17.000.000 €	170.000 €/a	100 %	Strom	66 %
	Entkopplung des Ofen- Trockner-Verbunds (inkl. Optimierung wie Umwälzung)					
	Einsatz einer Wärmepumpe (für Trockner)			100 %	Strom	28 %
30	Hydrothermaler Brand/ Autoklaven	16.000.000 €	150.000 €/a	100 %	Strom	66 %
	Entkopplung des Ofen- Trockner-Verbunds (inkl. Optimierung wie Umwälzung)					
	elektrischer Trockner			100 %	Strom	100 %

Tabelle 16: Übersicht und Annahmen zu den technischen Maßnahmen – Ofen und Trockner

Nr.	Maßnahme	Investition (inkl. FuE) je Anlage	Zusätzliche Betriebskosten je Tonne gebrannt	Einsparung Prozess-emissionen	Einsparung Erdgas-Ofen und Trockner
<b>Pfad 2</b>					
31a	Wechsel von fossilen Porosierungsmitteln zu biogenen Porosierungsmitteln	1.000.000 €	3 €/a	80 %	–
32a	alternativer Rohstoff Ton HMZ	500.000 €	20 €/a	50 %	3 %
33a	alternativer Rohstoff Ton VMZ	500.000 €	20 €/a	50 %	3 %
34a	alternativer Rohstoff Ton DZ	500.000 €	20 €/a	50 %	3 %
<b>Pfad 3</b>					
31b	Wechsel von fossilen Porosierungsmitteln zu biogenen Porosierungsmitteln	1.500.000 €	5 €/a	100 %	–
32b	alternativer Rohstoff Ton HMZ	500.000 €	40 €/a	100 %	5 %
33b	alternativer Rohstoff Ton VMZ	500.000 €	40 €/a	100 %	5 %
34b	alternativer Rohstoff Ton DZ	500.000 €	40 €/a	100 %	5 %

Tabelle 17: Übersicht und Annahmen zu den technischen Maßnahmen – Ton und Porosierung

Nr.	Maßnahme	Investition (inkl. FuE) und neue Zulassungen je Anlage	Zusätzliche Betriebskosten	Einsparung Prozess-emissionen	Einsparung Erdgas Ofen und Trockner	Einsparung Strom Ofen und Trockner	Einsparung Gewicht (Masse)
35	Gewichtsreduktion HMZ	2.000.000 €	0 €/a	7 %	5 %	3 %	7 %
36a	Gewichtsreduktion VMZ	500.000 €	0 €/a	13 %	9 %	6 %	13 %
36b	Gewichtsreduktion VMZ durch Umstellung auf Riemchen	500.000 €	0 €/a	31 %	22 %	13 %	31 %
37	optimierte Ziegelgeometrie DZ	250.000 €	0 €/a	7 %	4 %	2 %	7 %

Tabelle 18: Übersicht und Annahmen zu den technischen Maßnahmen – Gewichtsreduktion

## 12.6 Liste der umgesetzten Maßnahmen im Klimaneutralitätspfad (Pfad 3)

Nr.	Maßnahme
1	vorgewärmte Verbrennungsluft (Austausch Brenner)
	Anpassung Ofen-Trockner-Verbund
2	Optimierung Brennhilfsmittel Dachziegel
4	elektrischer Ofen (Neubau)
8	Tunnelofen mit Wasserstoffbeheizung (Umrüstung)
12	Tunnelofen mit biogenem Synthesegas (Umrüstung)
	Entkopplung des Ofen-Trockner-Verbunds (inkl. Optimierungen wie Umwälzung)
	Trockner mit biogenem Feststoff (Umrüstung)
23	Tunnelofen mit Wasserstoffbeheizung (Umrüstung)
	Trockner mit Wasserstoff (Umrüstung)
24	Tunnelofen mit Wasserstoffbeheizung (Umrüstung)
	Entkopplung des Ofen-Trockner-Verbunds (inkl. Optimierungen wie Umwälzung)
	Trockner mit biogenem Feststoff (Umrüstung)
26	Tunnelofen mit Wasserstoffbeheizung (Umrüstung)
	Entkopplung des Ofen-Trockner-Verbunds (inkl. Optimierungen wie Umwälzung)
	Einsatz einer Wärmepumpe (für Trockner)
31b	Wechsel von fossilen Porosierungsmitteln zu biogenen Porosierungsmitteln
32b	alternativer Rohstoff Ton HMZ
33b	alternativer Rohstoff Ton VMZ
34b	alternativer Rohstoff Ton DZ
35	Gewichtsreduktion HMZ
36b	Gewichtsreduktion VMZ
37	optimierte Ziegelgeometrie DZ

Tabelle 19: Liste der umgesetzten Maßnahmen im Klimaneutralitätspfad (Pfad 3)

## 13 Verzeichnisse

### 13.1 Quellenverzeichnis

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

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

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

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

**DEPI** (2020): Pelletpreis/Wirtschaftlichkeit, abgerufen am 11.11.2020

**European Commission** (2018): Composition and Drivers of Energy Prices and Costs: Case Studies in Selected Energy Intensive Industries – 2018

**European Commission**: European Union Transaction Log

**IBU** – Institut Bauen und Umwelt e. V. (2015): Umwelt-Produktdeklaration nach ISO 14025 und EN 15804: Mauerziegel

**IBU** – Institut Bauen und Umwelt e. V. (2016): Umwelt-Produktdeklaration nach ISO 14025 und EN 15804: Vormauerziegel, Pflasterziegel und Riemchen

**IBU** – Institut Bauen und Umwelt e. V. (2018): Umwelt-Produktdeklaration nach ISO 14025 und EN 15804: Dach- und Formziegel BRAAS GmbH

**NTB** (2017): Hochtemperatur-Wärmepumpen – Literaturstudie zum Stand der Technik, der Forschung, des Anwendungspotenzials und der Kältemittel. Interstaatliche Hochschule für Technik Buchs. Institut für Energiesysteme (IES)

**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

**RWI Essen** (1999): CO<sub>2</sub>-Emissionen und wirtschaftliche Entwicklung: Monitoring-Bericht 1998: Fortschrittsberichte der Verbände

**Statistisches Bundesamt**: Jahrerhebung über die Energieverwendung im Verarbeitenden Gewerbe, im Bergbau und der Gewinnung von Steinen und Erden – Energieverbrauch nach Energieträgern – Deutschland. Berichtszeiträume: 2014, 2015, 2016, 2017, 2018

**Tretau, A. und Leydolph, B.** (2019): Charakterisierung sortierter Ziegel-Recycling-Materialien anhand physikalischer und chemisch-mineralogischer Eigenschaften für die Generierung neuer Stoffströme. Schlussbericht zu IGF-Forschungsvorhaben AiF 18889 BG

## 13.2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Produkte der Ziegelindustrie; Quelle: Bundesverband der Deutschen Ziegelindustrie e. V.	2
Abbildung 2: Für die Roadmap berücksichtigte Emissionsquellen	4
Abbildung 3: Vormauerziegel; Quelle: Bundesverband der Deutschen Ziegelindustrie e. V.	10
Abbildung 4: Historischer Stadtkern; Quelle: Vandersanden Deutschland GmbH.	12
Abbildung 5: Ziegelherstellung; Quelle: Bundesverband der Deutschen Ziegelindustrie e. V.	13
Abbildung 6: Für die Roadmap berücksichtigte Emissionsquellen aus Scope 1 und Scope 2; Quelle: FutureCamp	14
Abbildung 7: Brennvorgang von Dachziegeln im Tunnelofen; Quelle: ERLUS AG	15
Abbildung 8: Ziegelwerk; Quelle: Schlagmann Poroton GmbH & Co. KG	15
Abbildung 9: Werkstypen der virtuellen Werke; Quelle: FutureCamp	18
Abbildung 10: Absorptionswärmepumpe; Quelle: Wienerberger GmbH	20
Abbildung 11: Rohstoffgewinnung; Quelle: Ziegelwerk Bellenberg Wiest GmbH & Co. KG	21
Abbildung 12: Ziegelmehl; Quelle: Bundesverband der Deutschen Ziegelindustrie e. V.	22
Abbildung 13: Aufteilung Energieträger im Basisjahr 2020	23
Abbildung 14: Aufteilung der CO <sub>2</sub> -Emissionen im Basisjahr 2020	23
Abbildung 15: Verhältnis zwischen Energiekosten und CO <sub>2</sub> -Kosten im Basisjahr 2020	24
Abbildung 16: Vollautomatisierte Ziegelproduktion; Quelle: Ziegelwerk Klosterbeuren Ludwig Leinsing GmbH + Co. KG	24
Abbildung 17: Effizienzsteigerung Erdgas und Strom, beispielhafte Darstellung Strom	25
Abbildung 18: Entwicklung des Energieträgereinsatzes bis 2050 im Referenzpfad	26
Abbildung 19: Entwicklung der CO <sub>2</sub> -Emissionen bis 2050 im Referenzpfad	26
Abbildung 20: Entwicklung des Verhältnisses zwischen Energiekosten und CO <sub>2</sub> -Kosten im Referenzpfad	27
Abbildung 21: Entwicklung des Verhältnisses zwischen Energiekosten und CO <sub>2</sub> -Kosten im Referenzpfad	27
Abbildung 22: Verlegung am Dach; Quelle: BMI Steildach GmbH	28
Abbildung 23: Ofenstrecke für Dachziegelproduktion; Quelle: Jacobi Tonwerke GmbH	30
Abbildung 24: Entwicklung des Energieträgereinsatzes bis 2050 im Technologiepfad	31
Abbildung 25: Entwicklung der CO <sub>2</sub> -Emissionen bis 2050 im Technologiepfad	32
Abbildung 26: Entwicklung der jährlichen energiebezogenen Kosten bis 2050 im Technologiepfad	33
Abbildung 27: Entwicklung der CO <sub>2</sub> -Kosten im Technologiepfad	33
Abbildung 28: Entwicklung der CO <sub>2</sub> -Emissionen bis 2050 im Technologiepfad in Abhängigkeit der unterschiedlichen Sensitivitätsbetrachtungen des Investitionsbudgets	34
Abbildung 29: Jährliche energiebezogene Kosten 2050 im Technologiepfad, den Sensitivitätsbetrachtungen und im Referenzpfad	35
Abbildung 30: Kumuliertes Investitionsbudget bei Sensitivitätsbetrachtung im Technologiepfad	35

Abbildung 31: Entwicklung der Vermeidungskosten ausgewählter Technologien im Technologiepfad	36
Abbildung 32: Brenner auf einem Tunnelofen; Quelle: LEIPFINGER-BADER GmbH	38
Abbildung 33: Entwicklung des Energieträgereinsatzes bis 2050 im Klimaneutralitätspfad	39
Abbildung 34: Entwicklung der CO <sub>2</sub> -Emissionen bis 2050 im Klimaneutralitätspfad	40
Abbildung 35: Entwicklung der jährlichen energiebezogenen Kosten bis 2050 im Klimaneutralitätspfad	41
Abbildung 36: Gegenüberstellung Betriebsarten und Prozessemissionen aus eingesetztem Ton	42
Abbildung 37: Tongrube; Quelle: JUWÖ Poroton-Werke Ernst Jungk & Sohn GmbH	42
Abbildung 38: Entwicklung der CO <sub>2</sub> -Emissionen bis 2050 im Pfad 3 ohne alternative Tonrohstoffe	43
Abbildung 39: Entwicklung der jährlichen energiebezogenen Kosten bis 2050 im Pfad 3 ohne alternative Tonrohstoffe	43
Abbildung 40: Vergleich der Vermeidungskosten von elektrischem Ofen und Wasserstoffofen – Sensitivität Strompreis 2030	44
Abbildung 41: Vergleich der Vermeidungskosten von elektrischem Ofen und Wasserstoffofen – Sensitivität Strompreis 2040	45
Abbildung 42: Vergleich der Vermeidungskosten von elektrischem Ofen und Wasserstoffofen – Sensitivität Wasserstoffpreis 2030	46
Abbildung 43: Vergleich der Vermeidungskosten von elektrischem Ofen und Wasserstoffofen – Sensitivität Wasserstoffpreis 2040	46
Abbildung 44: Vergleich der Vermeidungskosten von elektrischem Ofen und Wasserstoffofen 2030 – Sensitivität Investitionsausgaben	47
Abbildung 45: Vergleich der Vermeidungskosten von elektrischem Ofen und Wasserstoffofen 2040 – Sensitivität Investitionsausgaben	48
Abbildung 46: Entwicklung der CO <sub>2</sub> -Emissionen bis 2050 – Gegenüberstellung aller drei Pfade	50
Abbildung 47: Entwicklung der jährlichen energiebezogenen Kosten bis 2050 – Gegenüberstellung aller drei Pfade	51
Abbildung 48: Luftansicht eines Ziegelwerkes; Quelle: JUWÖ Poroton-Werke Ernst Jungk & Sohn GmbH	54

### 13.3 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht Maßnahmen und Verlauf der CO <sub>2</sub> -Emissionen für die betrachteten Pfade	6
Tabelle 2: Übersicht Entwicklung energiebezogener Kosten für die betrachteten Pfade	7
Tabelle 3: Energieträgereinsatz der Ziegelindustrie 1990	12
Tabelle 4: Recyclingquote Referenzpfad nach EPDs	25
Tabelle 5: Steckbrief Referenzpfad (Pfad 1)	29
Tabelle 6: Recyclingquote Technologiepfad	30
Tabelle 7: Steckbrief Technologiepfad (Pfad 2)	37
Tabelle 8: Recyclingquote Klimaneutralitätspfad	38
Tabelle 9: Steckbrief Klimaneutralitätspfad (Pfad 3)	49
Tabelle 10: Gegenüberstellung der Ergebnisse der Pfade	50
Tabelle 11: Für die Modellierung verwendete Emissionsfaktoren	55
Tabelle 12: Annahmen zu den für die Modellierung verwendeten Energiepreisen	55
Tabelle 13: Annahmen zur Entwicklung des Emissionsfaktors für den Strommix und Erdgas sowie zu der Preisentwicklung EUA, Synthesegas und Wasserstoff	56
Tabelle 14: Annahmen zu Abschreibungszeitraum und Diskontsatz	56
Tabelle 15: Annahmen zu den Betriebskosten eines durchschnittlichen Ofens und Trockners – Status quo	57
Tabelle 16: Übersicht und Annahmen zu den technischen Maßnahmen – Ofen und Trockner	57
Tabelle 17: Übersicht und Annahmen zu den technischen Maßnahmen – Ton und Porosierung	62
Tabelle 18: Übersicht und Annahmen zu den technischen Maßnahmen – Gewichtsreduktion	62
Tabelle 19: Liste der umgesetzten Maßnahmen im Klimaneutralitätspfad (Pfad 3)	63

### 13.4 Abkürzungsverzeichnis

CCfD	Carbon Contracts for Difference
DZ	Dachziegel
EPD	Umwelt-Produktdeklaration (engl.: Environmental Product Declaration)
EUA	EU Emissionsberechtigungen (engl.: European Union Allowance)
EU ETS	EU Emissionshandel (engl.: European Union Emissions Trading System)
HMZ	Hintermauerziegel
RED II	Erneuerbare-Energien-Richtlinie (Renewable Energies Directive II)
VMZ	Vormauerziegel

