

---

# CO<sub>2</sub>-NEUTRALE PROZESSWÄRMEERZEUGUNG

---

4. Workshop zur Veranstaltungsreihe im Rahmen der Veröffentlichung der UBA-Studie

16. Januar 2024 (online), Branchenworkshop Kalk und Zement

**Herzlich willkommen!**

---



# Agenda der heutigen Veranstaltung

---

*Moderation: Christian Schwotzer*

- 09:00 – 09:05 Uhr: Begrüßung (C. Schwotzer)
- 09:05 – 09:15 Uhr: Kurzvorstellung Studie und des Workshopkonzeptes (C. Schwotzer, T. Fleiter)
  
- 09:15 – 09:40 Uhr: Ergebnisse Teil I: Branche Kalk (C. Schwotzer, T. Fleiter)
- 09:40 – 10:05 Uhr: Ergebnisse Teil II: Branche Zement (C. Schwotzer, T. Fleiter)
- 10:05 – 10:15 Uhr: Einführung in die Methodik des gemeinsamen, interaktiven Arbeitens (C. Schwotzer)
  
- *10:15 – 10:25 Uhr: Pause*
  
- 10:25 – 11:25 Uhr: Gemeinsame Diskussion und interaktives Arbeiten (C. Schwotzer, F. Kaiser)
- 11:25 – 11:30 Uhr: Zusammenfassung (C. Schwotzer, T. Fleiter)

# Einordnung in Energiesystemstudien

---

## Forschungsrahmen dieser Studie

- **Im Fokus sind die Anwendungen der CO<sub>2</sub>-neutralen Prozesswärme, nicht die Bereitstellung von benötigter Energie oder Infrastrukturen.**
- CO<sub>2</sub>-neutrale Anwendungen zur Prozesswärmeerzeugung sind nicht ohne das energiewirtschaftliche Umfeld bewertbar.
- Eine vollständige Energiesystemanalyse geht jedoch über den Rahmen dieser Studie hinaus.
- Daher wurden in dieser Untersuchung Vereinfachungen und Annahmen getroffen. Dazu gehören:
  - national einheitliche und nur jährlich definierte Strompreise,
  - Annahmen zur Verfügbarkeit von Energieträgern und entsprechender Infrastruktur,
  - Preispfade für Energieträger und CO<sub>2</sub>,
  - keine Modellierung der Stromerzeugung,
  - und daraus resultierend keine Abbildung flexibler Endverbraucher.

## Ein Blick darüber hinaus

- Diese hier Aspekte des Energiesystems werden in verschiedenen darauf spezialisierten Studien mit komplexen Modellverbänden untersucht. Einige der in dieser Studie verwendeten Annahme basieren darauf.
- Für die Einordnung der Ergebnisse in den breiteren Kontext empfehlen wir die Berücksichtigung dieser (und weiterer) Studien. Dort sind vielfältige Hintergrundinformationen dargestellt und komplementäre Untersuchungen zu Wasserstoff, Angebot an EE und weitere zu finden.
  - **Langfristszenarien** des BMWK [1]
  - **Ariadne** des BMBF [2]
    - Vielfältige Veröffentlichungen u.A. zu Kosten, Akzeptanz, Politikinstrumenten; die verlinkte ist Teil der „Big5“ Energiesystemstudien [3]
  - **Projektionsbericht** der Bundesregierung/Umweltbundesamt [4]

[1]: <https://langfristszenarien.de/enertile-explorer-de/>

[2]: <https://ariadneprojekt.de/publikation/deutschland-auf-dem-weg-zur-klimaneutralitat-2045-szenarienreport/>

[3]: <https://ariadneprojekt.de/news-de/big5-szenarienvergleich/>

[4]: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/projektionsbericht-2023-fuer-deutschland>

---

# Kurzvorstellung Studie und des Workshopkonzeptes

# Die vorgestellten Ergebnisse sind Teil einer **Studie für des Umweltbundesamt**

---

Auftraggeberin:



Projektstart: April 2019

geplante Veröffentlichung: September 2023

Ausführende Stellen:



Dr. Tobias Fleiter, Dr. Matthias Rehfeldt, Dr. Simon Hirzel,  
Lisa Neusel, Dr. Ali Aydemir



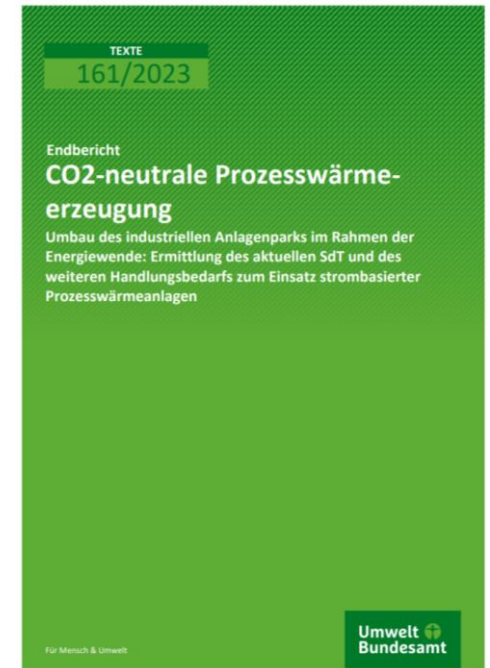
Dr. Christian Schwotzer, Felix Kaiser, Carsten Gondorf,  
Justin Hauch, Jan Hof, Lukas Sankowski, Moritz Langhorst

*Wir bedanken sich bei vielen weiteren Kolleginnen und Kollegen, die uns bei der Studie unterstützt haben. Besonderer Dank geht an Dr. Thomas Echterhof, Dr. Nico Schmitz, Fabian Störmann, Simon Lukas Bussmann, Jennifer Birke, Lukas Knorr, Lena Noner, Prof. Herbert Pfeifer, Prof. Harald Bradke, Prof. Clemens Rohde, Moritz Heuchel, Nadine Steinhübel, Sina Lange, Kerstin Kopf.*

# Die vorgestellten Ergebnisse sind Teil einer Studie für des Umweltbundesamt

Link zur Studie: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/co2-neutrale-prozesswaermeerzeugung>

- Umfang der Erhebung des Stands der Technik
  - 13 Industrien, 26 Prozessketten, 30 Produkte betrachtet
  - ca. 120 Expert:inneninterviews geführt
  - 63 energieintensive Prozessschritte identifiziert
  - aus 75 Anlagentypen insgesamt 51 Anlagentypen für weitere Betrachtungen identifiziert
- Definition der Referenztechniken
  - 34 Anwendungen inkl. Referenztechniken definiert
- Definition der Alternativtechniken
  - 1 – 4 Alternativtechniken je Anwendung (insgesamt 96 Alternativtechniken)
  - Elektrifizierung und Wasserstoff im Fokus
  - Für einzelne Anwendungen werden Erdgas/EE-Methan, Biomasse und hybride Beheizungstechnologien betrachtet



Gesamtbericht 739 Seiten (inkl. Anhang)

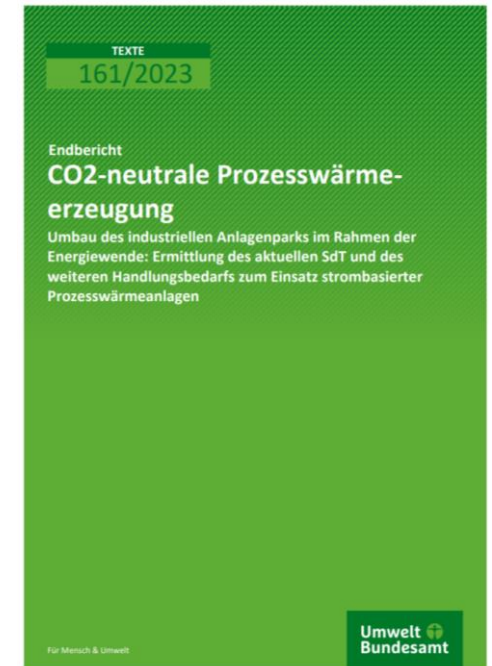


# Zielsetzung der Studie

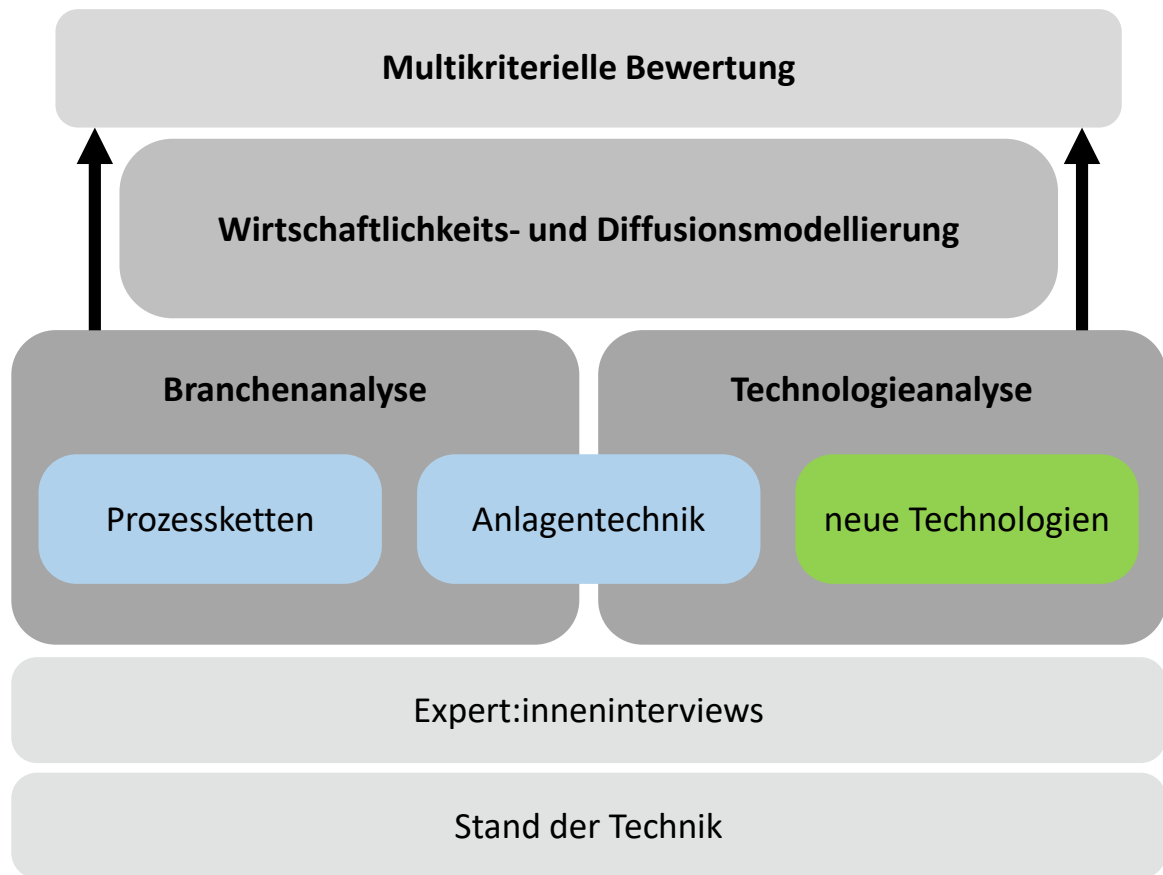
Link zur Studie: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/co2-neutrale-prozesswaermeerzeugung>

## Hauptstudie:

- Wissenslücke zur Rolle von H<sub>2</sub>/Strom in der CO<sub>2</sub>-neutralen Prozesswärme verkleinern
- Umstellung auf eine CO<sub>2</sub>-neutral Prozesswärmeerzeugung bis 2050 anhand ausgewählter Branchen/Techniken untersuchen, mit den Schwerpunkten
  - Stand der Technik und F&E Bedarf
  - Wirtschaftlichkeit
  - Ganzheitlicher Vergleich: Technisch, wirtschaftlich, ökologisch
  - Gesamtbild und Elemente einer Strategie zur Transformation der Prozesswärmeerzeugung
- Hohe Übertragbarkeit und Gültigkeit der Schlussfolgerungen ermöglichen durch: Sehr breite und tiefe Betrachtung durch Auswahl von > 20 Anwendungen aus allen relevanten Branchen



# Die arbeiten münden in 11 Thesen als Elemente einer Transformationsstrategie



**These 1:** Der Anlagenpark der Industrieöfen ist **heterogen**.

**These 2:** Die Umstellung auf eine THG-neutrale Prozesswärmeerzeugung ist **bis 2045 technisch realisierbar**.

**These 3:** Bei Elektrifizierung und Wasserstoffeinsatz sind Forschung, **Entwicklung und Demonstration** notwendig.

**These 4:** Eine Elektrifizierung verlangt einen **umfassenderen Umbau** des Anlagenparks als der Einsatz von Wasserstoff oder synthetischem Methan.

**These 5:** Die Elektrifizierung geht mit leichten **Effizienzgewinnen** bei den meisten Anwendungstechniken einher.

**These 6:** **Elektrifizierung** ist bei vielen Anwendungen mit niedrigeren Temperaturen vorteilhaft - Wasserstoff bei sehr hohen Energiedichten.

**These 7:** Der zusätzliche **Investitionsbedarf** für den Neubau der Anlagen ist aus Systemsicht eher gering.

**These 8:** Die Umstellung auf CO<sub>2</sub>-neutrale Techniken ist mit deutlich höheren **Energiekosten** verbunden.

**These 9:** Aufgrund langer **Modernisierungszyklen** ist die Gefahr von stranded investments hoch.

**These 10:** **Hybride Anlagenkonzepte** können den Einstieg in die CO<sub>2</sub>-neutrale Prozesswärme ermöglichen.

**These 11:** CO<sub>2</sub>-neutrale Techniken **mindern direkte Umweltwirkungen** sowie Umweltkosten.



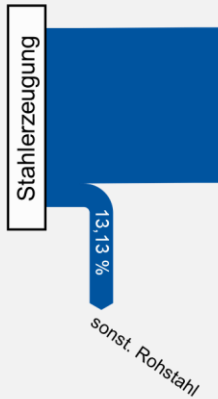
# Branchen im Fokus der Studie

<b>Metallindustrie</b>	Wärme- und Glühöfen Stahl-Walzwerke	 
	Gießerei-Industrie	
	NE-Metallindustrie (Aluminium, Kupfer)	
	Umformtechnik (Massivumformung und Presshärten)	
	Härtereitechnik	
<b>Mineralindustrie</b>	Glasindustrie inkl. Glasfaser	 
	Kalkindustrie	
	Zementindustrie	
	Keramik- und Ziegelindustrie	
<b>Dampferzeuger</b>	Papierindustrie	
	Nahrungsmittelindustrie	
	Chemische Industrie	

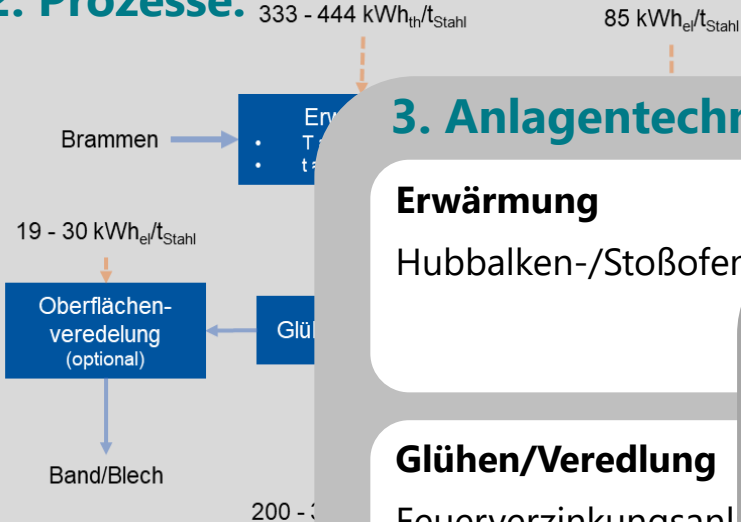
# 4-schrittiger Lösungsansatz der Branchen- und Technologieanalyse

## 1. Produkte:

Rohstahlerzeugung in 2016: 42,88 Mrd. t



## 2. Prozesse:



## 3. Anlagentechnik (Stand der Technik):

### Erwärmung

Hubbalken-/Stoßofen

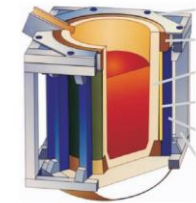
### Glühen/Veredlung

Feuerverzinkungsanl.

## 4. CO<sub>2</sub>-neutrale Alternativtechnologien:

### Power-to-Heat (PtH)

Induktion, Widerstandsbeheizung, Plasma, ...

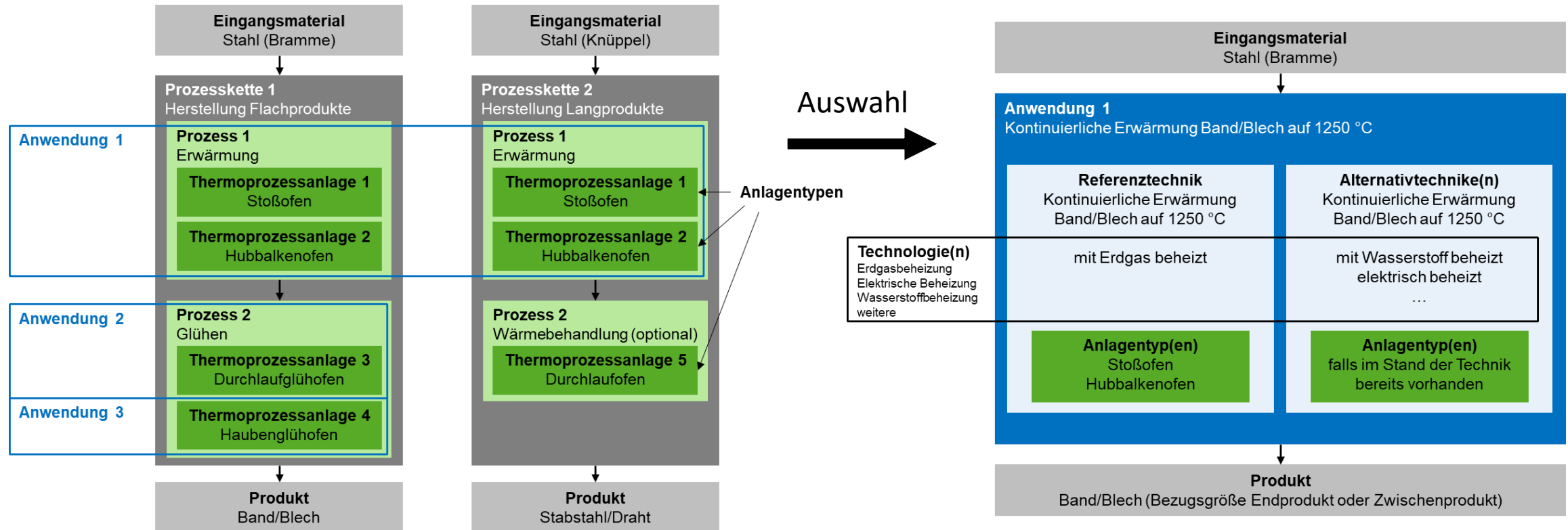


### Power-to-Gas (PtG) / Power-to-Liquid (PtL)

Wasserstoff, EE-Methan, ...



# Terminologie der Betrachtungen: Prozesskette, Prozess, Anwendung, Technologie, Technik, Anlage



# Die Veranstaltungsreihe verfolgt **zwei Ziele** - Kommunikation der Ergebnisse und Erarbeitung von Strategien zur Umsetzung

Alle Informationen und Unterlagen zu den Veranstaltungen finden Sie immer auch auf unserer Website [www.hybrid-heating.de](http://www.hybrid-heating.de)

- Kommunikation der Ergebnisse der Hauptstudie
  - Vorstellung zentraler Ergebnisse der Studie und Diskussion (**Kick-off**).
  - Zusammenführung der Erkenntnisse aus den Veranstaltungen und Diskussion (**Abschlussveranstaltung**).
- Erarbeitung von Strategien zu Umsetzung (**branchenspezifische Workshops**)
  - Vertiefte, branchenspezifische Vorstellung der Ergebnisse.
  - Gemeinsames Arbeiten an Herausforderungen und Möglichkeiten zur Umsetzung einer CO<sub>2</sub>-neutralen Prozesswärmeerzeugung in der Industrie.



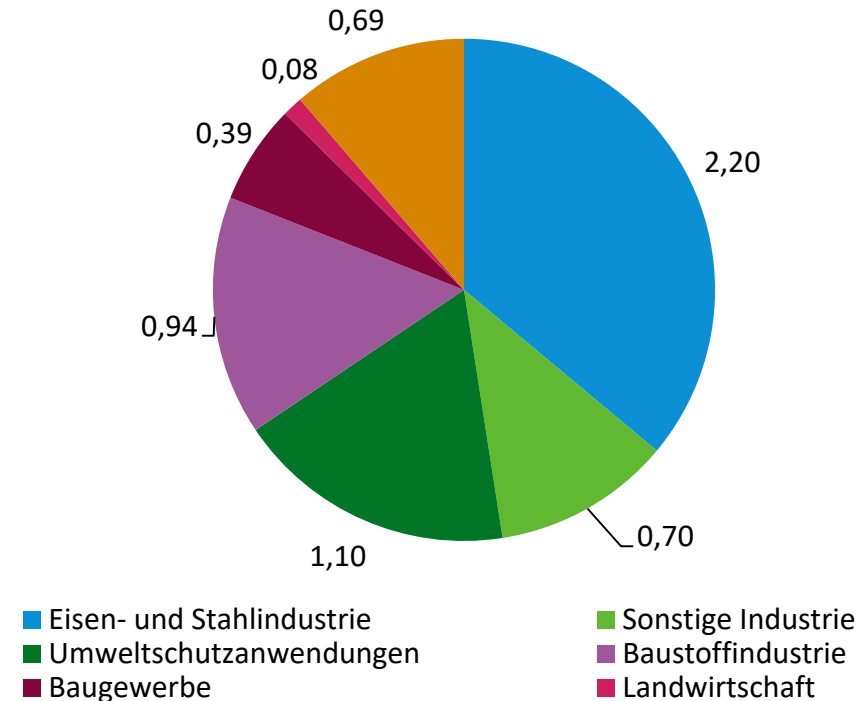
---

# Ergebnisse Teil I: Branche Kalk

# Kurzbeschreibung der Branche und Fokus der Studie

- 2019 betrug der Marktabsatz circa 6,1 Mio. t für gebrannte Kalkprodukte
- Deutschlandweit arbeiteten 2019 circa 3.600 Menschen an 31 Standorten in der Kalkindustrie
- Aufgrund hoher Transportkosten befinden sich die Verarbeitungsstätten meist in direkter Nähe zum Rohstoffvorkommen
- Branntkalk macht weit über 90 % der gebrannten Kalkprodukte aus

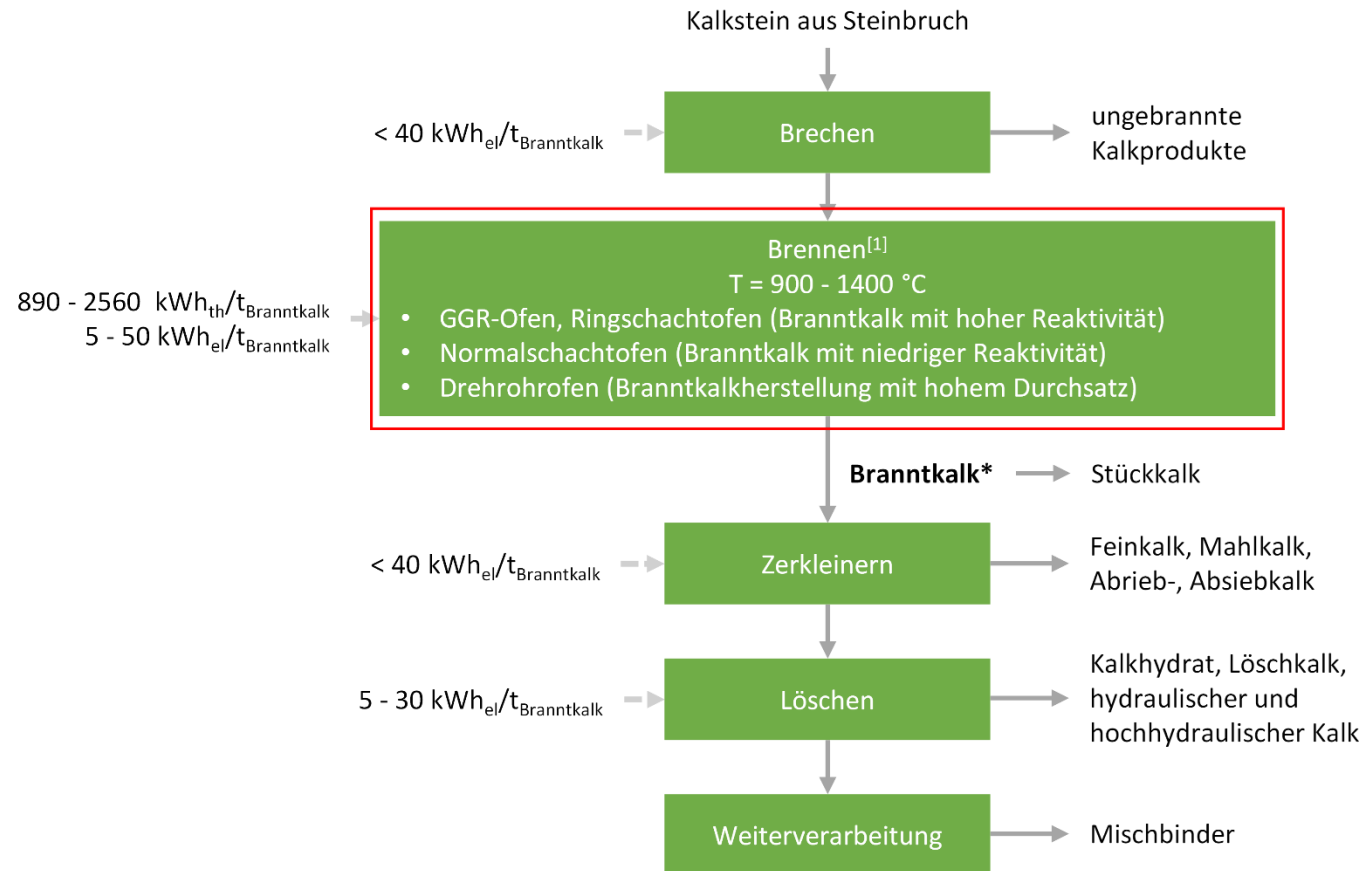
Absatz gebrannter Kalkprodukte Deutschland nach Anwendungsgebiet (in Mio. t)



Anm.: Sonstige Industrie umfasst u. a. den Einkauf der Zucker- und Zementindustrie  
eigene Darstellung nach, Quelle: Bundesverband der Deutschen Kalkindustrie e.V. (BVK) et al. 2020)



# Prozessketten und Produkte: Allgemeine Prozesskette der Branntkalkherstellung



## Legende:

Rot markiert: Energieintensive Prozessschritte mit fossilen Energieträgern im Fokus der Betrachtungen innerhalb dieser Studie

\* Bezugsgröße

## Anmerkungen:

th. = thermisch; el. = elektrisch; GGR-Ofen = Gleichstrom-Gegenstrom-Regenerativ-Ofen

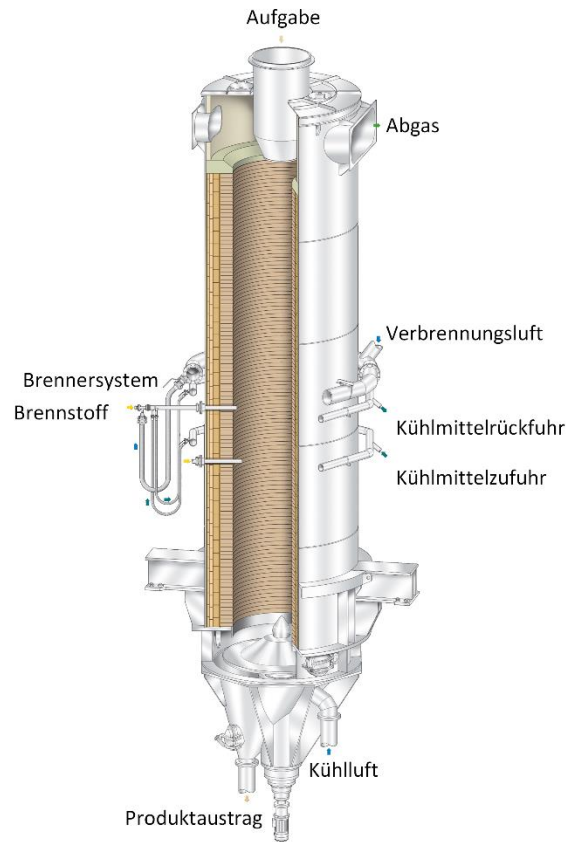
Die Kenndaten basieren auf Daten für Anlagen in Europa. Die Definition von Technikbeispielen für Deutschland erfolgt in den nachfolgenden Abschnitten.

Die Summe des Energiebrauchs der Prozessschritte Brechen und Zerkleinern wird mit 4 bis 40 kWh<sub>el</sub>/t<sub>Branntkalk</sub> angegeben.

Quellen: (eigene Darstellung nach) [1] (Stork 2014)

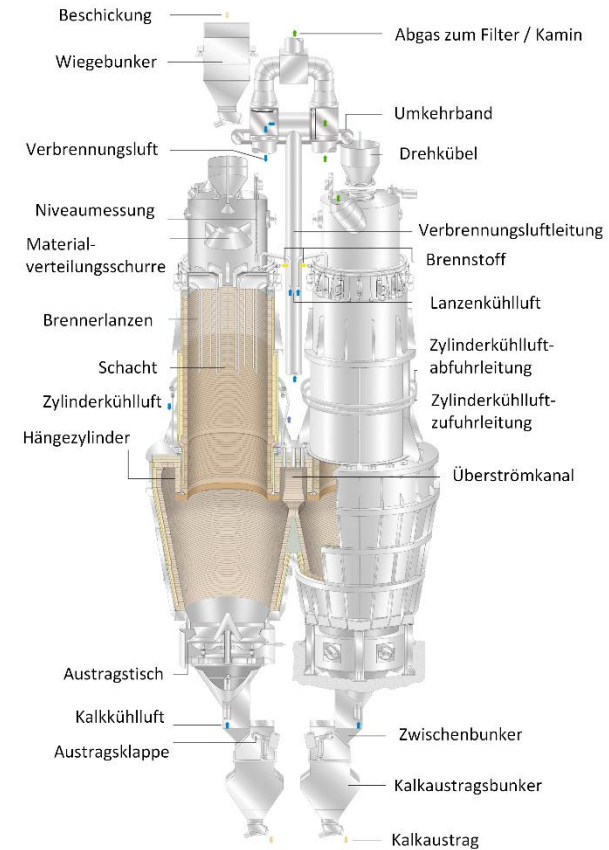
# Thermoprozessanlagen (exemplarisch, nicht maßstabsgetreu)

Schematische Darstellung eines Normalschachtofens



Quelle (eigene Darstellung nach): (Maerz Ofenbau AG 2023)

Schematische Darstellung eines Ringschachtofens



Quelle (eigene Darstellung nach): (Maerz Ofenbau AG 2023)

# Auswahl der Anwendungen und Referenztechniken anhand von Energieverbrauch und CO<sub>2</sub>-Emissionen

Abschätzung charakteristischer Anlagenkennzahlen zur Auswahl der betrachteten Anwendungen und Referenztechniken „Kalkindustrie“ in Deutschland

Anlagentypen	Jährlicher Anlagendurchsatz		Jährlicher Energieverbrauch		Energiebedingte CO <sub>2</sub> -Emissionen*	
	6,2 Mio. t	Anteil	6.918 - 8.361 GWh	Anteil	2.125 - 2.664 Tsd. t	Anteil
<b>GGR-Ofen</b>	2,4 Mio. t	39 %	2.423 - 2.666 GWh	32 - 35 %	672 - 740 Tsd. t	28 - 32 %
<b>Normalschachtofen</b>	1,4 Mio. t	22 %	1.520 - 1.780 GWh	21 - 22 %	478 - 630 Tsd. t	22 - 24 %
<b>Drehrohrofen</b>	1,0 Mio. t	16 %	1.463 - 1.697 GWh	20 - 21 %	448 - 520 Tsd. t	20 - 21 %
Ringschachtofen	0,9 Mio. t	14 %	972 - 1.138 GWh	14 %	336 - 393 Tsd. t	15 - 16 %
Sonstige	0,6 Mio. t	9 %	540 - 1.080 GWh	8 - 13 %	191 - 381 Tsd. t	9 - 14 %
<b>Verteilung</b>						
Anteil Anlagen mit elektrischer Energie beheizt				< 1 %	< 1 %	
Anteil Anlagen mit fossiler Energie beheizt (inkl. sekundärer Brennstoffe)				> 99 %	> 99 %	
<b>Davon im Rahmen der Studie betrachteten Anlagentypen (fett)</b>				<b>73 - 78 %</b>	<b>71 - 75 %</b>	

Erweiterte Darstellung, Datenbasis (inkl. Quellenangaben) siehe Anhang der Studie A.10.2 (Daten aus 2013, 2018 und 2019)

\* Es entstehen zusätzlich prozessbedingte CO<sub>2</sub>-Emissionen von ca. 0,721 kg<sub>CO2</sub>/t<sub>Brannkalk</sub>  
 fettgedruckt: Anlagentypen, die im Rahmen der Studie weiter betrachtet werden

# Betrachtete Anwendungen und Referenztechniken

Referenztechnik	
Definition	kontinuierlicher Brennofen Kalk mit niedriger Reaktivität mit Koksbeheizung
Anwendung	konti. Brennen von Kalk mit niedriger Reaktivität ( $T_{\text{Prozess,max.}} \approx 1.400^{\circ}\text{C}$ )
Thermoprozessanlage(n)	Normalschachtofen
Beheizungstechnologie(n)	Koksbeheizung

Referenztechnik	
Definition	konti. Brennofen Kalk mit mittlerer/hocher Reaktivität mit Erdgasbeheizung
Anwendung	konti. Brennen von Kalk mit mittlerer/hocher Reaktivität ( $T_{\text{Prozess,max.}} \approx 1.300^{\circ}\text{C}$ )
Thermoprozessanlage(n)	Gleichstrom-Gegenstrom-Regenerativ-Ofen (kurz GGR-Ofen)
Beheizungstechnologie(n)	Erdgasbeheizung (seltener auch Beheizung mit Braunkohlestaub (BKS))

Referenztechnik	
Definition	konti. Brennofen Kalk mit hohem Durchsatz mit Brennstoffmixbeheizung
Anwendung	kontinuierliches Brennen von Kalk mit hohem Durchsatz ( $T_{\text{Prozess,max.}} \approx 1.400^{\circ}\text{C}$ )
Thermoprozessanlage(n)	Drehrohrofen
Beheizungstechnologie(n)	Brennstoffmixbeheizung (75 % Braunkohlestaub, 25 % Sekundärbrennstoffe)

# Definition von Alternativtechniken

<b>Technik und Technologie</b>	
<i>Referenztechnik</i>	<i>kontinuierlicher Brennofen Kalk mit niedriger Reaktivität mit Koksbeheizung</i>
Alternative Beheizungstechnologie(n)	elektrische Beheizung Wasserstoffbeheizung Biomassebeheizung
Alternativtechnik(en)	konti. Brennofen Kalk mit niedriger Reaktivität mit elektrischer Beheizung konti. Brennofen Kalk mit niedriger Reaktivität mit Wasserstoffbeheizung
<b>Technik und Technologie</b>	
<i>Referenztechnik</i>	<i>konti. Brennofen Kalk mit mittlerer/hoher Reaktivität mit Erdgasbeheizung</i>
Alternative Beheizungstechnologie(n)	elektrische Beheizung (Widerstandsbeheizung, Plasmabeheizung) Wasserstoffbeheizung
Alternativtechnik(en)	konti. Brennofen Kalk mit mittlerer/hoher Reak. mit elektrischer Beheizung konti. Brennofen Kalk mit mittlerer/hoher Reak. mit Wasserstoffbeheizung konti. Brennofen Kalk mit mittlerer/hoher Reak. mit EE-Methanbeheizung
<b>Technik und Technologie</b>	
<i>Referenztechnik</i>	<i>konti. Brennofen Kalk mit hohem Durchsatz mit Brennstoffmixbeheizung</i>
Alternative Beheizungstechnologie(n)	elektrische Beheizung (Widerstandsbeheizung, Plasmabeheizung) Wasserstoffbeheizung Biomassebeheizung Methanbeheizung (Erdgas/EE-Methan)
Alternativtechnik(en)	konti. Brennofen Kalk mit hohem Durchsatz mit elektrischer Beheizung konti. Brennofen Kalk mit hohem Durchsatz mit Wasserstoffbeheizung konti. Brennofen Kalk mit hohem Durchsatz mit Biomassebeheizung konti. Brennofen Kalk mit hohem Durchsatz mit Erdgas-/EE-Methanbeheizung

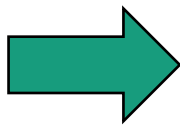
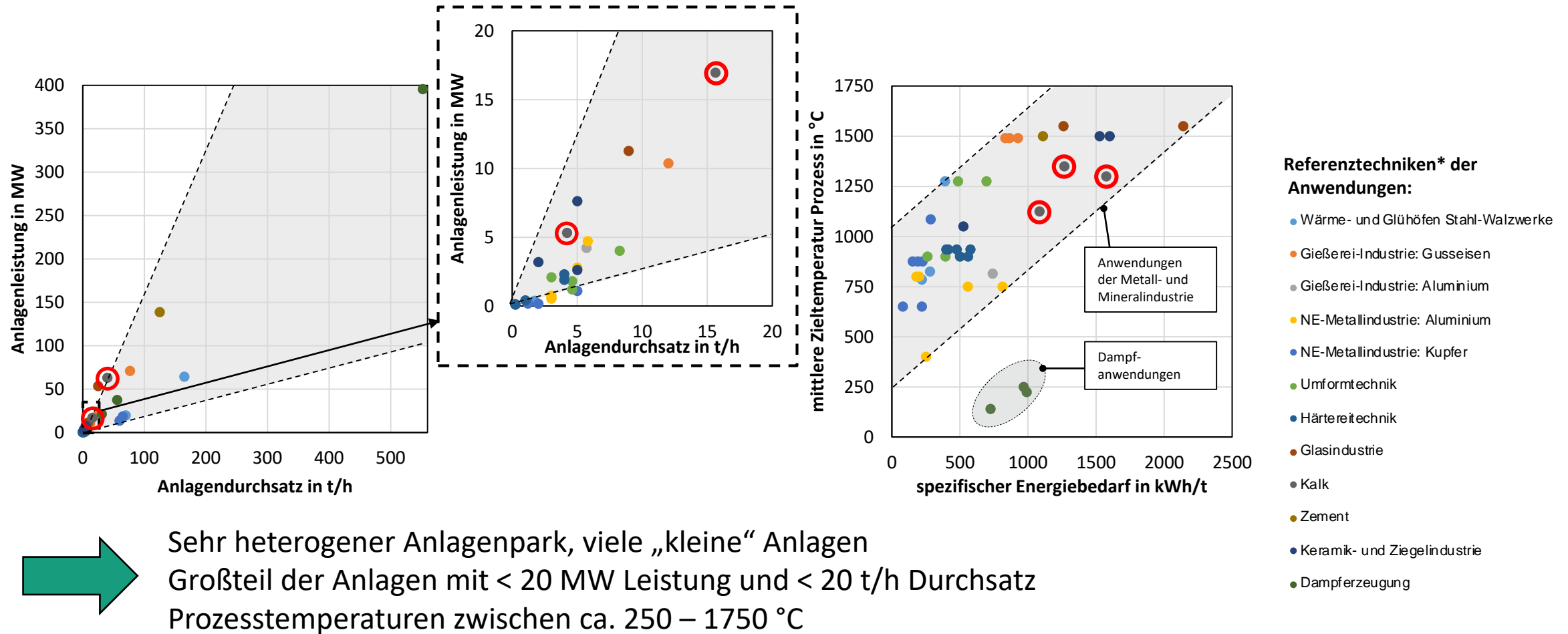
# Erhebung von Kenndaten: „kontinuierliches Brennen von Kalk mit niedriger Reaktivität“

Technik	Referenztechnik	Alternativtechnik 1	Alternativtechnik 2	Alternativtechnik 3	Einheit	Quellen
<b>Beheizungstechnologie</b>	<b>Koksbeheizung</b>	<b>Elektrifizierung<sup>1)</sup></b>	<b>Wasserstoffbeheizung</b>	<b>Biomassebeheizung</b>		
<b>Thermoprozessanlagen</b>	Normalschachtofen	Normalschachtofen	Normalschachtofen	Normalschachtofen		
Produkt	Branntkalk mit niedriger Reaktivität					
Investition Neubau	140,1	140,1	140,1	140,1	EUR/t <sub>Kap.</sub>	[1]
Investition Modernisierung	28,0	28,0	28,0	28,0	EUR/t <sub>Kap.</sub>	[1]
Minimale Investition Neubau	140,1	140,1	140,1	140,1	EUR/t <sub>Kap.</sub>	[1]
Min. Investition Modernisierung	28,0	28,0	28,0	28,0	EUR/t <sub>Kap.</sub>	[1]
TRL	9	< 2	< 2	< 4	-	
Energieträger 1	Koks	Strom	EE-Wasserstoff	Biokoks	-	[1]
Energieträger 2	Strom	keiner	keiner	Strom	-	[1]
Energieträger 3	keiner	keiner	keiner	keiner	-	
Spezifischer Energiebedarf 1	1,250	1,267	1,267	1,250	MWh/t <sub>Pr.</sub>	[1]
Spezifischer Energiebedarf 2	0,017	0,000	0,000	0,017	MWh/t <sub>Pr.</sub>	[1]
Spezifischer Energiebedarf 3	0,000	0,000	0,000	0,000	MWh/t <sub>Pr.</sub>	
Min. spezifischer Energiebedarf	1,140	1,267	1,267	1,140	MWh/t <sub>Pr.</sub>	[1]
Prozessbedingte Emissionen	0,730	0,730	0,730	0,730	t <sub>CO2</sub> /t <sub>Pr.</sub>	[1]
Betriebs- und Wartungskosten	0,4	0,4	0,4	0,4	EUR/t <sub>Kap.</sub>	[1]
Abschreibungszeitraum	25	25	25	25	a	[1]
Lebensdauer	60	60	60	60	a	[1]
Repräsentative Kapazität	40.000	40.000	40.000	40.000	t <sub>Jahresleistung</sub>	[1]
Auslastung	0,85	0,85	0,85	0,85	1,00	[1]
Anteil Bestand 2020	100 %	0 %	0 %	0 %	%	
Verfügbar ab	2020	2040	2040	2030		
Verfügbar bis	2050	2050	2050	2050		

Annahmen, Legende und Quellen siehe Bericht



# These 1: Der Anlagenpark der Industrieöfen ist heterogen



Sehr heterogener Anlagenpark, viele „kleine“ Anlagen  
 Großteil der Anlagen mit < 20 MW Leistung und < 20 t/h Durchsatz  
 Prozesstemperaturen zwischen ca. 250 – 1750 °C

Detaillierte Annahmen, Legende und Quellen siehe Bericht

# These 2: Die Umstellung auf eine THG-neutrale Prozesswärmeerzeugung ist bis 2045 technisch realisierbar

- **Elektrische Beheizungstechnologien** sind für einige Anwendungen der **Metallindustrie** bereits Stand der Technik (TRL = 9), sie werden im Anlagenpark in Deutschland jedoch vielfach nicht eingesetzt.
- **Elektrische Beheizungstechnologien** sind in für die Anwendungen der **Mineralindustrie** nicht Stand der Technik vorhanden (TRL < 3). Insbesondere die hohen Prozesstemperaturen für das Brennen und Schmelzen > 1200 °C lässt sich gegenwärtig mit elektrischen Beheizungstechnologien nicht erreichen.
- **Hybride Beheizungstechnologien (anteilige Elektrifizierung)** sind für Anwendungen mit hohen Prozesstemperaturen von Bedeutung. Für spezielle Anwendungen (bspw. Glas (als elektrische Zusatzheizung), oder in der Umformtechnik) sind sie Stand der Technik. Insbesondere für Anwendungen mit großen Kapazitäten (Glas, Zement, Stahl-Walzwerke) werden diese Konzepte jedoch (noch) nicht eingesetzt (TRL < 3 – 7).
- Einsatz von **Wasserstoff** besitzt für nahezu alle betrachteten Anwendungen aus technischer Sicht großer Potential. Mangels Verfügbarkeit von Wasserstoff konnte die Einsatzfähigkeit in Pilot- oder Demonstrationsanlagen bisher vielfach (noch) nicht ausreichend erprobt werden (TRL < 2 – 5). Einzelne Komponenten (bspw. Brenner) haben vielfach jedoch bereits ein deutlich höheres TRL.
- Beim Einsatz von **Biomasse** ist vor allem die Qualität des Brennstoffes ausschlaggebend. Der Einsatz wurde im großtechnischen Maßstab für die betrachteten Anwendungen bisher nicht erprobt (TRL < 4 – 8).
- Der Einsatz von **EE-Methan** ist aus technischer Sicht dem von Erdgas gleichzusetzen (TRL = 9).

Anmerkungen:

Fokus der Betrachtungen lag auf der Analyse des technischen Potentials als PTH Alternative und dem Einsatz von Wasserstoff als PtG Alternative.

„n.v.“: Keine signifikanten F&E-Aktivitäten für diese Anwendung vorhanden.

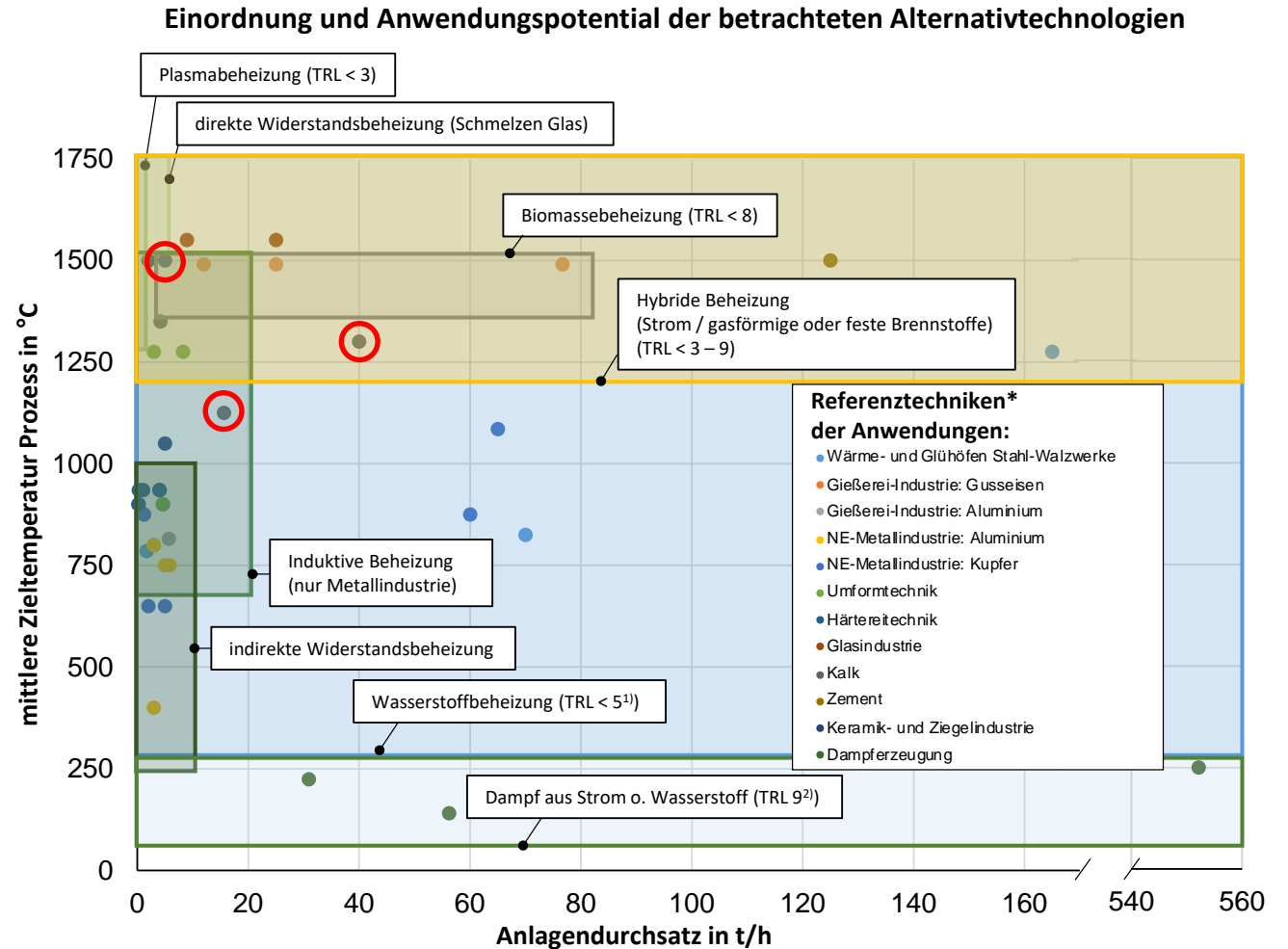
„n.b.“: Anwendung wurde nicht betrachtet. Das TRL der Technologiekombination wird gleich oder geringer als das der Technologie mit jeweils geringeren TRL eingeschätzt.

Weitere Anmerkungen siehe Bericht.

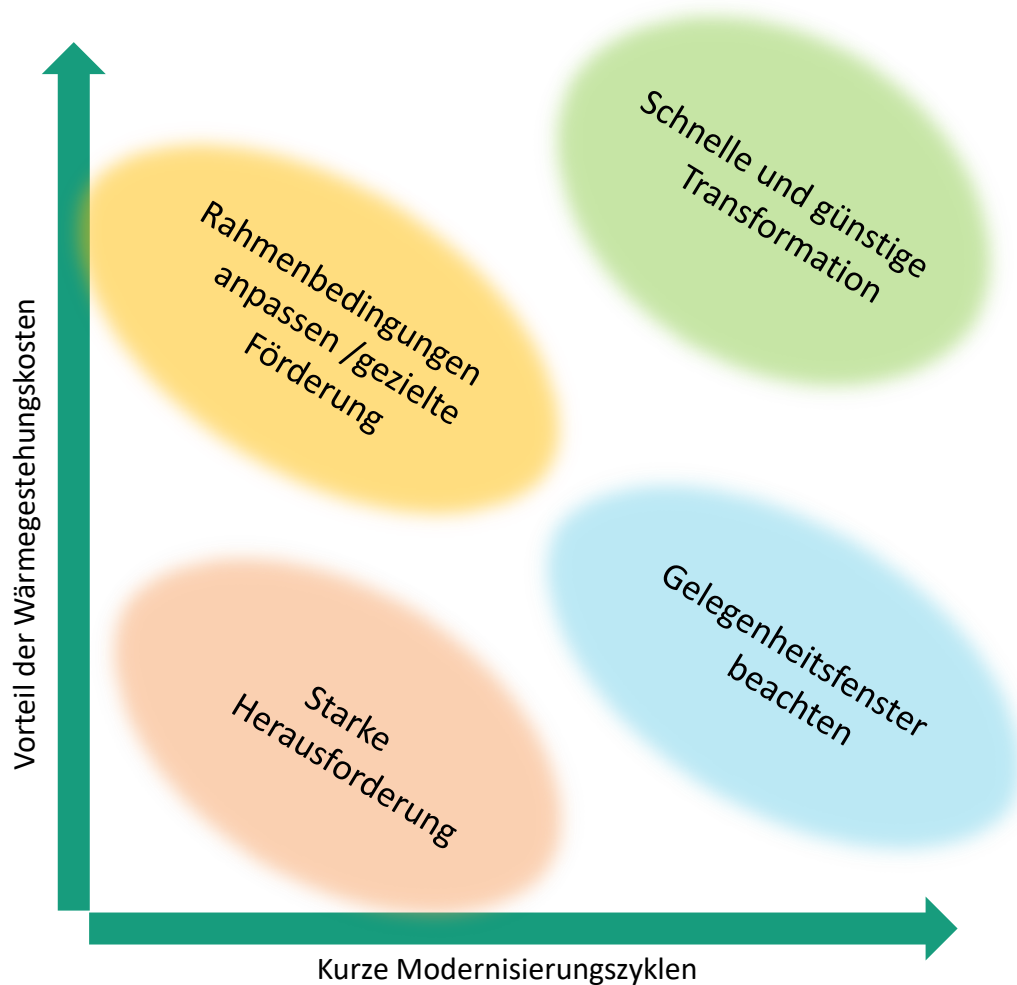
		Branche und Anwendung (zusammengefasst)																	
		Aluminium: Schmelzen, Erwärmen und Wärmebehandlung	Gießerei-Industrie: Schmelzen Al-Formguss	Kupfer: Schmelzen, Erwärmen und Wärmebehandlung	Gießerei-Industrie: Schmelzen Gusseisen	Härtereitechnik: Aufkohlen und Austenitisieren	Umformtechnik: Erwärmung Stahlblechzuschnitte	Stahl-Walzwerke: Wärmebehandlung	Keramik- und Ziegelindustrie: Brennen Ziegel und Feuerfest	Glasindustrie: Schmelzen Behälterglas	Glasindustrie: Schmelzen Flachglas	Kalk: Brennen im GGR-Ofen	Kalk: Brennen im Drehrohrofen	Zement: Brennen Zementklinker	Umformtechnik: Diskont. Erwärmung	Umformtechnik: Konti. Erwärmung	Stahl-Walzwerke: Konti. Erwärmung	Kalk: Brennen im Schachtofen	Dampferzeugung
Energieträger Referenztechnik		Gas	Koks				Gas				BS-Mix		Gas		Koks	Gas			
TRL der Alternativtechnologie	Elektrifizierung	9	9	9	9	9	< 4	< 4	4/9 <sup>1)</sup>	< 3	< 3	< 3	< 3	< 2	< 2	< 2	9 <sup>7)</sup>		
	Wasserstoffbeheizung	< 4	< 5	< 5	< 5	< 4	< 5	< 4	< 5	< 4	< 4	< 4	< 4	< 5	< 5	< 4	< 2	9	
	Biomassebeheizung	n.v.	n.v.	n.v.	< 8 <sup>2)</sup>	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	< 6 <sup>2)</sup>	n.b.	n.v.	n.v.	n.v.	< 4 <sup>2)</sup>	9 <sup>8)</sup>	
	Erdgas-/EE-Methanbeheizung	(9)	(9)	(9)	< 8 <sup>3)</sup>	(9)	(9)	(9)	(9)	(9)	(9)	(9)	< 4	n.b.	(9)	(9)	(9)	n.v.	n.v.
	hybride Beheizung (Strom/Erdgas (EE-Methan))	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	< 7 <sup>4)</sup>	< 4 <sup>4)</sup>	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	9	< 3 <sup>5)</sup>	n.v.	n.v.
	hybride Beheizung (Strom/Wasserstoff)	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	< 4 <sup>4)</sup>	< 4 <sup>4)</sup>	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	< 5	< 3 <sup>5)</sup>	n.b.	n.v.
	Hybride Beheizung (Brennstoffmix/Strom)	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	< 5 <sup>6)</sup>	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
	Hybride Beheizung (Biomasse/H <sub>2</sub> /Strom)	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	< 4 <sup>6)</sup>	n.v.	n.v.	n.v.	n.b.	n.v.	n.v.

# These 6: Elektrifizierung ist bei vielen Anwendungen mit niedrigeren Temp. vorteilhaft – H<sub>2</sub> bei sehr hohen Energiedichten

- Der Standort DE ist durch einen sehr **heterogenen Anlagenpark** geprägt, wodurch sich die Anwendungsmöglichkeiten der Alternativtechnologien unterscheiden.
- Der **überwiegende Anteil** der Anlagentypen ist **fossil, mit Erdgas beheizt**. Einige Anlagentypen werden mit festen Brennstoffen (Koks, Kohle, Restbrennstoffe) beheizt. Wenige Anlagen werden vollständig elektrisch oder hybrid betrieben.
- **Elektrische Beheizungstechnologien** gehören insbesondere in Anwendungen der Metallindustrie zum Stand der Technik. Grenzen elektrischer Beheizungstechnologien liegen vor allem in der Leistungsdichte und Anwendungstemperatur.
- Der Einsatz von **Wasserstoff** ist grundsätzlich für alle gasbeheizten Anwendung denkbar. Einzelne Komponenten (bspw. Brenner) besitzen ein hohes TRL. Das Gesamtsystem muss erprobt werden.
- Der Einsatz von **EE-Methan** ist grundsätzlich für alle mit Erdgas beheizten Anlagen möglich, jedoch energetisch und wirtschaftlich zu hinterfragen.
- **Biogene Brennstoffe** können fossile Festbrennstoffe ersetzen, sofern diese in ausreichender Qualität zur Verfügung stehen.
- Der Einsatz **hybride Beheizungstechnologien** ist grundsätzlich denkbar. Das TRL ist gleich oder geringer als das der einzelnen Technologien einzuschätzen, der Aufwand zur industriellen Umsetzung größer.



# Wir untersuchen zwei Dimensionen der wirtschaftlichen Bewertung

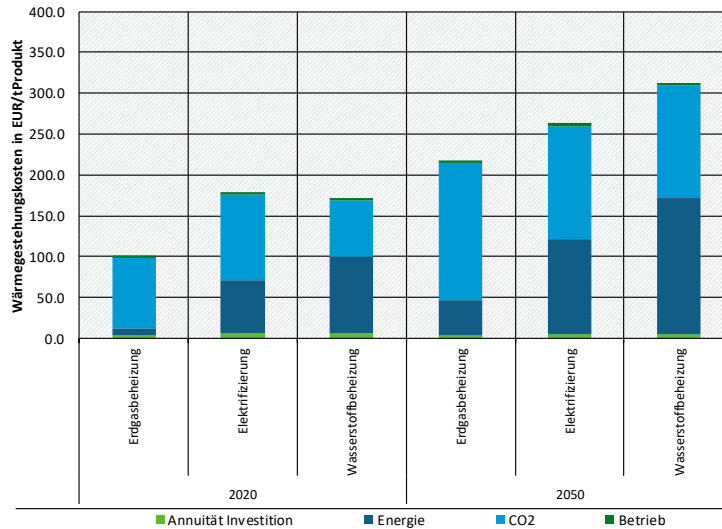


- Modernisierungszyklen
  - Orientieren sich an Abschreibungszeiträumen
  - Vorzeitiger Austausch von Anlagen ist eine Option (und in vielen Fällen notwendig)
- Wärmegestehungskosten
  - Investition, Energie, CO<sub>2</sub>, Betrieb und Wartung
  - Differenz zu Referenztechnologie ist maßgeblich

# Dimension 1: Wärmegestehungskosten bestimmen die Attraktivität der Techniken

## Kalkindustrie

Kontinuierliches Brennen Kalk mit mittlerer/hoher Reaktivität



Eigene Berechnung Fraunhofer ISI

- Konventionelle Technik (Erdgas) ist auch bis 2050 im Referenzfall deutlich wirtschaftlich.
- CO<sub>2</sub>-Preise können Energieträger-Kostendifferenz bei Weitem nicht ausgleichen.
- Hohe Kostenbelastung durch CO<sub>2</sub>-Bepreisung prozessbedingter Emissionen.

## Referenzfall

Gas: 30€/MWh  
 Strom: 124 €/MWh  
 CO<sub>2</sub>: 125€/t

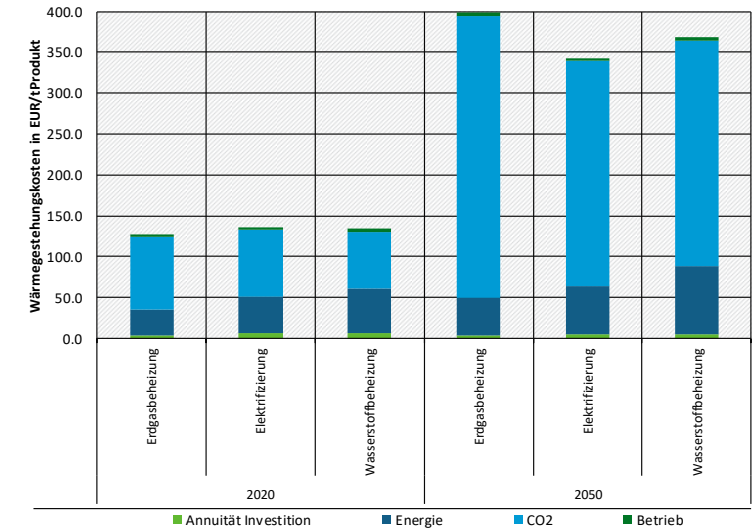
## Transformation

Gas: 37€/MWh  
 Strom: 62 €/MWh  
 CO<sub>2</sub>: 300€/t

Angenommene, nicht der aktuellen Realität entsprechende Rahmenbedingungen!

## Kalkindustrie

Kontinuierliches Brennen Kalk mit mittlerer/hoher Reaktivität



Eigene Berechnung Fraunhofer ISI

- Im Transformationsfall (hohe CO<sub>2</sub>-Preise!) wird die Referenztechnik unwirtschaftlich.
- Elektrifizierung ist wirtschaftlichste Option (verfügbar ab 2030).
- Enorme Kostenbelastung durch prozessbedingte Emissionen.

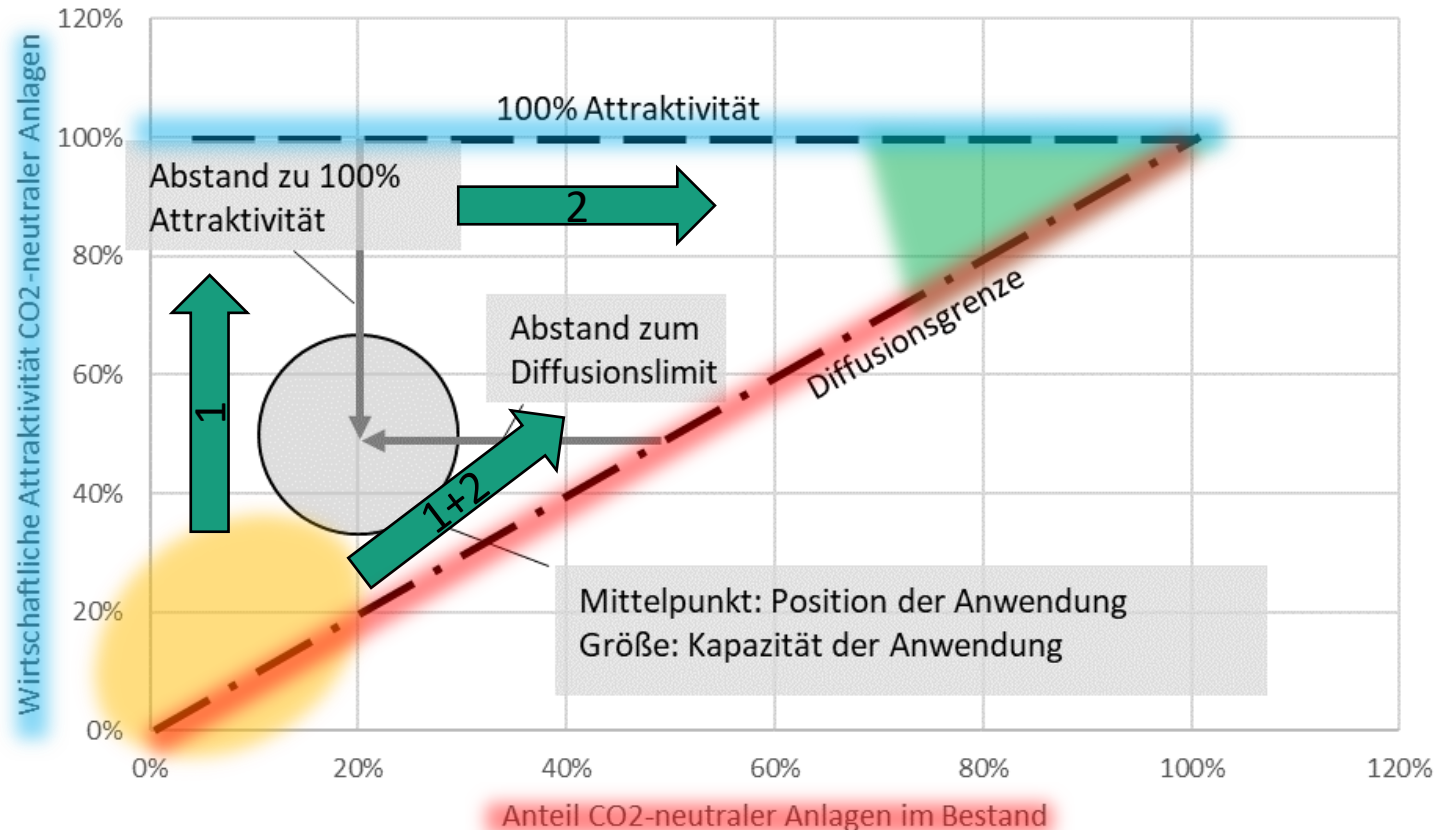
# Dimension 2: Modernisierungszyklen bestimmen die Austauschrate der Anlagen

#	Anwendung	Lebensdauer	Lebensende bei Invest															
			2020	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050	2055	2060	2065	2070	2075			
1	Milchpulverherstellung	20	2040															
2	Papier Trocknung	20	2040															
3	Chemiepark-Dampfversorgung	20	2040															
4	Kontinuierliches Erwärmen Flach-/Langstahl	35	2055															
5	Kontinuierliche Wärmebehandlung Flachstahl	35	2055															
6	Diskontinuierliche Wärmebehandlung Flachstahl	35	2055															
7	Kontinuierliches Schmelzen Gusseisen (hohe Kapazität)	43	2063															
8	Kontinuierliches Schmelzen Gusseisen (mittlere Kapazität)	50	2070															
9	Kontinuierliches Schmelzen Gusseisen (geringe Kapazität)	47	2067															
10	Kontinuierliches Schmelzen Aluminium Formguss	30	2050															
11	Diskontinuierliches Schmelzen/Warmhalten Halbzeugguss Aluminium	30	2050															
12	Kontinuierliches Homogenisieren/Erwärmen Alu Band/Profile	35	2055															
13	Diskontinuierliches Homogenisieren/Erwärmen Alu Band/Profile	30	2050															
14	Kontinuierliche Wärmebehandlung Alu Band	30	2050															
15	Kontinuierliches Schmelzen Kupfer Gießwalzdraht	50	2070															
16	Kontinuierliches Erwärmen Kupfer-Halbzeug für Warmumformung (geringe Kapazität)	20	2040															
17	Kontinuierliches Erwärmen Kupfer-Halbzeug für Warmumformung (hohe Kapazität)	48	2068															
18	Diskontinuierliche Wärmebehandlung Kupfer-Halbzeug (geringe Kapazität)	35	2055															
19	Diskontinuierliche Wärmebehandlung Kupfer-Halbzeug (hohe Kapazität)	35	2055															
20	Kontinuierliche Erwärmung Schmiedebauteile	30	2050															
21	Diskontinuierliche Erwärmung Schmiedebauteile	30	2050															
22	Kontinuierliche Erwärmung Stahlblechzuschnitte	30	2050															
23	Kontinuierliches Aufkohlen und Austenitisieren (Lohnhärtereien)	30	2050															
24	Kontinuierliches Aufkohlen und Austenitisieren (Betriebshärtereien)	30	2050															
25	Diskontinuierliches Aufkohlen und Austenitisieren	30	2050															
26	Kontinuierliches Schmelzen Behälterglas	15	2035															
27	Kontinuierliches Schmelzen Flachglas	15	2035															
28	Kontinuierliches Brennen Ziegel	30	2050															
29	Kontinuierliches Brennen Feuerfeststeine	30	2050															
30	Diskontinuierliches Brennen Feuerfeststeine	30	2050															
31	Kontinuierliches Brennen Kalk mit niedriger Reaktivität	60	2080															
32	Kontinuierliches Brennen Kalk mit mittlerer/hoher Reaktivität	45	2065															
33	Kontinuierliches Brennen Kalk mit hohem Durchsatz	50	2070															
34	Kontinuierliches Brennen Zementklinker	60	2080															

- Investitionen in fossile Anlagen werden nicht das Ende ihrer technischen Lebensdauer erreichen.
- Bestandsanlagen deutlich vor 2000 sind gefährdet, Transformation kann nicht entlang von im üblichen Rhythmus errichteten Neuanlagen erfolgen – muss als Umrüstung oder vorzeitige Reinvestition geschehen.
- Niedrigschwelligem Brennstoffwechsel kommt daher besondere Bedeutung zu.
- Notwendiger Umbau für CCU/CCS stellt Gelegenheit dar, um auch die Wärmebereitstellung zu transformieren.
- Empfehlung:
  - Standortspezifisch Verfügbarkeit prüfen.
  - Elektrifizierung ernsthaft berücksichtigen.
  - Adressierung von energiebedingten und prozessbedingten Emissionen zusammen denken.



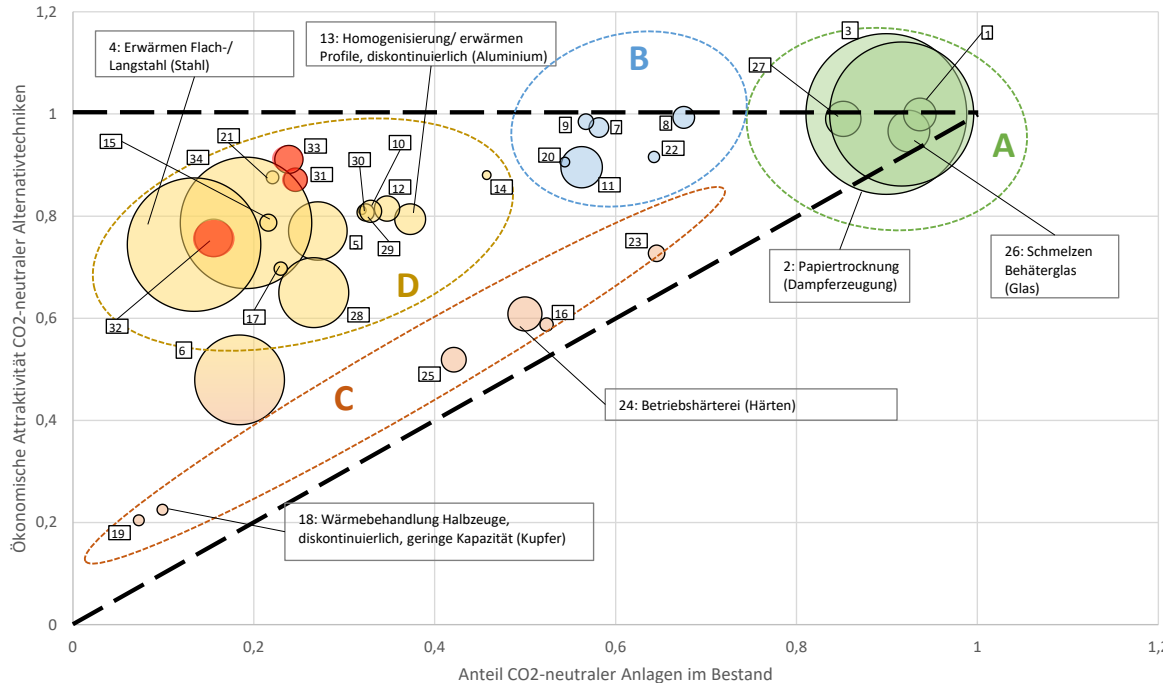
# Erläuterung Diffusionsabbildung



## ■ Kernbotschaften

- Es ist eine Vereinfachung!
- Wir zeigen **Attraktivität** und **Diffusion** als unterschiedliche **Dimensionen**.
- **Y-Achse:** hohe Attraktivität bedeutet hohe Wirtschaftlichkeit ggü. Alternativen
- **X-Achse, Diffusion durch den Anlagenbestand:**
  - Attraktivität ist Voraussetzung
  - Kurze Lebensdauer/ Modernisierungszyklen beschleunigen

# These 9: Diffusion/Attraktivität CO<sub>2</sub>-neutraler Anlagen 2040



## Transformationszenario, 2040

- 300€/t<sub>CO2</sub>
- Strompreis 50-65€/MWh

- A ("Advantaged": im Vorteil): Anwendungen, die früh wirtschaftlich attraktive CO<sub>2</sub>-neutrale Techniken zur Verfügung haben und durch geringe Anlagenlebensdauern vergleichsweise schnell wechseln können. Diese Anwendungen können dadurch im maximalen Reformpaket eine (beinahe) vollständige Dekarbonisierung erreichen (2040 über 80 % Diffusion). Maßgeblich vertreten sind hier Glasherstellung und Dampferzeugung.
- B ("Boosted": auf dem Weg, aber noch nicht ganz da): Anwendungen, die 2040 zwar attraktive CO<sub>2</sub>-neutrale Techniken zur Verfügung haben, aber durch höhere Anlagenlebensdauern (oder eine spätere Verfügbarkeit der Techniken) eine geringere Diffusion aufweisen. Politische Maßnahmen zur Beschleunigung der Diffusion ab etwa 2030 können die Anwendungen dieser Gruppe besonders begünstigen. Maßgeblich vertreten sind hier Gießereien und Umformtechnik.
- C ("Cornered": mit mangelnden Handlungsoptionen): Anwendungen, die die ihnen mögliche Diffusion vergleichsweise stark ausnutzen, deren zur Verfügung stehenden CO<sub>2</sub>-neutralen Techniken aber wenig attraktiv sind. Diese Gruppe benötigt vor allem Preissignale, um CO<sub>2</sub>-neutrale Techniken attraktiver zu machen. Maßgeblich hier vertreten sind Kupferverarbeitung und Härtereien.
- D ("Delayed": **verzögert**): Eine Mischung der Merkmale der Gruppen B und C. Es mangelt sowohl an **wirtschaftlichen CO<sub>2</sub>-neutralen Techniken** (die fossile Techniken vollständig verdrängen könnten) als auch einer schnellen Diffusion. Obwohl eine Verbesserung beider Aspekte für Anwendungen dieser Gruppe notwendig ist, um eine dekarbonisierte Prozesswärmeerzeugung zu ermöglichen, ist die **Beschleunigung des Anlagenaustauschs** besonders relevant. Maßgeblich hier vertreten sind Zement, Kalk, Aluminium und Stahl.

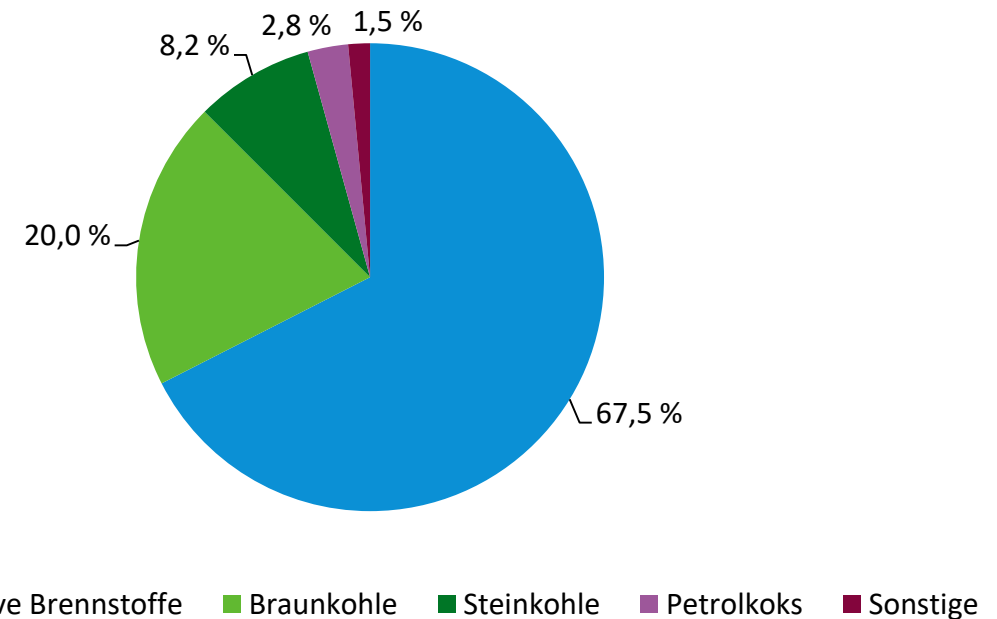
---

## Ergebnisse Teil II: Branche Zement

# Kurzbeschreibung der Branche und Fokus der Studie

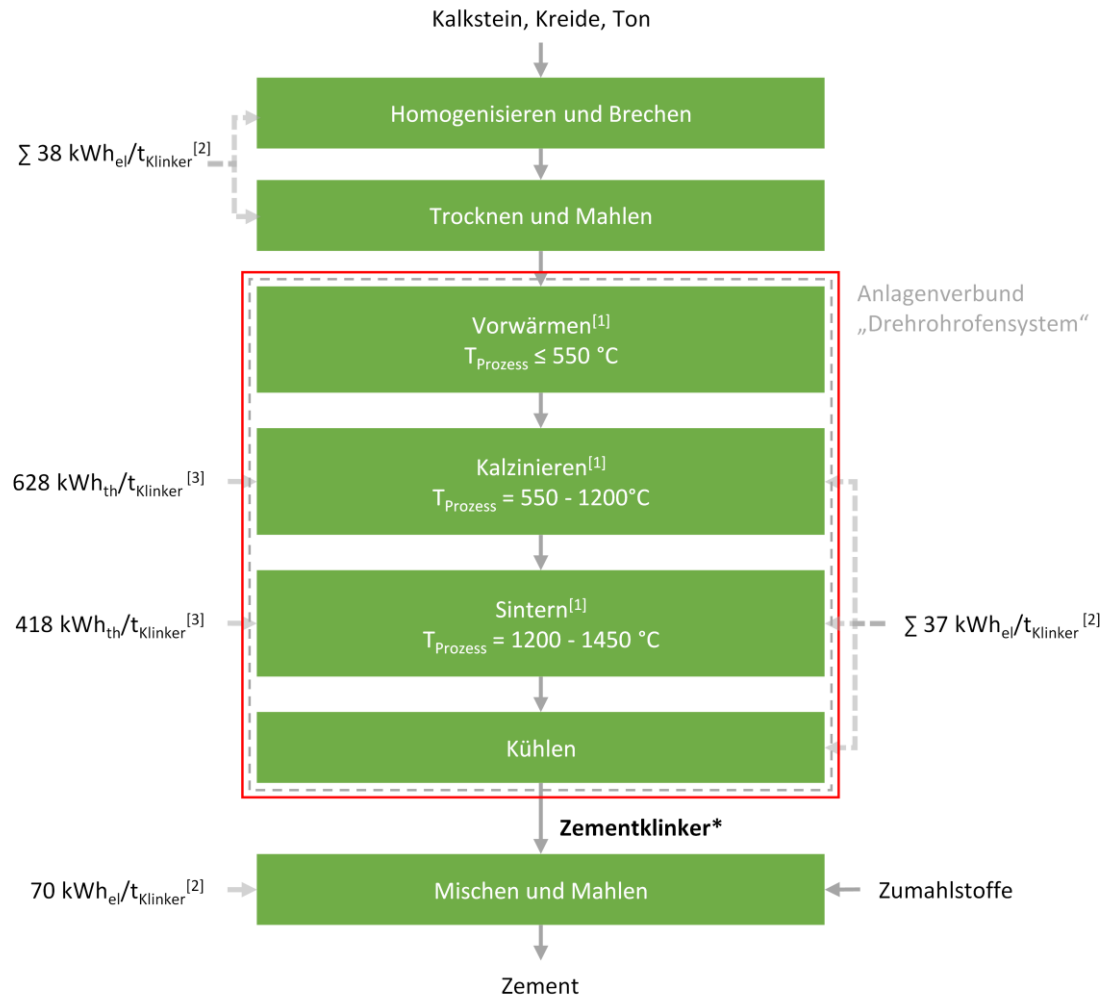
- 2018 wurden circa 33,7 Mio. t Zement und davon 24,5 Mio. t Zementklinker hergestellt
- 2018 waren in Deutschland circa 8.100 Menschen in 53 Zement-Werken beschäftigt
- Verbrauch:
  - 34,5 % Tiefbau
  - 33,5 % Nichtwohnbau
  - 32,0 % Wohnungsbau
- Besonders energieintensiv: Energiekostenanteil an der Bruttowertschöpfung von über 50 %

Verteilung des Brennstoffeinsatzes nach Energieträgern bezogen auf den gesamten Brennstoffenergieverbrauch in der Zementindustrie in Deutschland (2018)



eigene Darstellung nach, Quelle: (Verein Deutscher Zementwerke e.V. (VDZ) 2019b)  
gesamter Brennstoffenergieverbrauch 96 Mio. GJ/a

# Prozessketten und Produkte: Zementherstellung



## Legende:

Rot markiert: Energieintensive Prozessschritte mit fossilen Energieträgern im Fokus der Betrachtungen innerhalb dieser Studie

\* Bezugsgröße

## Anmerkungen:

th. = thermisch; el. = elektrisch

Quellen (eigene Darstellung nach):

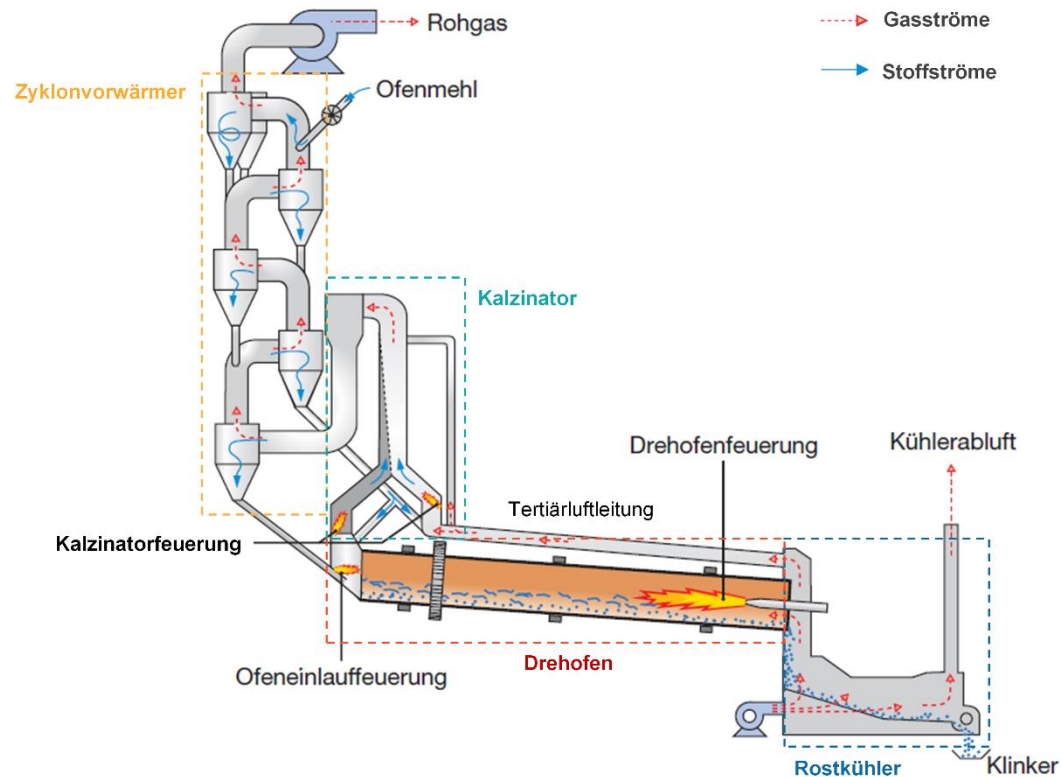
[1] Temperatur nach (Hoenig et al. 2019)

[2] Elektrischer Energiebedarf nach (Verein Deutscher Zementwerke e.V. (VDZ) 2020b)  $110,9 \text{ kWh}/t_{Zement}$ , davon 25 % Rohmaterialaufbereitung, 24 % Brennen und Kühlen des Klinkers, 46 % Mahlung der Zemente, Klinkerfaktor von 0,71

[3] Thermischer Energiebedarf von  $1046 \text{ kWh}/t_{Klinker}$  nach (WBCSD Cement Sustainability Initiative 2018a) davon bis zu 60 % im Kalzinator nach (Verein Deutscher Zementwerke e.V. (VDZ) 2002)

# Thermoprozessanlagen (exemplarisch, nicht maßstabsgetreu)

## Drehofenanlage mit Zyklonvorwärmer, Kalzinator und Tertiärluftleitung



Anmerkung: Beispiel für eine Ausführung mit zwei Kalzinatorfeuerungen und zusätzlicher Ofeneinlauffeuerung. Bei Drehrohrofensystemen ohne Kalzinator entfällt dieser und die damit verbundene Tertiärluftleitung.

Quelle: erweiterte Darstellung nach (Hoenig et al. 2015)

## Eingesetzte Anlagen in der Zementindustrie in Deutschland

Anlagentyp	Komponenten	Anzahl*
Drehrohrofensystem mit Rostvorwärmer	Rostvorwärmer, Drehrohrföfen, Rostkühler	5
Drehrohrofensystem mit Zyklonvorwärmer (mit und ohne Kalzinator)	Zyklonvorwärmer, (Kalzinator), Drehrohrföfen, Rostkühler	36

Anmerkungen: \*Die gesamte Produktionsmenge wird mit 24,5 Mio. t/a angegeben (Verein Deutscher Zementwerke e.V. 2019b).

Nach (WBCSD Cement Sustainability Initiative 2018d) werden in Deutschland 16,0 Mio. t/a (ca. 67 %) in Anlagen ohne Kalzinator und 7,7 Mio. t/a (ca. 33 %) in Anlagen mit Kalzinator hergestellt.

# Auswahl der Anwendungen und Referenztechniken anhand von Energieverbrauch und CO<sub>2</sub>-Emissionen

Abschätzung charakteristischer Anlagenkennzahlen zur Auswahl der betrachteten Anwendungen und Referenztechniken „Zementindustrie“ in DE

Anlagentypen	Jährlicher Anlagendurchsatz		Jährlicher Energieverbrauch		Energiebedingte CO <sub>2</sub> -Emissionen*	
	Gesamt	Anteil	Gesamt	Anteil	Gesamt	Anteil
<b>Drehrohrofen</b>	24,5 Mio. t	100 %	20.335 - 29.400 GWh	100 %	5.110 - 7.388 Tsd. t	100 %
<b>Verteilung</b>						
Anteil Anlagen mit elektrischer Energie beheizt				< 1 %	< 1 %	
Anteil Anlagen mit fossiler Energie beheizt (inkl. sekundärer Brennstoffe)				> 99 %	> 99 %	
<b>Davon im Rahmen der Studie betrachteten Anlagentypen (fett)</b>				<b>&gt; 99 %</b>	<b>&gt; 99 %</b>	

Erweiterte Darstellung und Datenbasis siehe Anhang A.11.2 (Daten aus 2018 und 2019)

Legende: fettgedruckt: Anlagentypen, die im Rahmen der Studie weiter betrachtet werden

\* Die prozessbedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen betragen ca. 13.352,50 Tsd. t CO<sub>2</sub>

\*\* Mittelwerte für Anlagen mit und ohne Kalzinator nach dem Stand der Technik

Quellen: (Verein Deutscher Zementwerke e.V. (VDZ) 2019b; VDI 2094:2021-01; WBCSD Cement Sustainability Initiative 2018a, 2018b; ProBas Datenbank des Umweltbundesamtes 2020; Umweltbundesamt (UBA) 2020)

# Betrachtete Anwendungen und Referenztechniken

---

Referenztechnik	
Definition	kontinuierlicher Brennofen Zementklinker brennstoffmixbeheizt
Anwendung	kontinuierliches Brennen Zementklinker ( $T_{\text{Prozess,Max}} \approx 1550^{\circ}\text{C}$ )
Thermoprozessanlage(n)	Drehrohrofensystem
Beheizungstechnologie(n)	Brennstoffmixbeheizung <sup>1)</sup>

1) Zusammensetzung: alternative Brennstoffe (67,5 %); Braunkohle (20 %); Steinkohle (8,2 %); Petrolkoks (2,7 %); Heizöl EL (0,7 %); Erdgas und andere Gase (0,6 %); Heizöl S (0,2 %); sonstige fossile Brennstoffe (0,1 %)



# Definition von Alternativtechniken

---

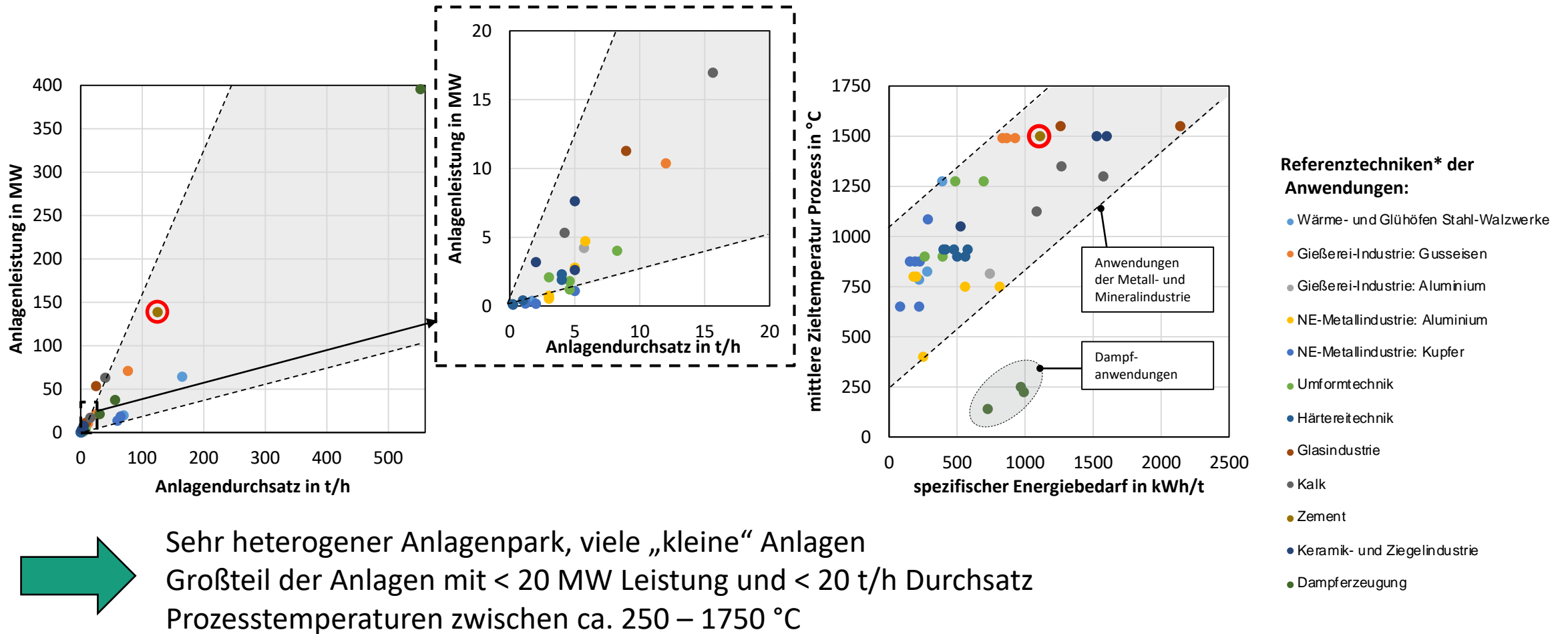
Technik und Technologie	
<i>Referenztechnik</i>	kontinuierlicher Brennofen Zementklinker brennstoffmixbeheizt
Alternative Beheizungstechnologie(n)	Elektrifizierung (vollständig, Plasmabrenner) Wasserstoffbeheizung (vollständig) hybride Beheizung (Brennstoffmix/Strom (widerstandsbeheizter Kalzinator)) hybride Beheizung (Mehrkanalbrenner (70 % Biomasse, 20 % H <sub>2</sub> ) und Plasmabrenner (10 % elektrische Energie))
Alternativtechnik(en)	kontinuierliches Brennen Zementklinker mit elektrischer Beheizung kontinuierliches Brennen Zementklinker mit Wasserstoffbeheizung konti. Brennen Zementklinker mit hybrider Beheizung (Brennstoffmix/Strom) konti. Brennen Zementklinker mit hybrider Beheizung (Biomasse/H <sub>2</sub> /Strom)

# Erhebung von Kenndaten: Zementindustrie

Technik	Referenztechnik	Alternativtechnik 1	Alternativtechnik 2	Alternativtechnik 3	Alternativtechnik 4	Einheit	Quellen
<b>Beheizungstechnologie</b>	<b>Brennstoffmixbeheizung</b>	<b>Elektrifizierung</b>	<b>Wasserstoffbeheizung</b>	<b>Hybride Beheizung</b>	<b>Hybride Beheizung</b>		
<b>Thermoprozessanlagen</b>	Drehrohrofensystem	Drehrohrofensystem	Drehrohrofensystem	Drehrohrofensystem	Drehrohrofensystem		
Produkt	Zementklinker						
Investition Neubau	86,0	251,9	86,0	86,0	86,0	EUR/t <sub>Kap.</sub>	[1, 5, 6]
Investition Modernisierung	53,7	157,4	53,7	53,7	53,7	EUR/t <sub>Kap.</sub>	[1, 5]
Minimale Investition Neubau	64,5	251,9	64,5	64,5	64,5	EUR/t <sub>Kap.</sub>	[1, 5]
Min. Investition Modernisierung	21,5	157,4	21,5	21,5	21,5	EUR/t <sub>Kap.</sub>	[1, 5]
TRL	9	< 3	< 4	< 5	< 4	-	[1, 5]
Energieträger 1	Abfall, nicht erneuerbar	Strom	EE-Wasserstoff	Strom	Biomasse	-	
Energieträger 2	Abfall, erneuerbar	keiner	keiner	Braunkohle	EE-Wasserstoff	-	
Energieträger 3	Braunkohle	keiner	keiner	Abfall, erneuerbar	Strom	-	
Spezifischer Energiebedarf 1	0,487	1,222	1,111	0,667	0,778	MWh/t <sub>pr.</sub>	[1-3, 5-7]
Spezifischer Energiebedarf 2	0,262	0,000	0,000	0,361	0,222	MWh/t <sub>pr.</sub>	[1, 2, 7]
Spezifischer Energiebedarf 3	0,361	0,000	0,000	0,083	0,144	MWh/t <sub>pr.</sub>	[2, 7]
Min. spezifischer Energiebedarf	1,110	1,222	1,111	1,111	1,144	MWh/t <sub>pr.</sub>	
Prozessbedingte Emissionen	0,530	0,530	0,530	0,530	0,530	t <sub>CO2</sub> /t <sub>pr.</sub>	[4]
Betriebs- und Wartungskosten	4,7	13,9	4,7	4,7	4,7	EUR/t <sub>Kap.</sub>	[1]
Abschreibungszeitraum	25	25	25	25	25	a	
Lebensdauer	60	60	60	60	60	a	[5]
Repräsentative Kapazität	930.000	930.000	930.000	930.000	930.000	t <sub>Jahresleistung</sub>	[1]
Auslastung	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	1,00	[1]
Anteil Bestand 2020	100 %	0 %	0 %	0 %	0 %	%	[1]
Verfügbar ab	2020	2040	2030	2030	2030		[1, 5, 6]
Verfügbar bis	2050	2050	2050	2050	2050		

Annahmen, Legende und Quellen siehe Bericht

# These 1: Der Anlagenpark der Industrieöfen ist heterogen



Detaillierte Annahmen, Legende und Quellen siehe Bericht

# These 2: Die Umstellung auf eine THG-neutrale Prozesswärmeerzeugung ist bis 2045 technisch realisierbar

- **Elektrische Beheizungstechnologien** sind für einige Anwendungen der **Metallindustrie** bereits Stand der Technik (TRL = 9), sie werden im Anlagenpark in Deutschland jedoch vielfach nicht eingesetzt.
- **Elektrische Beheizungstechnologien** sind in für die Anwendungen der **Mineralindustrie** nicht Stand der Technik vorhanden (TRL < 3). Insbesondere die hohen Prozesstemperaturen für das Brennen und Schmelzen > 1200 °C lässt sich gegenwärtig mit elektrischen Beheizungstechnologien nicht erreichen.
- **Hybride Beheizungstechnologien (anteilige Elektrifizierung)** sind für Anwendungen mit hohen Prozesstemperaturen von Bedeutung. Für spezielle Anwendungen (bspw. Glas (als elektrische Zusatzheizung), oder in der Umformtechnik) sind sie Stand der Technik. Insbesondere für Anwendungen mit großen Kapazitäten (Glas, Zement, Stahl-Walzwerke) werden diese Konzepte jedoch (noch) nicht eingesetzt (TRL < 3 – 7).
- Einsatz von **Wasserstoff** besitzt für nahezu alle betrachteten Anwendungen aus technischer Sicht großer Potential. Mangels Verfügbarkeit von Wasserstoff konnte die Einsatzfähigkeit in Pilot- oder Demonstrationsanlagen bisher vielfach (noch) nicht ausreichend erprobt werden (TRL < 2 – 5). Einzelne Komponenten (bspw. Brenner) haben vielfach jedoch bereits ein deutlich höheres TRL.
- Beim Einsatz von **Biomasse** ist vor allem die Qualität des Brennstoffes ausschlaggebend. Der Einsatz wurde im großtechnischen Maßstab für die betrachteten Anwendungen bisher nicht erprobt (TRL < 4 – 8).
- Der Einsatz von **EE-Methan** ist aus technischer Sicht dem von Erdgas gleichzusetzen (TRL = 9).

Anmerkungen:

Fokus der Betrachtungen lag auf der Analyse des technischen Potentials einer vollständigen Elektrifizierung als PTH Alternative und dem Einsatz von Wasserstoff als PtG Alternative.

„n.v.“: Keine signifikanten F&E-Aktivitäten für diese Anwendung vorhanden.

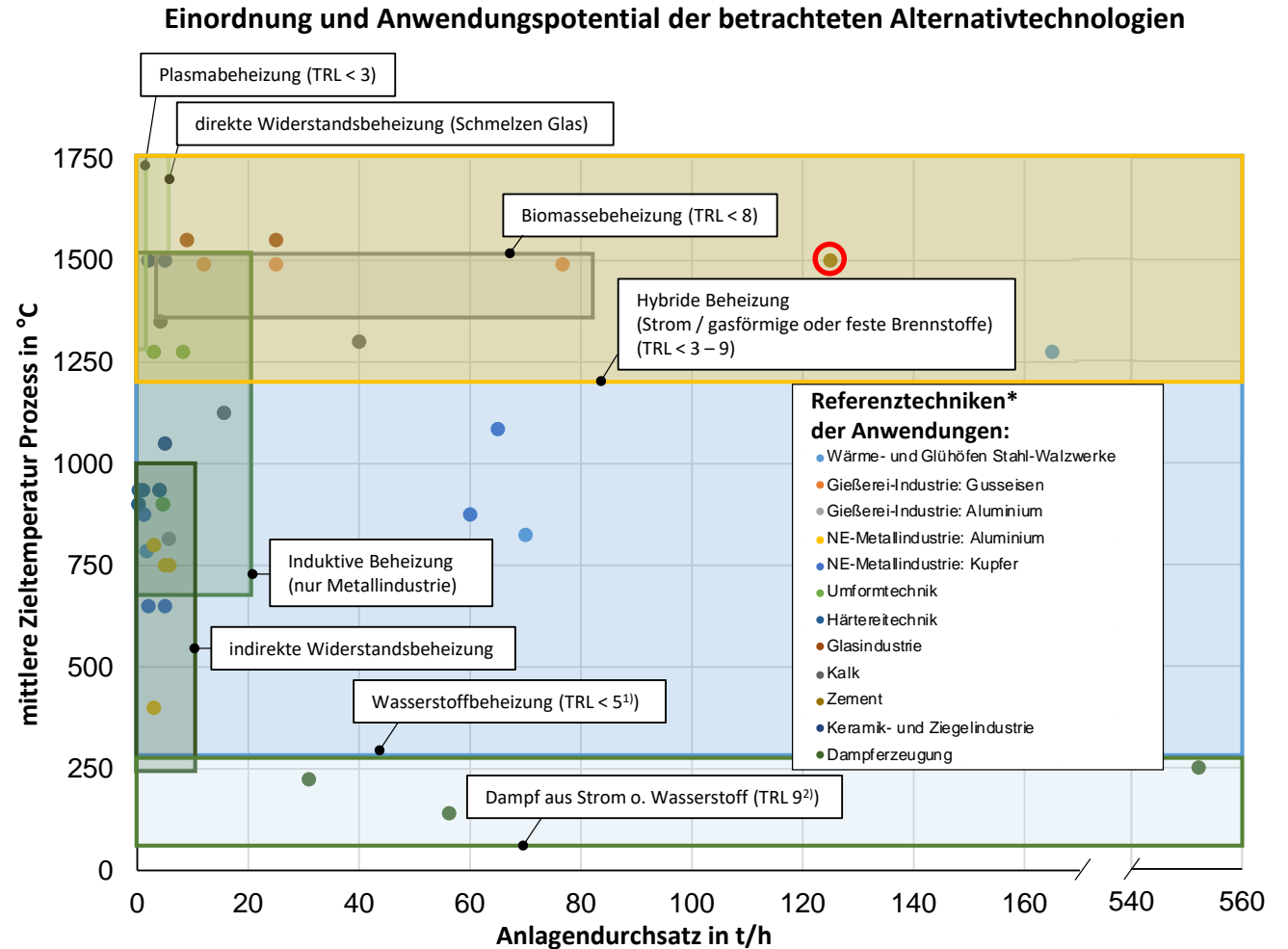
„n.b.“: Anwendung wurde nicht betrachtet. Das TRL der Technologiekombination wird gleich oder geringer als das der Technologie mit jeweils geringeren TRL eingeschätzt.

Weitere Anmerkungen siehe Bericht.

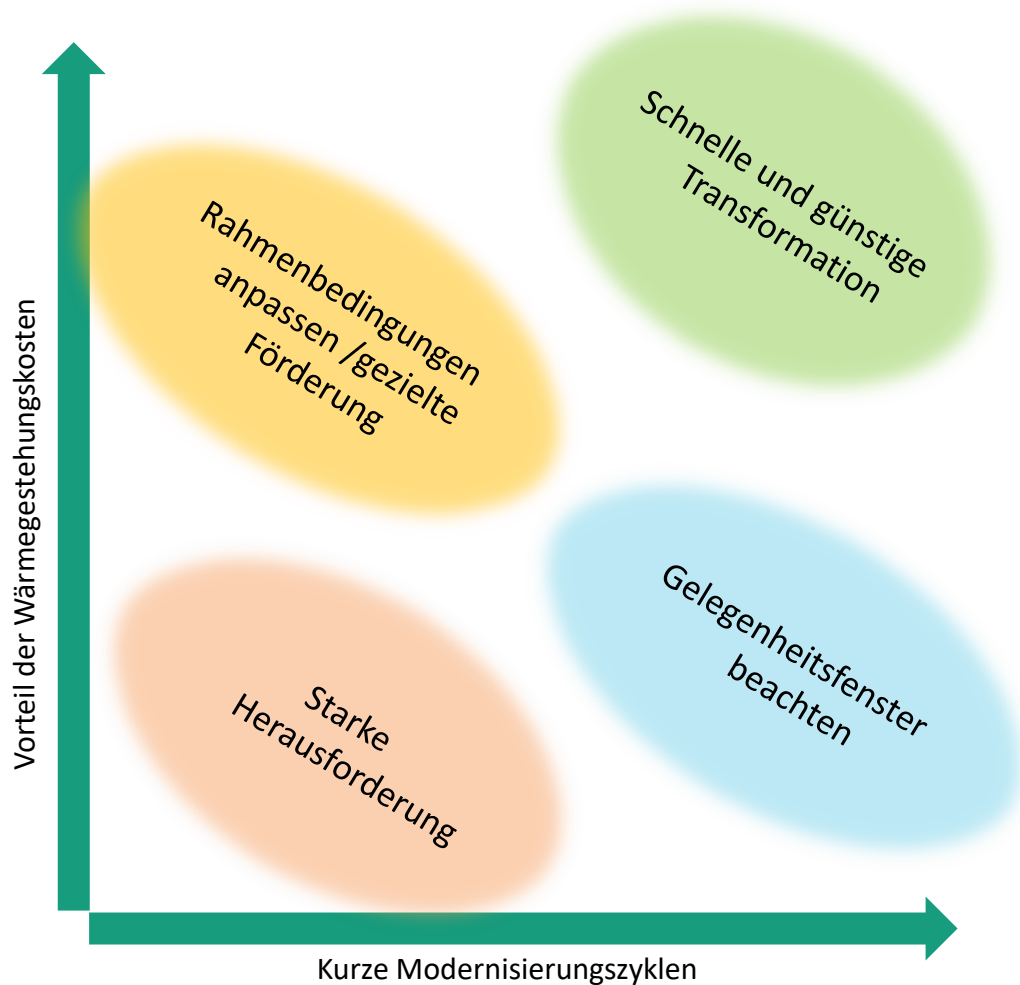
		Branche und Anwendung (zusammengefasst)																	
		Aluminium: Schmelzen, Erwärmen und Wärmebehandlung	Gießerei-Industrie: Schmelzen Al-Formguss	Kupfer: Schmelzen, Erwärmen und Wärmebehandlung	Gießerei-Industrie: Schmelzen Gusseisen	Härterechnik: Aufkohlen und Austenitisieren	Umformtechnik: Erwärmung Stahlblechzuschnitte	Stahl-Walzwerke: Wärmebehandlung	Keramik- und Ziegelindustrie: Brennen Ziegel und Feuerfest	Glasindustrie: Schmelzen Behälterglas	Glasindustrie: Schmelzen Flachglas	Kalk: Brennen im GGR-Ofen	Kalk: Brennen im Drehrohrfen	Zement: Brennen Zementklinker	Umformtechnik: Diskont. Erwärmung	Umformtechnik: Konti. Erwärmung	Stahl-Walzwerke: Konti. Erwärmung	Kalk: Brennen im Schachtofen	Dampferzeugung
Energieträger Referenztechnik		Gas	Koks					Gas				BS-Mix		Gas		Koks	Gas		
TRL der Alternativtechnologie	Elektrifizierung	9	9	9	9	9	< 4	< 4	4/9 <sup>1)</sup>	< 3	< 3	< 3	< 3	< 3	< 2	< 2	< 2	9 <sup>7)</sup>	
	Wasserstoffbeheizung	< 4	< 5	< 5	< 5	< 4	< 5	< 4	< 5	< 4	< 4	< 4	< 4	< 4	< 5	< 5	< 4	< 2	9
	Biomassebeheizung	n.v.	n.v.	n.v.	< 8 <sup>2)</sup>	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	< 6 <sup>2)</sup>	n.b.	n.v.	n.v.	n.v.	< 4 <sup>2)</sup>	9 <sup>8)</sup>
	Erdgas-/EE-Methanbeheizung	(9)	(9)	(9)	< 8 <sup>3)</sup>	(9)	(9)	(9)	(9)	(9)	(9)	(9)	< 4	n.b.	(9)	(9)	(9)	n.v.	n.v.
	hybride Beheizung (Strom/Erdgas (EE-Methan))	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	< 7 <sup>4)</sup>	< 4 <sup>4)</sup>	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	9	< 3 <sup>5)</sup>	n.v.	n.v.
	hybride Beheizung (Strom/Wasserstoff)	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	< 4 <sup>4)</sup>	< 4 <sup>4)</sup>	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	< 5	< 3 <sup>5)</sup>	n.b.	n.v.
	Hybride Beheizung (Brennstoffmix/Strom)	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	< 5 <sup>6)</sup>	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
Hybride Beheizung (Biomasse/H <sub>2</sub> /Strom)	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	< 4 <sup>6)</sup>	n.v.	n.v.	n.v.	n.b.	n.v.	

# These 6: Elektrifizierung ist bei vielen Anwendungen mit niedrigeren Temp. vorteilhaft – H<sub>2</sub> bei sehr hohen Energiedichten

- Der Standort DE ist durch einen sehr **heterogenen Anlagenpark** geprägt, wodurch sich die Anwendungsmöglichkeiten der Alternativtechnologien unterscheiden.
- Der **überwiegende Anteil** der Anlagentypen ist **fossil, mit Erdgas beheizt**. Einige Anlagentypen werden mit festen Brennstoffen (Koks, Kohle, Restbrennstoffe) beheizt. Wenige Anlagen werden vollständig elektrisch oder hybrid betrieben.
- **Elektrische Beheizungstechnologien** gehören insbesondere in Anwendungen der Metallindustrie zum Stand der Technik. Grenzen elektrischer Beheizungstechnologien liegen vor allem in der Leistungsdichte und Anwendungstemperatur.
- Der Einsatz von **Wasserstoff** ist grundsätzlich für alle gasbeheizten Anwendung denkbar. Einzelne Komponenten (bspw. Brenner) besitzen ein hohes TRL. Das Gesamtsystem muss erprobt werden.
- Der Einsatz von **EE-Methan** ist grundsätzlich für alle mit Erdgas beheizten Anlagen möglich, jedoch energetisch und wirtschaftlich zu hinterfragen.
- **Biogene Brennstoffe** können fossile Festbrennstoffe ersetzen, sofern diese in ausreichender Qualität zur Verfügung stehen.
- Der Einsatz **hybride Beheizungstechnologien** ist grundsätzlich denkbar. Das TRL ist gleich oder geringer als das der einzelnen Technologien einzuschätzen, der Aufwand zur industriellen Umsetzung größer.



# Wir untersuchen zwei Dimensionen der wirtschaftlichen Bewertung

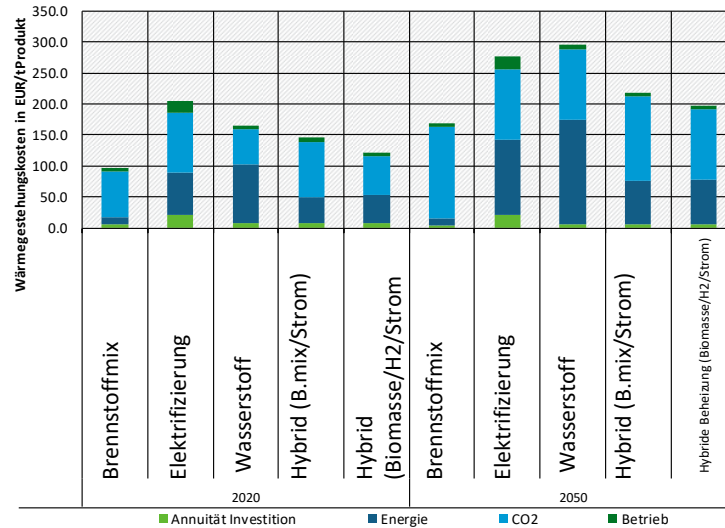


- Modernisierungszyklen
  - Orientieren sich an Abschreibungszeiträumen
  - Vorzeitiger Austausch von Anlagen ist eine Option (und in vielen Fällen notwendig)
- Wärmegestehungskosten
  - Investition, Energie, CO<sub>2</sub>, Betrieb und Wartung
  - Differenz zu Referenztechnologie ist maßgeblich

# Dimension 1: Wärmegestehungskosten bestimmen die Attraktivität der Techniken

## Zementindustrie

Kontinuierliches Brennen Zementklinker



### Referenzfall

Gas: 30€/MWh  
 Strom: 124 €/MWh  
 CO<sub>2</sub>: 125€/t

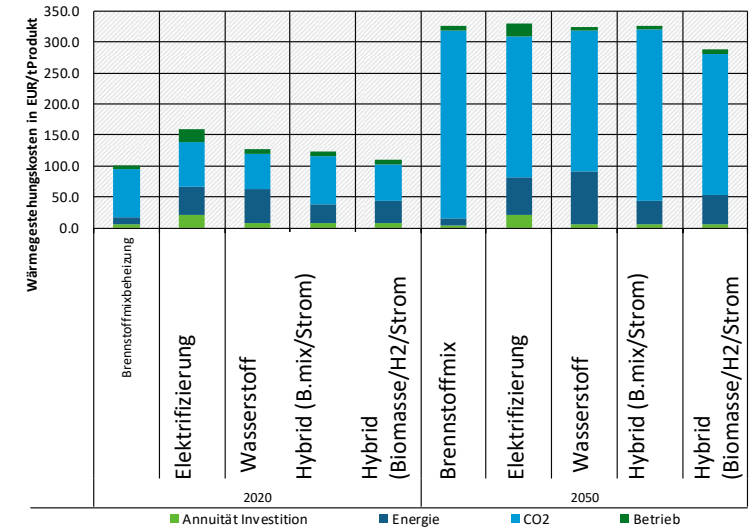
### Transformation

Gas: 37€/MWh  
 Strom: 62 €/MWh  
 CO<sub>2</sub>: 300€/t

Angenommene, nicht der aktuellen Realität entsprechende Rahmenbedingungen!

## Zementindustrie

Kontinuierliches Brennen Zementklinker



- Konventionelle Technik (fossiler Mix) ist auch bis 2050 im Referenzfall konkurrenzfähig.
- CO<sub>2</sub>-Preise können Energieträger-Kostendifferenz nicht ausgleichen.
- Abscheidung prozessbedingter Emissionen in allen Pfaden sinnvoll. Menge durch CO<sub>2</sub>-neutrale Energieträger aber reduziert.

- Im Transformationsfall (hohe CO<sub>2</sub>-Preise!) wird die Referenztechnik knapp ( und spät) unwirtschaftlich.
- Mix aus biogenen Stoffen, H2 und Strom ist attraktiv.
- Enorme Kostenbelastung durch prozessbedingte Emissionen.

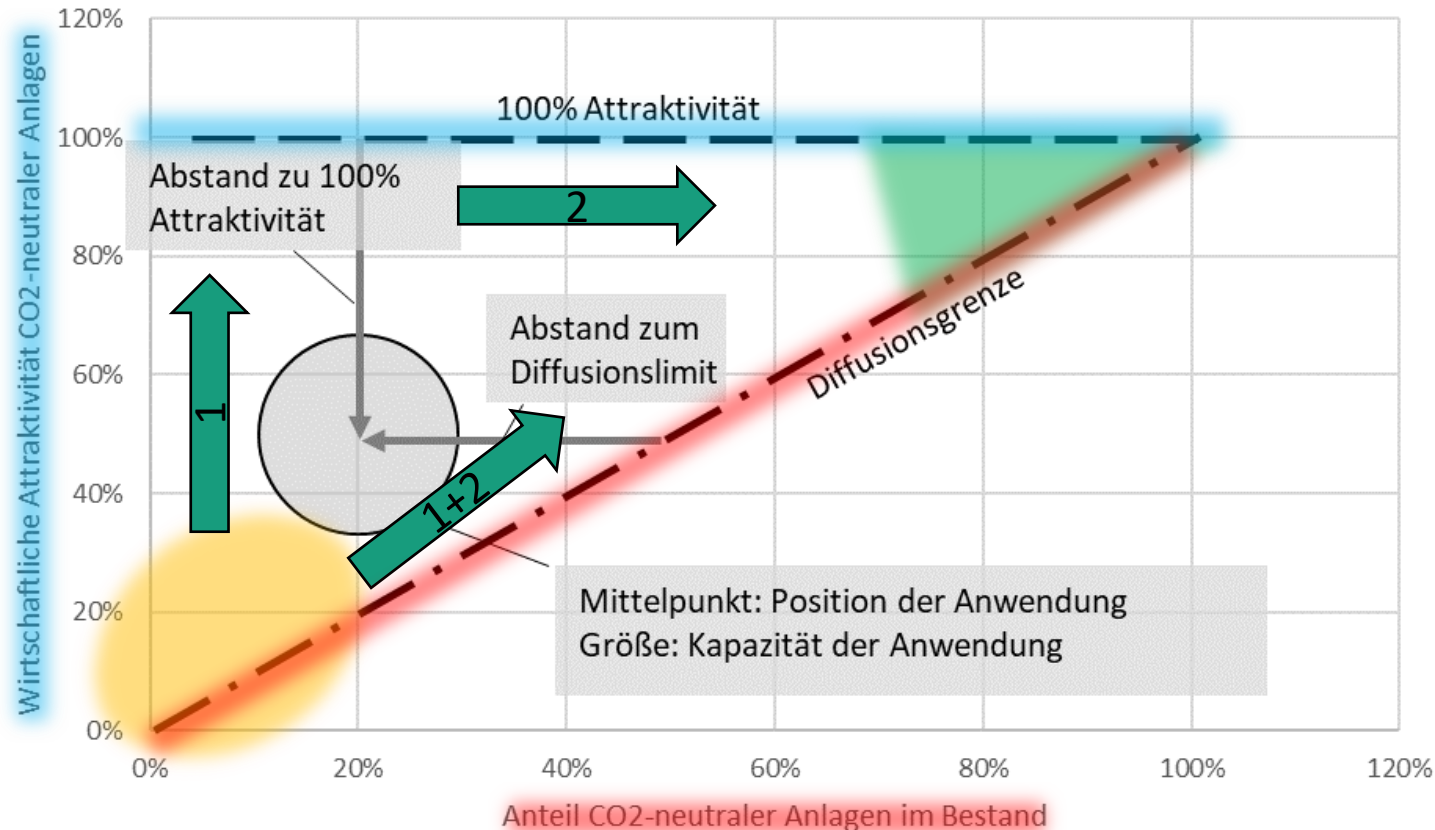
# Dimension 2: Modernisierungszyklen bestimmen die Austauschrate der Anlagen

#	Anwendung	Lebensdauer	Lebensende bei Invest															
			2020	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050	2055	2060	2065	2070	2075			
1	Milchpulverherstellung	20	2040															
2	Papier Trocknung	20	2040															
3	Chemiepark-Dampfversorgung	20	2040															
4	Kontinuierliches Erwärmen Flach-/Langstahl	35	2055															
5	Kontinuierliche Wärmebehandlung Flachstahl	35	2055															
6	Diskontinuierliche Wärmebehandlung Flachstahl	35	2055															
7	Kontinuierliches Schmelzen Gusseisen (hohe Kapazität)	43	2063															
8	Kontinuierliches Schmelzen Gusseisen (mittlere Kapazität)	50	2070															
9	Kontinuierliches Schmelzen Gusseisen (geringe Kapazität)	47	2067															
10	Kontinuierliches Schmelzen Aluminium Formguss	30	2050															
11	Diskontinuierliches Schmelzen/Warmhalten Halbzeugguss Aluminium	30	2050															
12	Kontinuierliches Homogenisieren/Erwärmen Alu Band/Profile	35	2055															
13	Diskontinuierliches Homogenisieren/Erwärmen Alu Band/Profile	30	2050															
14	Kontinuierliche Wärmebehandlung Alu Band	30	2050															
15	Kontinuierliches Schmelzen Kupfer Gießwalzdraht	50	2070															
16	Kontinuierliches Erwärmen Kupfer-Halbzeug für Warmumformung (geringe Kapazität)	20	2040															
17	Kontinuierliches Erwärmen Kupfer-Halbzeug für Warmumformung (hohe Kapazität)	48	2068															
18	Diskontinuierliche Wärmebehandlung Kupfer-Halbzeug (geringe Kapazität)	35	2055															
19	Diskontinuierliche Wärmebehandlung Kupfer-Halbzeug (hohe Kapazität)	35	2055															
20	Kontinuierliche Erwärmung Schmiedebauteile	30	2050															
21	Diskontinuierliche Erwärmung Schmiedebauteile	30	2050															
22	Kontinuierliche Erwärmung Stahlblechzuschnitte	30	2050															
23	Kontinuierliches Aufkohlen und Austenitisieren (Lohnhärtereien)	30	2050															
24	Kontinuierliches Aufkohlen und Austenitisieren (Betriebshärtereien)	30	2050															
25	Diskontinuierliches Aufkohlen und Austenitisieren	30	2050															
26	Kontinuierliches Schmelzen Behälterglas	15	2035															
27	Kontinuierliches Schmelzen Flachglas	15	2035															
28	Kontinuierliches Brennen Ziegel	30	2050															
29	Kontinuierliches Brennen Feuerfeststeine	30	2050															
30	Diskontinuierliches Brennen Feuerfeststeine	30	2050															
31	Kontinuierliches Brennen Kalk mit niedriger Reaktivität	60	2080															
32	Kontinuierliches Brennen Kalk mit mittlerer/hoher Reaktivität	45	2065															
33	Kontinuierliches Brennen Kalk mit hohem Durchsatz	50	2070															
34	Kontinuierliches Brennen Zementklinker	60	2080															

- Investitionen in fossile Anlagen werden nicht das Ende ihrer technischen Lebensdauer erreichen.
- Bestandsanlagen deutlich vor 2000 sind gefährdet, Transformation kann nicht entlang von im üblichen Rhythmus errichteten Neuanlagen erfolgen – muss als Umrüstung oder vorzeitige Reinvestition geschehen.
- Niedrigschwelligem Brennstoffwechsel kommt daher besondere Bedeutung zu.
- Notwendiger Umbau für CCU/CCS stellt Gelegenheit dar, um auch die Wärmebereitstellung zu transformieren.
- Empfehlung:
  - Standortspezifisch Verfügbarkeit prüfen.
  - Elektrifizierung ernsthaft berücksichtigen.
  - Adressierung von energiebedingten und prozessbedingten Emissionen zusammen denken.



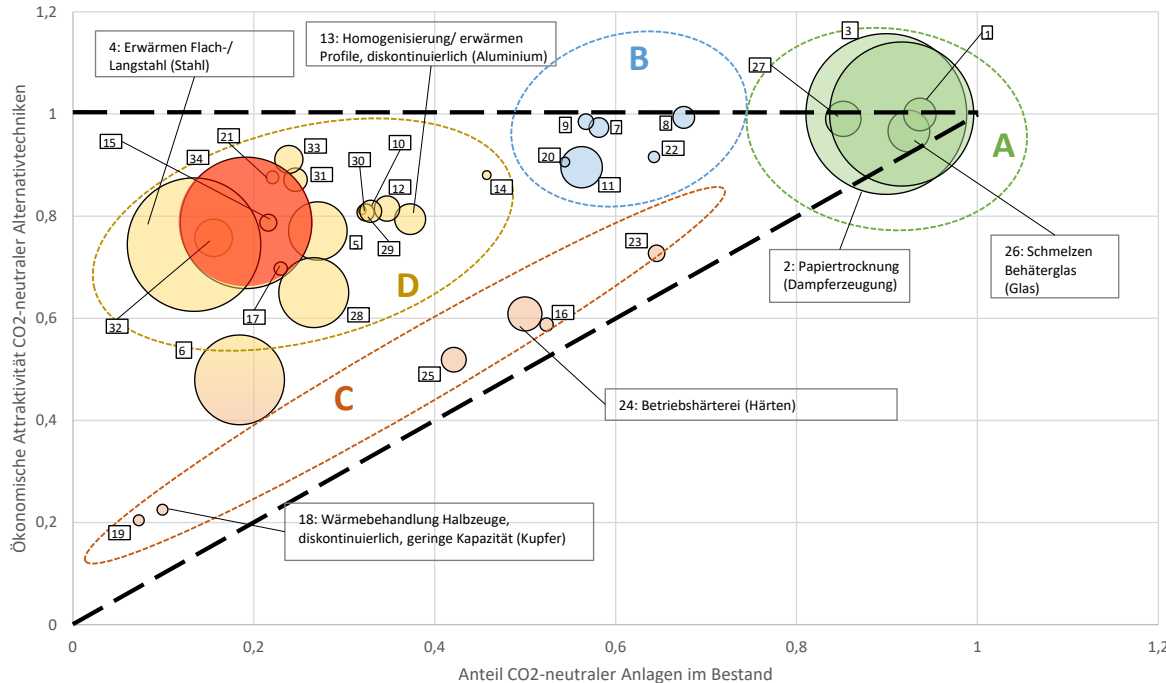
# Erläuterung Diffusionsabbildung



## ■ Kernbotschaften

- Es ist eine Vereinfachung!
- Wir zeigen **Attraktivität** und **Diffusion** als unterschiedliche **Dimensionen**.
- Langfristig begrenzt die Attraktivität die Diffusion.
- Unten links ist schlecht, **oben rechts ist gut** 😊

# These 9: Diffusion/Attraktivität CO<sub>2</sub>-neutraler Anlagen 2040



## Transformationszenario, 2040

- 300€/t<sub>CO2</sub>
- Strompreis 50-65€/MWh

- A ("Advantaged": im Vorteil): Anwendungen, die früh wirtschaftlich attraktive CO<sub>2</sub>-neutrale Techniken zur Verfügung haben und durch geringe Anlagenlebensdauern vergleichsweise schnell wechseln können. Diese Anwendungen können dadurch im maximalen Reformpaket eine (beinahe) vollständige Dekarbonisierung erreichen (2040 über 80 % Diffusion). Maßgeblich vertreten sind hier Glasherstellung und Dampferzeugung.
- B ("Boosted": auf dem Weg, aber noch nicht ganz da): Anwendungen, die 2040 zwar attraktive CO<sub>2</sub>-neutrale Techniken zur Verfügung haben, aber durch höhere Anlagenlebensdauern (oder eine spätere Verfügbarkeit der Techniken) eine geringere Diffusion aufweisen. Politische Maßnahmen zur Beschleunigung der Diffusion ab etwa 2030 können die Anwendungen dieser Gruppe besonders begünstigen. Maßgeblich vertreten sind hier Gießereien und Umformtechnik.
- C ("Cornered": mit mangelnden Handlungsoptionen): Anwendungen, die die ihnen mögliche Diffusion vergleichsweise stark ausnutzen, deren zur Verfügung stehenden CO<sub>2</sub>-neutralen Techniken aber wenig attraktiv sind. Diese Gruppe benötigt vor allem Preissignale, um CO<sub>2</sub>-neutrale Techniken attraktiver zu machen. Maßgeblich hier vertreten sind Kupferverarbeitung und Härtereien.
- D ("Delayed": **verzögert**): Eine Mischung der Merkmale der Gruppen B und C. Es mangelt sowohl an **wirtschaftlichen CO<sub>2</sub>-neutralen Techniken** (die fossile Techniken vollständig verdrängen könnten) als auch einer schnellen Diffusion. Obwohl eine Verbesserung beider Aspekte für Anwendungen dieser Gruppe notwendig ist, um eine dekarbonisierte Prozesswärmeerzeugung zu ermöglichen, ist die **Beschleunigung des Anlagenaustauschs** besonders relevant. Maßgeblich hier vertreten sind **Zement, Kalk, Aluminium und Stahl**.

---

# Methodik des Workshops

# Ziel des Workshops: Transformationspfade und Rahmenbedingungen für CO2-neutrale Prozesswärmeerzeugung erarbeiten



# Schritt 1: Identifizierung F&E-Bedarf, Hindernissen, notwendigen Rahmenbedingungen und Partnern für CO<sub>2</sub>-neutrale Prozesswärme

	Elektrifizierung		Wasserstoff		Hybrid		Andere Energieträger	
	F&E-Bedarf	Hindernisse	F&E-Bedarf	Hindernisse	F&E-Bedarf	Hindernisse	F&E-Bedarf	Hindernisse
Anwendung 1								
Anwendung 2								
Anwendung ...								
	Notw. Rahmenbedingungen		Notw. Rahmenbedingungen		Notw. Rahmenbedingungen		Notw. Rahmenbedingungen	
	Politisch	Wirtschaftlich	Politisch	Wirtschaftlich	Politisch	Wirtschaftlich	Politisch	Wirtschaftlich
	Notwendige Partner		Notwendige Partner		Notwendige Partner		Notwendige Partner	

# Schritt 2: Zeitliche Einordnung externer Faktoren für eine Umsetzung CO<sub>2</sub>-neutraler Prozesswärmeerzeugung

	Elektrifizierung		Wasserstoff		Hybrid		Andere Energieträger	
	Wo stehen wir?	Wo wollen wir hin?	Wo stehen wir?	Wo wollen wir hin?	Wo stehen wir?	Wo wollen wir hin?	Wo stehen wir?	Wo wollen wir hin?
Technologie		2020 2030 2040 2050		2020 2030 2040 2050		2020 2030 2040 2050		2020 2030 2040 2050
Preise/ Wirtschaftlichkeit		2020 2030 2040 2050		2020 2030 2040 2050		2020 2030 2040 2050		2020 2030 2040 2050
Flexibilität		2020 2030 2040 2050		2020 2030 2040 2050		2020 2030 2040 2050		2020 2030 2040 2050
Infrastruktur		2020 2030 2040 2050		2020 2030 2040 2050		2020 2030 2040 2050		2020 2030 2040 2050
Weiteres		2020 2030 2040 2050		2020 2030 2040 2050		2020 2030 2040 2050		2020 2030 2040 2050

---

miro board

[https://miro.com/app/board/uXjVN61I5uA=/?share link id=908887327090](https://miro.com/app/board/uXjVN61I5uA=/?share_link_id=908887327090)

*siehe auch Link im Chat*

---

Pause – 10 Minuten



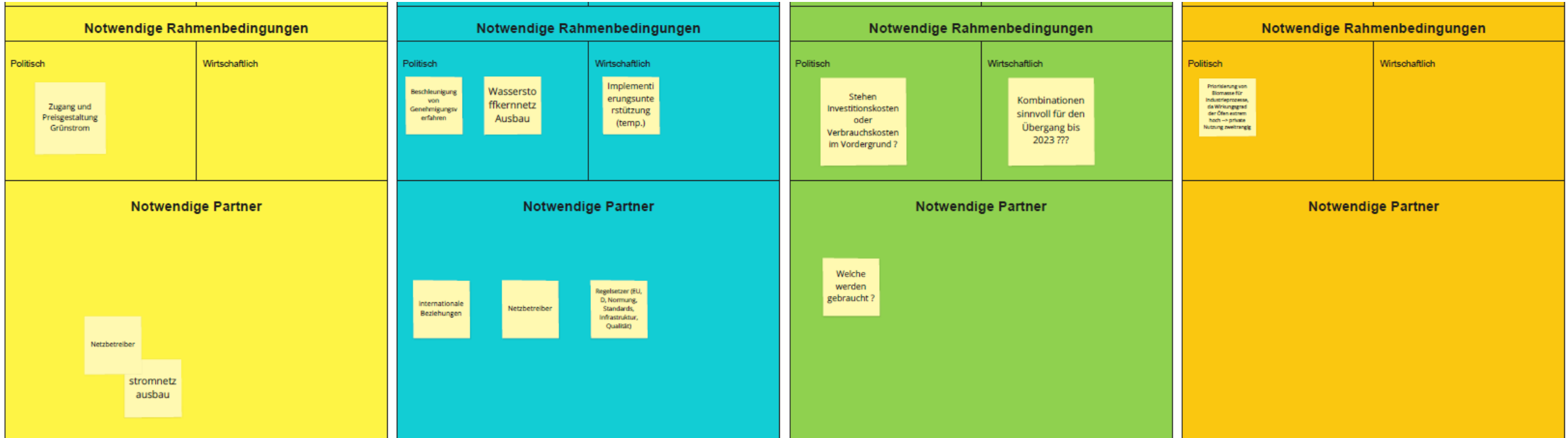
---

# Gemeinsame Diskussion und interaktives Arbeiten

# Ergebnisse Kalk (Auszug)

	Elektrifizierung		Wasserstoff		Hybrid		Sonstige Energieträger	
	F&E-Bedarf	Hindernisse	F&E-Bedarf	Hindernisse	F&E-Bedarf	Hindernisse	F&E-Bedarf	Hindernisse
Konti. Brennofen Kalk niedrige Reaktivität	<p>lernen von projekt leilac</p> <p>nutzung von wärme gespeichert möglich?</p>	<p>sehr hohe Temperaturen, kontinuierlicher Betrieb, sehr hoher Energiebedarf → sicher durch erneuerbare Energien abzubilden</p> <p>Schmelzzeit muss gleichmäßig erwärmt werden → z.B. Heißluftelemente von außen schwierig</p>	<p>technisch: Flammentemperatur, - Geschwindigkeit, - Ausbreitung</p> <p>Welche Veränderungen sind am Werk notwendig?</p> <p>Sicherstellung Produktqualität bei veränderten Brennbedingungen</p> <p>selbst benötigte Wasserstoffmengen für F&amp;E Vorhaben schwierig zu bekommen/teuer</p>		<p>Teilelektrifizierung (z.B. Vorwärmung) denkbar</p>	<p>Verkleinerung der Anlagengröße sinnvoll?</p>		<p>Homogenisierung und Gleichmäßigkeit der Zugangsströme von Biomasse</p> <p>Asche und NOx Emissionen je nach Ausgangsstoff</p>
Konti. Brennofen Kalk mittlere/hohe Reaktivität								
Konti. Brennofen Kalk hoher Durchsatz								

# Ergebnisse Kalk (Auszug)



# Ergebnisse Zement (Auszug)

	Elektrifizierung		Wasserstoff		Hybrid		Sonstige Energieträger	
	F&E-Bedarf	Hindernisse	F&E-Bedarf	Hindernisse	F&E-Bedarf	Hindernisse	F&E-Bedarf	Hindernisse
Konti. Brennofen Zementklinker (Drehrohrofenssystem)		Indirekte Beheizung Drehrohrofen z.B. durch heiße Luft verbunden mit wärmespeicher? Sehr hohe Temperaturen >>1000 °C		Verfügbarkeit, hohe Konkurrenz				
	<b>Notwendige Rahmenbedingungen</b>		<b>Notwendige Rahmenbedingungen</b>		<b>Notwendige Rahmenbedingungen</b>		<b>Notwendige Rahmenbedingungen</b>	
	Politisch	Wirtschaftlich	Politisch	Wirtschaftlich	Politisch	Wirtschaftlich	Politisch	Wirtschaftlich
	<b>Notwendige Partner</b>		<b>Notwendige Partner</b>		<b>Notwendige Partner</b>		<b>Notwendige Partner</b>	

---

Zusammenfassung und nächste Schritte...

# Vielen Dank für Ihre Teilnahme und Ihr Interesse!

Die folgenden Branchen wurden untersucht:

- Nahrungsmittelindustrie
- Papierindustrie
- Chemieindustrie
- Wärme- und Glühöfen Stahl-Walzwerke
- Gießerei-Industrie
- NE-Metallindustrie: Aluminium
- NE-Metallindustrie: Kupfer
- Umformtechnik
- Härtereitechnik
- Glasindustrie inkl. Glasfaser
- Kalkindustrie
- Zementindustrie
- Keramik- und Ziegelindustrie

Auftraggeber



Forschungsstellen



**Ansprechpartner und Kontakt**

Dr. Matthias Rehfeldt  
Competence Center Energy Technology and Energy Systems  
Fraunhofer Institute for Systems and Innovation Research ISI  
Breslauer Straße 48 | 76139 Karlsruhe | Germany

Phone +49 721 6809-412  
mailto: [matthias.rehfeldt@isi.fraunhofer.de](mailto:matthias.rehfeldt@isi.fraunhofer.de)  
<http://www.isi.fraunhofer.de>



**Ansprechpartner und Kontakt**

Dr.-Ing. Christian Schwotzer  
Institut für Industrieofenbau und Wärmetechnik  
RWTH Aachen University  
Kopernikusstr. 10, 52074 Aachen

Tel.: +49 (0) 241 80-26068  
Fax: +49 (0) 241 80-22289  
E-Mail: [schwotzer@iob.rwth-aachen.de](mailto:schwotzer@iob.rwth-aachen.de)  
Web: [www.iob.rwth-aachen.de](http://www.iob.rwth-aachen.de)

