
CO₂-NEUTRALE PROZESSWÄRMEERZEUGUNG

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

12. Dezember 2023 (online)

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, M. Rehfeldt)
- 09:15 – 09:40 Uhr: Ergebnisse Teil I: Branche Glas (C. Schwotzer, M. Rehfeldt)
- 09:40 – 10:05 Uhr: Ergebnisse Teil II: Branche Keramik (C. Schwotzer, M. Rehfeldt)
- 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, M. Rehfeldt)

Herausforderung

- CO₂-neutrale Anwendungen zur Prozesswärmeerzeugung sind nicht ohne das energiewirtschaftliche Umfeld bewertbar.
- Die Untersuchung auf Anwendungsebene ist aber mit einer Modellierung im Rahmen einer Systemanalyse nicht unmittelbar kompatibel.
- 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 CO₂,
 - keine Modellierung der Stromerzeugung,
 - und daraus resultierend keine Abbildung flexibler Endverbraucher.

Lösungsvorschlag

- Diese hier nicht betrachteten 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]
 - **TransHyDE** des BMBF [4]
 - **Projektionsbericht** der Bundesregierung/Umweltbundesamt [5]

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

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

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

[4]: <https://www.wasserstoff-leitprojekte.de/leitprojekte/transhyde>

[5]: <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

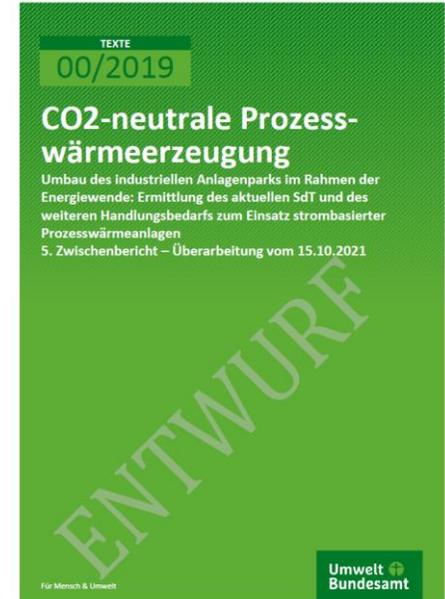


Dr. Christian Schwotzer, Felix Kaiser, Carsten Gondorf,
Justin Hauch, Jan Hof, Lukas Sankowski, Moritz Langhorst

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

- 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

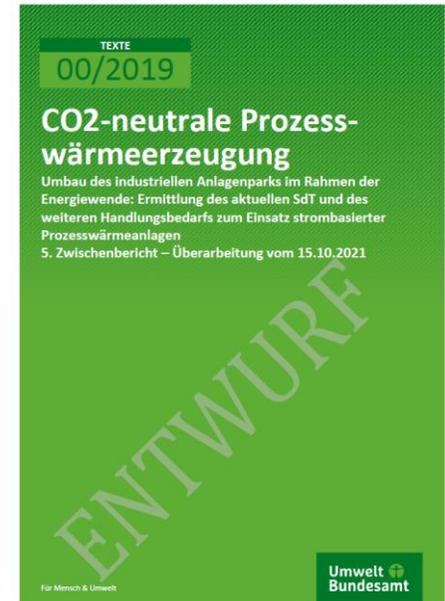


Gesamtbericht 739 Seiten (inkl. Anhang)

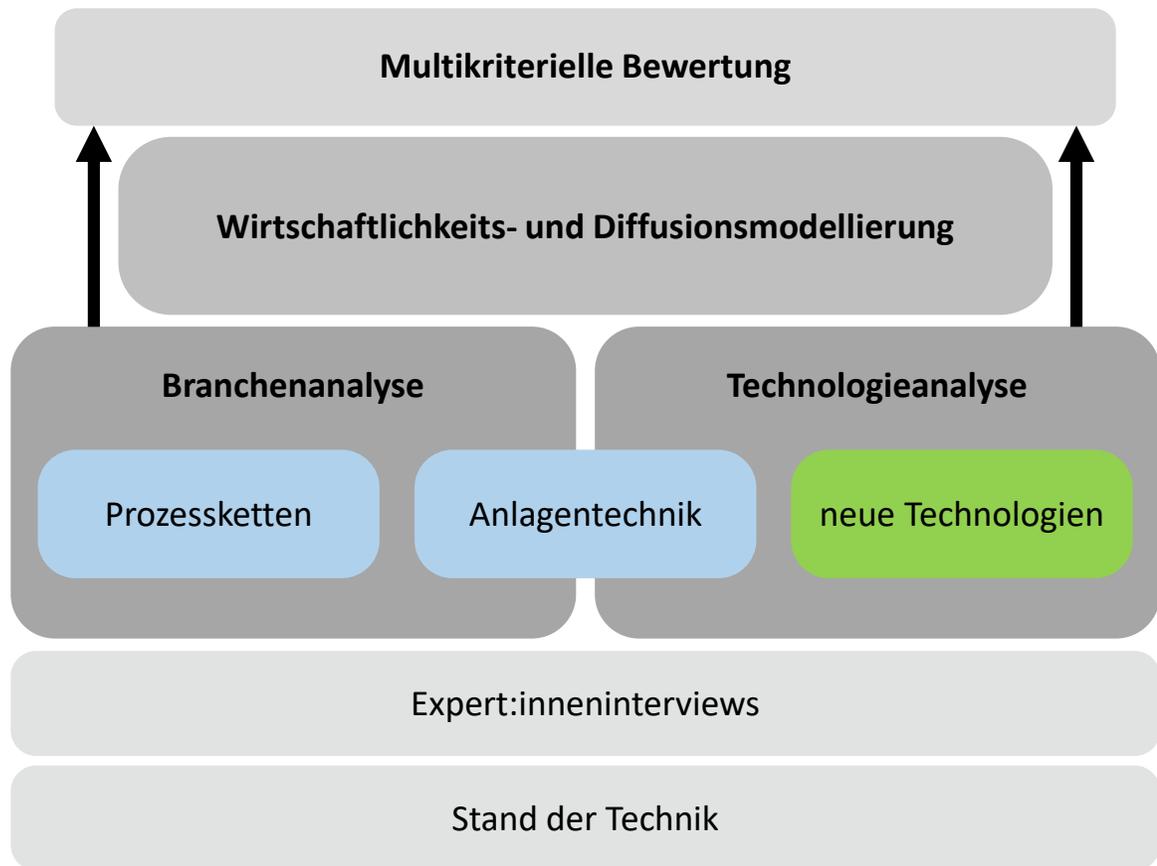
Zielsetzung der Studie

Hauptstudie (in Kürze veröffentlicht):

- Wissenslücke zur Rolle von H₂/Strom in der CO₂-neutralen Prozesswärme verkleinern
- Umstellung auf eine CO₂-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 System Sicht eher gering.

These 8: Die Umstellung auf CO₂-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 CO₂-neutrale Prozesswärme ermöglichen.

These 11: CO₂-neutrale Techniken **mindern direkte Umweltwirkungen** sowie Umweltkosten.

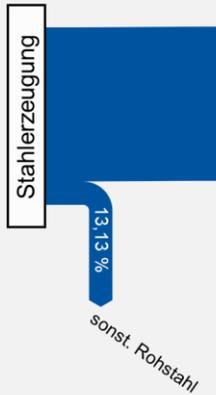
Branchen im Fokus der Studie

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

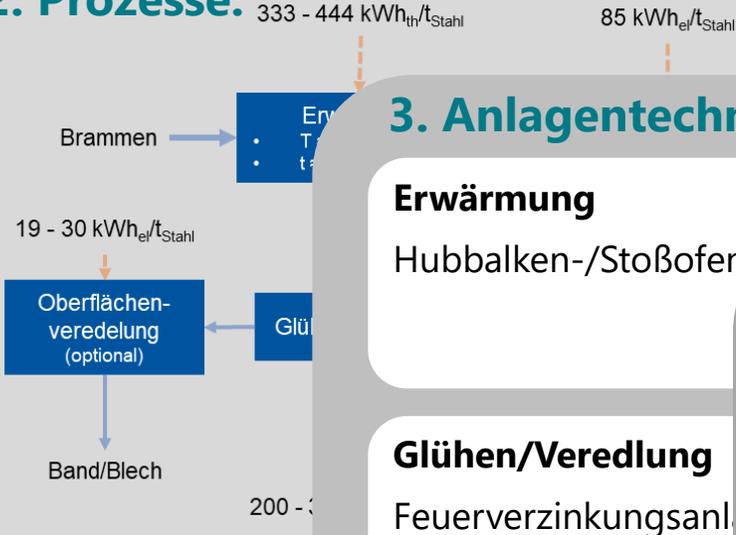
4-schrittiger Lösungsansatz der Branchen- und Technologieanalyse

1. Produkte:

Rohstahlerzeugung in 2016: 42,88 Mrd. kWh



2. Prozesse:



3. Anlagentechnik (Stand der Technik):

Erwärmung

Hubbalken-/Stoßofen

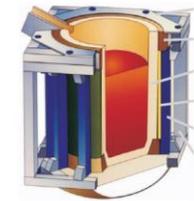
Glühen/Veredlung

Feuerverzinkungsanl.

4. CO₂-neutrale Alternativtechnologien:

Power-to-Heat (PtH)

Induktion, Widerstandsbeheizung, Plasma, ...

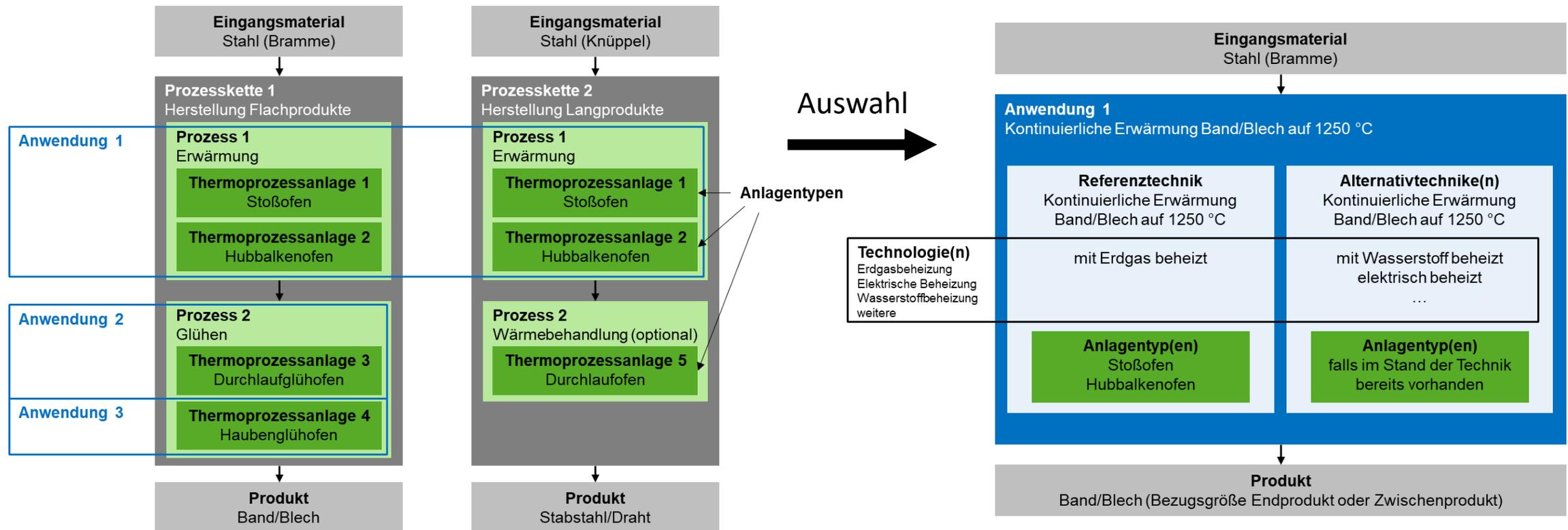


Power-to-Gas (PtG) / Power-to-Liquid (PtL)

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

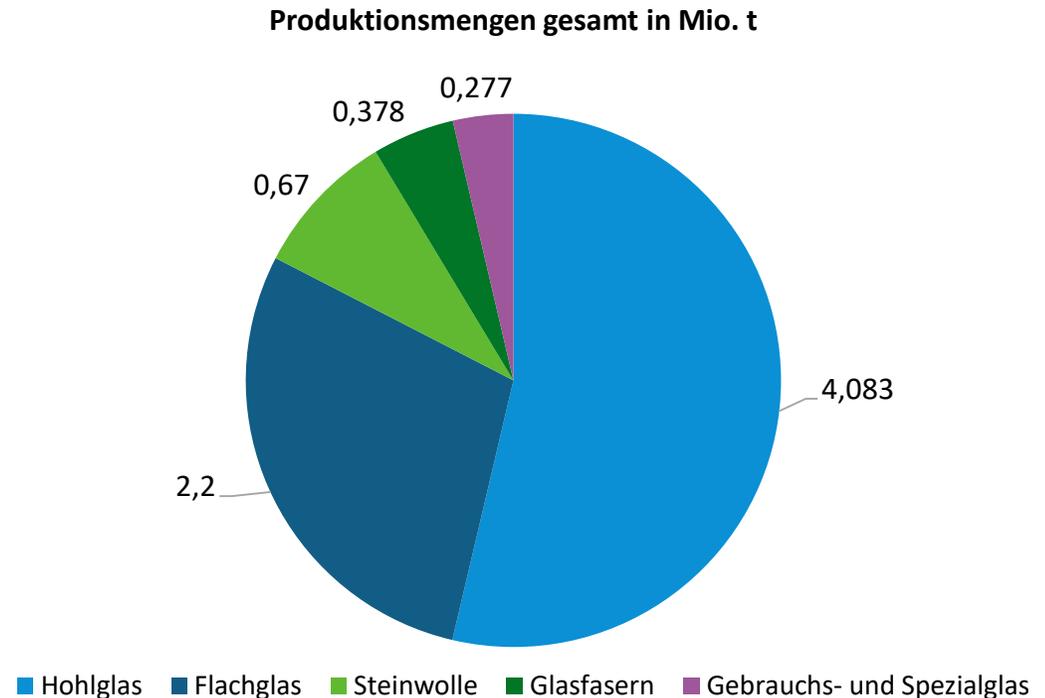
- Kommunikation der Ergebnisse der Hauptstudie
 - Vorstellung zentraler Ergebnisse der Studie und Diskussion (**Kick-off**).
 - Zusammenführung der Erkenntnisse aus den Veranstaltungen und Diskussion (**Abschlussveranstaltung**).
- Erarbeitung von Strategien zu Umsetzung (**branchenspezifische Workshops**)
 - Vertiefte, branchenspezifische Vorstellung der Ergebnisse.
 - Gemeinsames Arbeiten an Herausforderungen und Möglichkeiten zur Umsetzung einer CO₂-neutralen Prozesswärmeerzeugung in der Industrie.



Ergebnisse Teil I: Branche Glas

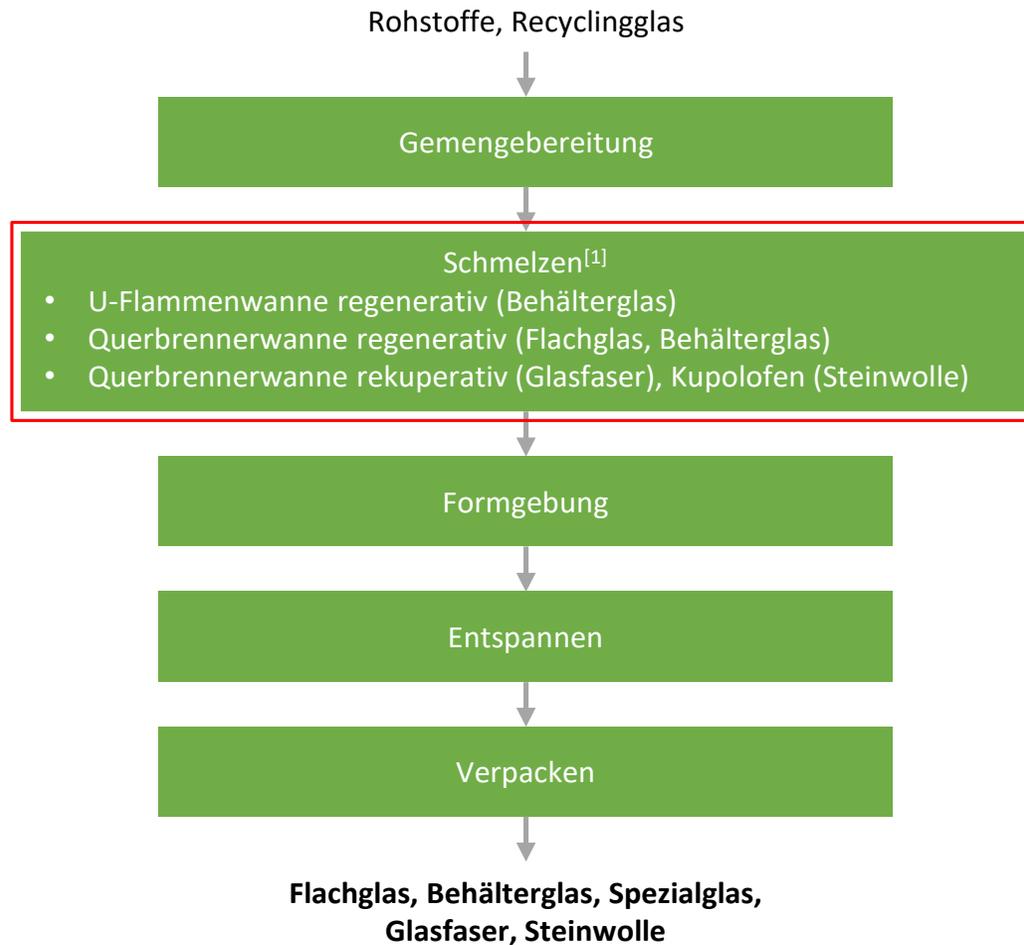
Kurzbeschreibung der Branche und Fokus der Studie

- Deutschlandweit arbeiteten 2018 circa 56.000 Menschen in der Glasindustrie
- 2018 wurden in Deutschland 7,6 Mio. t Glas produziert
- Größte Abnehmer: Bau (47,4 %), Chemie (11,7 %), Ernährungs- und Getränkeindustrie (15,9 %) und Automobil (8,3 %)
- Industrie wird dominiert von international operierenden Konzernen
- CO₂-Emissionen:
 - 75 % energiebedingt
 - 25 % prozessbedingt



eigene Darstellung, Quelle: Bundesverband Glasindustrie e.V. (BV Glas) 2020

Prozessketten und Produkte: Allgemeine Prozesskette der Glas-industrie



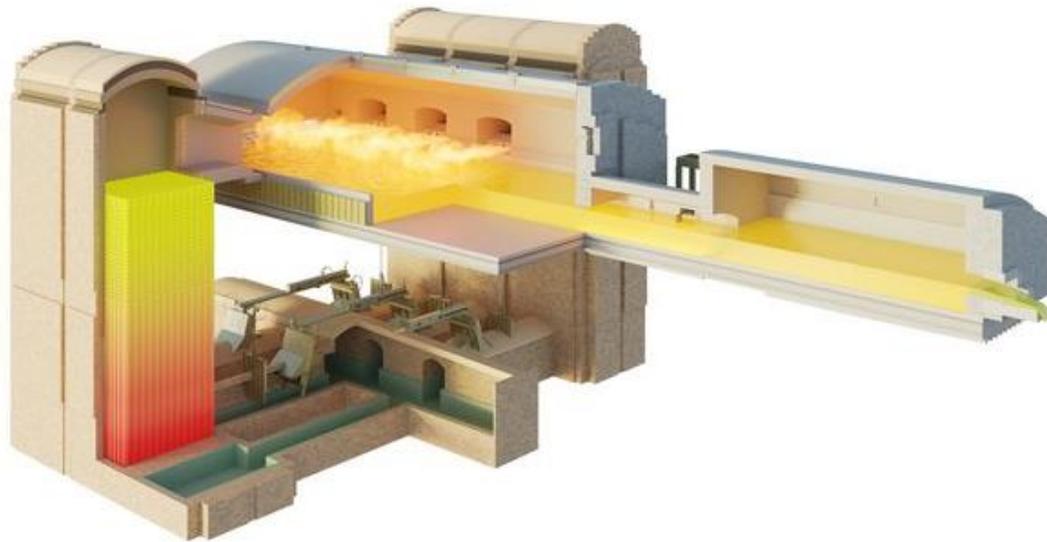
Legende:

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

Quellen: Eigene Darstellung nach (Fleiter et al. 2013)

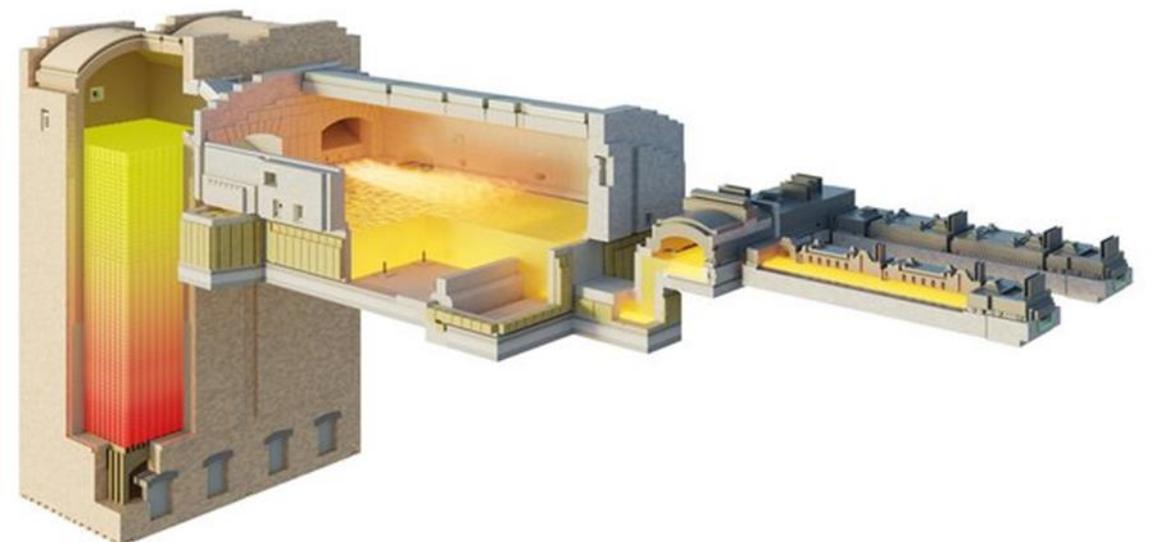
Thermoprozessanlagen (exemplarisch, nicht maßstabsgetreu)

Querbrennerwanne mit regenerativer Luftvorwärmung



Quelle: (Horn Glass Industries AG 2020)

U-Flammenwanne mit regenerativer Luftvorwärmung



Quelle: (Horn Glass Industries AG 2020)

Auswahl der Anwendungen und Referenztechniken anhand von Energieverbrauch und CO₂-Emissionen

Abschätzung charakteristischer Anlagenkennzahlen zur Auswahl der betrachteten Anwendungen und Referenztechniken „Glas-Industrie“ in Deutschland

Anlagentypen	Jährlicher Anlagendurchsatz ¹⁾		Jährlicher Energieverbrauch		Energiebedingte CO ₂ -Emissionen ^{2), 3)}	
	8,0 Mio. t	Anteil	9.669 - 13.708 GWh	Anteil	2.097 - 2.956 Tsd. t	Anteil
U-Flammenwanne regenerativ (fossil)	3.368 Tsd. t	42 %	3.305 - 4.586 GWh	33 - 34 %	668 - 926 Tsd. t	31 - 32 %
Querbrennerwanne regenerativ (fossil)	3.117 Tsd. t	39 %	4.103 - 6.149 GWh	42 - 45 %	829 - 1.242 Tsd. t	40 - 42 %
Oxyfuel Schmelzwanne (fossil)	876 Tsd. t	11 %	904 - 1.331 GWh	9 - 10 %	183 - 269 Tsd. t	9 %
Kupolofen (fossil)	349 Tsd. t	4 %	592 GWh	4 - 6 %	232 Tsd. t	8 - 11 %
Querbrennerwanne rekuperativ (fossil)	175 Tsd. t	2 %	384 - 459 GWh	3 - 4 %	78 - 93 Tsd. t	3 - 4 %
Querbrennerwanne Spezialglas (fossil)	62 Tsd. t	1 %	281 - 342 GWh	2 - 3 %	57 - 69 Tsd. t	2 - 3 %
Vollelektrische Schmelzwanne	92 Tsd. t	1 %	100 - 249 GWh	1 - 2 %	50 - 125 Tsd. t	2 - 4 %
Verteilung						
Anteil Anlagen mit elektrischer Energie beheizt				1 - 2 %	2 - 4 %	
Anteil Anlagen mit fossiler Energie beheizt				98 - 99 %	96 - 98 %	
Davon im Rahmen der Studie betrachteten Anlagentypen (fett)				77 - 80 %	73 - 77 %	

Legende:

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

Anmerkungen:

1) Es wird die Produktionsmenge von geschmolzenem Glas angegeben. Sie wird auf Grundlage der verkaufsfähigen Menge Glas abgeschätzt, die nach (Expert:inneninterview 2020z) etwa 90 % der geschmolzenen Tonnage entspricht.

2) Die prozessbedingten CO₂-Emissionen betragen nach (Umweltbundesamt (UBA) 2020) in der Behälterglasindustrie 81 kg_{CO₂}/t_{geschmolzenes Glas} (ca.25 % der gesamten CO₂-Emissionen) und in der Flachglasindustrie 187 kg_{CO₂}/t_{geschmolzenes Glas} (ca. 30 % der gesamten CO₂-Emissionen)

3) Es wird für diese Abschätzung zur Vorauswahl der relevanten Anlagentypen nur der Hauptenergieträger betrachtet. Dies führt zu einer etwas geringeren Bewertung der energiebedingten CO₂-Emissionen für erdgasbeheizte Anlagen, da der Anteil der elektrischen Energie durch eine EZH nicht berücksichtigt wird. Eine genauere Unterscheidung wird in den nachfolgenden Arbeitspaketen vorgenommen.

Quellen: Produktionsmengen und Energieverbräuche nach (Gitzhofer 2007; VDI 2578: 2017-05; Expert:inneninterview 2020z; Bundesverband Glasindustrie e. V. (BV Glas) 2020)

Betrachtete Anwendungen und Referenztechniken

Referenztechnik	
Definition	kontinuierlicher Schmelzofen Behälterglas mit Erdgasbeheizung
Anwendung	kontinuierliches Schmelzen Behälterglas ($\dot{m} < 500 \text{ t/d}$)
Thermoprozessanlage(n)	U-Flammenwanne regenerativ
Beheizungstechnologie(n)	Erdgasbeheizung (inkl. EZH)

Referenztechnik	
Definition	kontinuierlicher Schmelzofen Flachglas mit Erdgasbeheizung
Anwendung	kontinuierliches Schmelzen Flachglas ($\dot{m} > 500 \text{ t/d}$)
Thermoprozessanlage(n)	Querbrennerwanne Regenerativ
Beheizungstechnologie(n)	Erdgasbeheizung (inkl. EZH)

Definition von Alternativtechniken

Technik und Technologie	
Referenztechnik	<i>kontinuierlicher Schmelzofen Behälterglas mit Erdgasbeheizung</i>
Alternative Beheizungstechnologie(n)	elektrische Widerstandsbeheizung (100 % Strom) Wasserstoffbeheizung (100 % H ₂) hybride Beheizung (80 % Strom, Rest Erdgas (EE-Methan)) hybride Beheizung (80 % Strom, H ₂)
Alternativtechnik(en)	kontinuierlicher Schmelzofen Behälterglas mit elektr. Widerstandsbeheizung kontinuierlicher Schmelzofen Behälterglas mit Wasserstoffbeheizung konti. Schmelzofen Flachglas mit hybrider Beheizung (Strom/Erdgas) konti. Schmelzofen Flachglas mit hybrider Beheizung (Strom/H ₂)

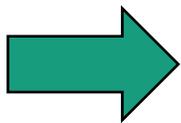
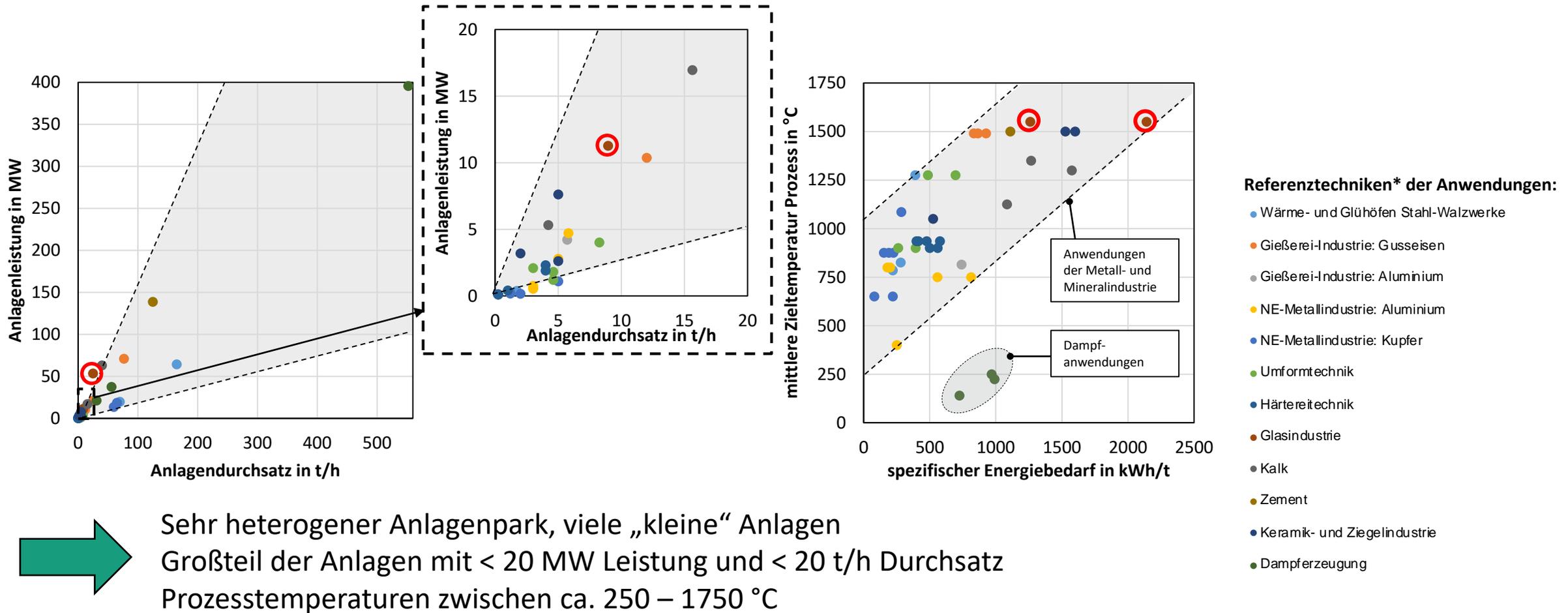
Technik und Technologie	
Referenztechnik	kontinuierlicher Schmelzofen Flachglas mit Erdgasbeheizung
Alternative Beheizungstechnologie(n)	elektrische. Widerstandsbeheizung (100 % Strom) Wasserstoffbeheizung (100 % H ₂) hybride Beheizung (80 % Strom, Rest Erdgas (EE-Methan)) hybride Beheizung (80 % Strom, H ₂)
Alternativtechniken	kontinuierlicher Schmelzofen Flachglas mit elektr. Widerstandsbeheizung kontinuierlicher Schmelzofen Flachglas mit Wasserstoffbeheizung konti. Schmelzofen Flachglas mit hybrider Beheizung (Strom/Erdgas) konti. Schmelzofen Flachglas mit hybrider Beheizung (Strom/H ₂)

Erhebung von Kenndaten: „kontinuierliches Schmelzen Behälterglas ($\dot{m} < 500 \text{ t/d}$)“

Technik	Referenztechnik	Alternativtechnik 1	Alternativtechnik 2	Alternativtechnik 3	Alternativtechnik 4	Einheit
Beheizungstechnologie	Erdgasbeheizung (inkl. EZH) ^{a)}	Elektrifizierung ^{b)}	Wasserstoffbeheizung	Hybride Beheizung (Strom/Erdgas (EE-Methan))	Hybride Beheizung (Strom/ Wasserstoff)	
Thermoprozessanlagen	U-Flammenwanne Regenerativ	Vollelektrische Schmelzwanne	U-Flammenwanne Regenerativ	Hybridwanne	Hybrid wanne	
Produkt	Behälterglas					
Investition Neubau ^{c)}	205,5	164,4	205,5	205,5	205,5	EUR/t _{Kap.}
Investition Modernisierung	137,0	109,6	137,0	137,0	137,0	EUR/t _{Kap.}
Minimale Investition Neubau	205,5	164,4	205,5	205,5	205,5	EUR/t _{Kap.}
Min. Investition Modernisierung	137,0	109,6	137,0	137,0	137,0	EUR/t _{Kap.}
TRL	9	< 4 - 9	< 4	< 7	< 4	-
Energieträger 1	Erdgas	Strom	EE-Wasserstoff	Strom	Strom	-
Energieträger 2	Strom	keiner	Strom	EE-Methan	EE-Wasserstoff	-
Energieträger 3	keiner	keiner	keiner	keiner	keiner	-
Spezifischer Energiebedarf 1	1,130	0,760	1,130	0,640	0,640	MWh/t _{Pr.}
Spezifischer Energiebedarf 2	0,130	0,000	0,130	0,160	0,160	MWh/t _{Pr.}
Spezifischer Energiebedarf 3	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	MWh/t _{Pr.}
Min. spezifischer Energiebedarf	0,889	0,760	0,889	0,800	0,800	MWh/t _{Pr.}
Prozessbedingte Emissionen	0,081	0,081	0,081	0,081	0,081	t _{CO2} /t _{Pr.}
Betriebs- und Wartungskosten	10,3	8,2	10,3	10,3	10,3	EUR/t _{Kap.}
Abschreibungszeitraum	15	7	15	15	15	a
Lebensdauer	15	7	15	15	15	a
Repräsentative Kapazität ^{d)}	80.000	40.000	80.000	80.000	80.000	t _{Jahresleistung}
Auslastung	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	1,00
Anteil Bestand 2020	100 %	0 %	0 %	0 %	0 %	%
Verfügbar ab	2020	2020	2030	2020	2030	
Verfügbar bis	2050	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 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.

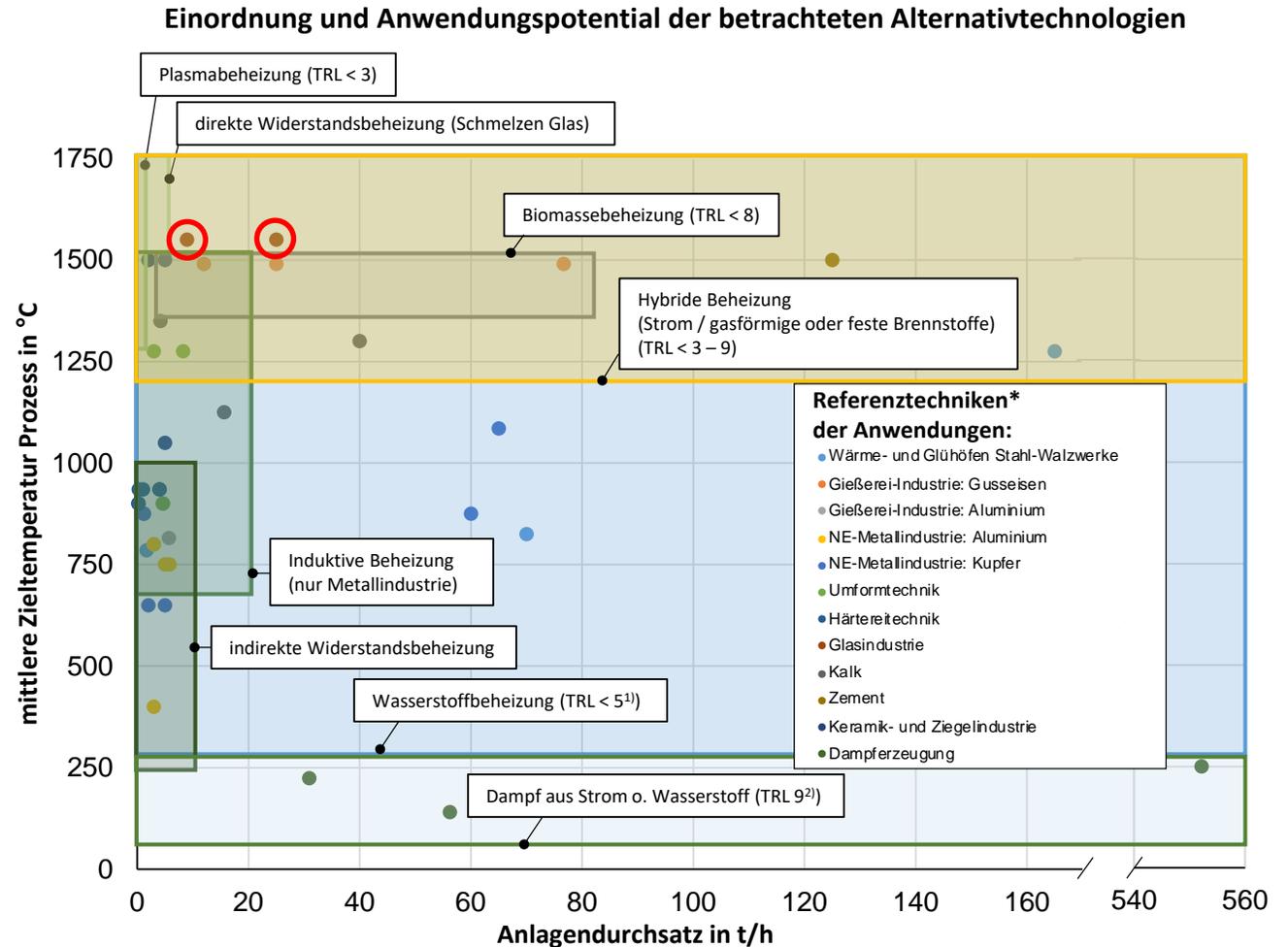
„n.b.“: Anwendung wurde nicht betrachtet. Das TRL der Technologiekombination wird gleich oder geringer als das der Technologie mit jeweils geringeren TRL eingeschätzt.

Weitere Anmerkungen siehe Bericht.

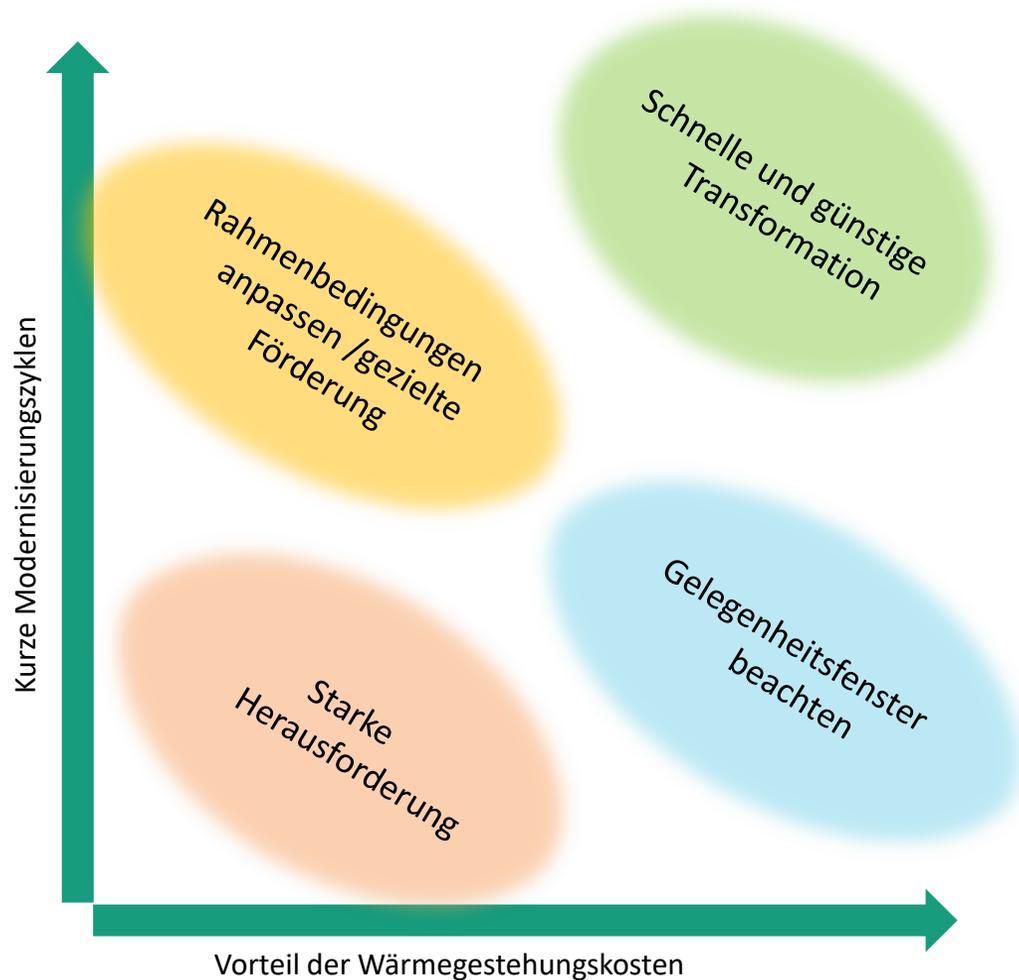
		Branche und Anwendung (zusammengefasst)																	
		Aluminium: Schmelzen, Erwärmen und Wärmebehandlung	Gießerei-Industrie: Schmelzen Al-Formguss	Kupfer: Schmelzen, Erwärmen und Wärmebehandlung	Gießerei-Industrie: Schmelzen Gusseisen	Härtereitechnik: Aufkohlen und Austenitisieren	Umformtechnik: 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 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 ¹⁾	< 3	< 3	< 3	< 3	< 3	< 2	< 2	< 2	9 ⁷⁾	
	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 ²⁾	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	< 6 ²⁾	n.b.	n.v.	n.v.	n.v.	< 4 ²⁾	9 ⁸⁾
	Erdgas-/EE-Methanbeheizung	(9)	(9)	(9)	< 8 ³⁾	(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 ⁴⁾	< 4 ⁴⁾	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	9	< 3 ⁵⁾	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 ⁴⁾	< 4 ⁴⁾	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	< 5	< 3 ⁵⁾	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 ⁶⁾	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
	Hybride Beheizung (Biomasse/H ₂ /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 ⁶⁾	n.v.	n.v.	n.v.	n.b.	n.v.

These 6: Elektrifizierung ist bei vielen Anwendungen mit niedrigeren Temp. vorteilhaft – H₂ 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.



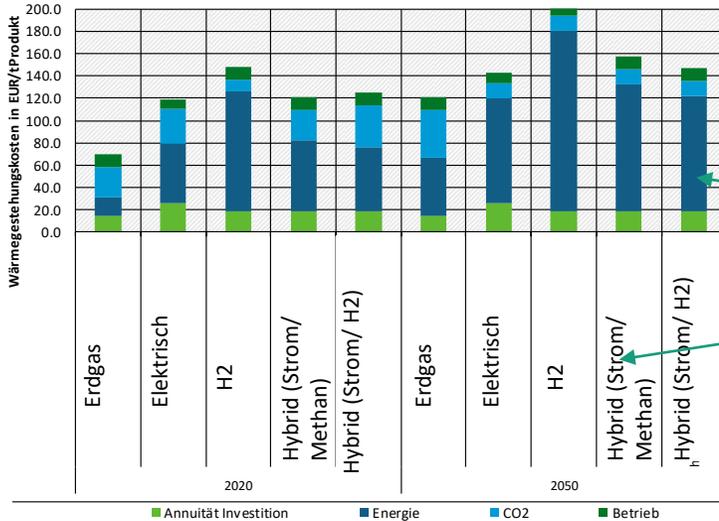
Wir untersuchen zwei Dimensionen der wirtschaftlichen Bewertung



- Modernisierungszyklen
 - Orientieren sich an Abschreibungszeiträumen
 - Vorzeitiger Austausch von Anlagen ist eine Option (und in vielen Fällen notwendig)
- Wärmegestehungskosten
 - Investition, Energie, CO₂, Betrieb und Wartung
 - Differenz zu Referenztechnologie ist maßgeblich

Dimension 1: Wärmegestehungskosten bestimmen die Attraktivität der Techniken

Glasindustrie inkl. Glasfaser
Kontinuierliches Schmelzen Behälterglas



Eigene Berechnung Fraunhofer ISI

Referenzfall

Transformation

Kostenkomponenten

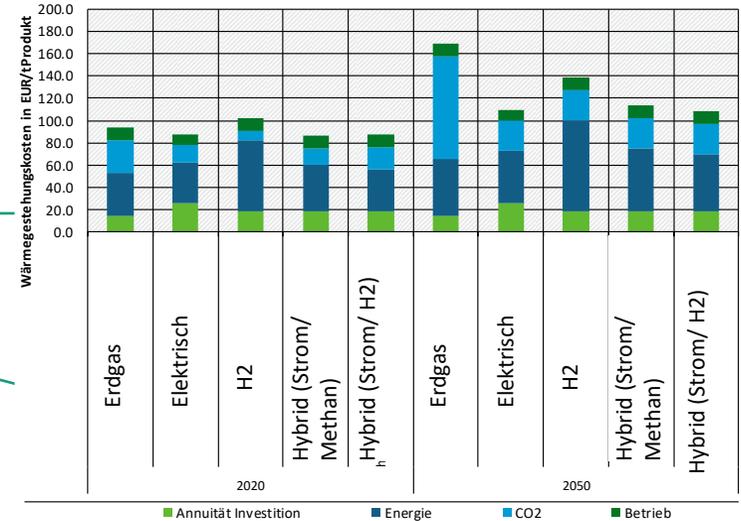
Techniken

Gas: 30€/MWh
Strom: 124 €/MWh
CO₂: 125€/t

Gas: 37€/MWh
Strom: 62 €/MWh
CO₂: 300€/t

Angenommene, nicht der aktuellen Realität entsprechende Rahmenbedingungen!

Glasindustrie inkl. Glasfaser
Kontinuierliches Schmelzen Behälterglas

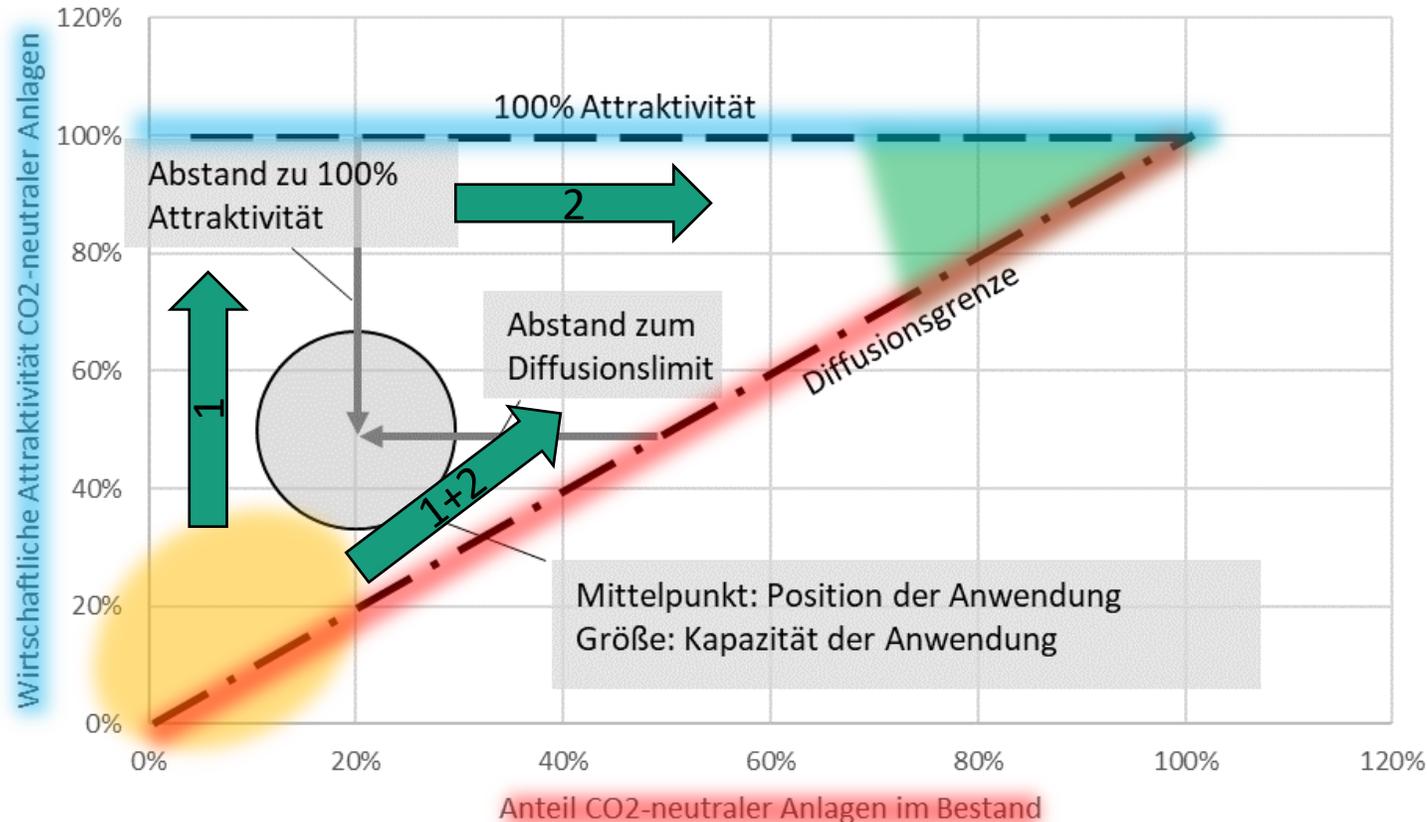


Eigene Berechnung Fraunhofer ISI

- Konventionelle Technik (Erdgas) ist auch bis 2050 im Referenzfall konkurrenzfähig.
- CO₂-Preise können Energieträger-Kostendifferenz nicht ausgleichen.
- Etwas höhere Kostenanteile der Investition entstehen durch geringere Lebensdauer.

- Im Transformationsfall (hohe CO₂-Preise!) wird die Referenztechnik unwirtschaftlich.
- Direkte Elektrifizierung und Wasserstoff sind attraktiv.
- Allerdings erhebliche Mehrkosten mit Wasserstoff (~25%). Kostenparität bei etwa 1,5€/kg_{H2}.
- Prozessbedingte Emissionen erzeugen relevanten Kostenblock.

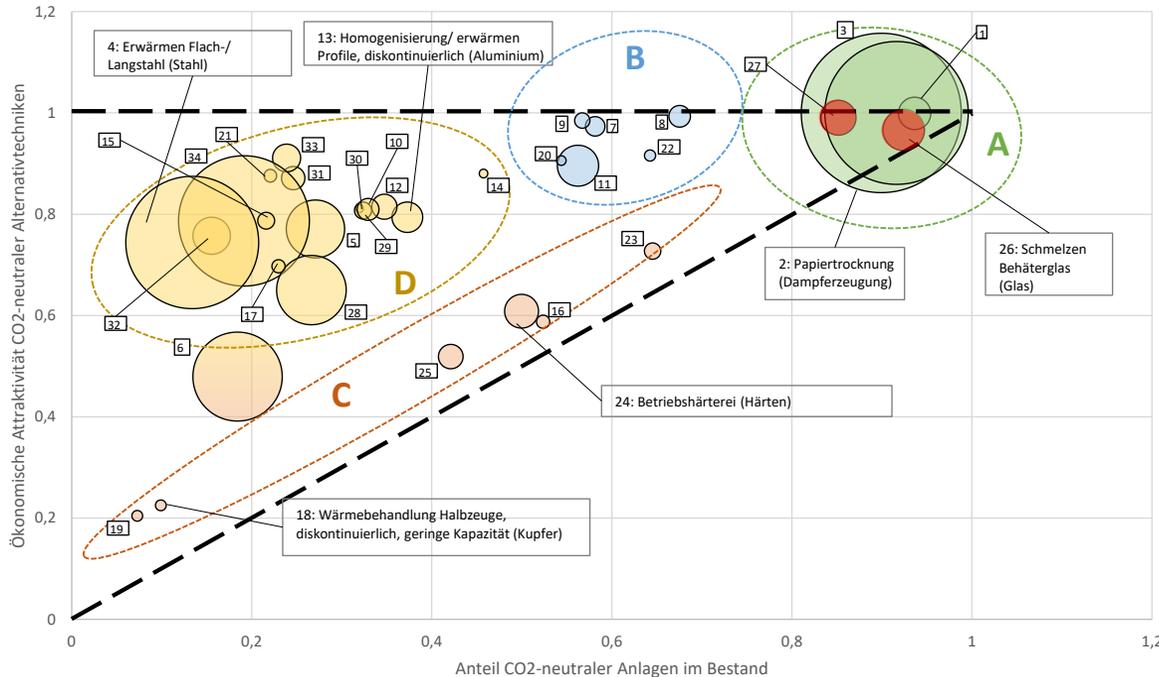
Erläuterung Diffusionsabbildung



■ 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 CO₂-neutraler Anlagen 2040



Transformationszenario, 2040

- 300€/t_{CO2}
- Strompreis 50-65€/MWh

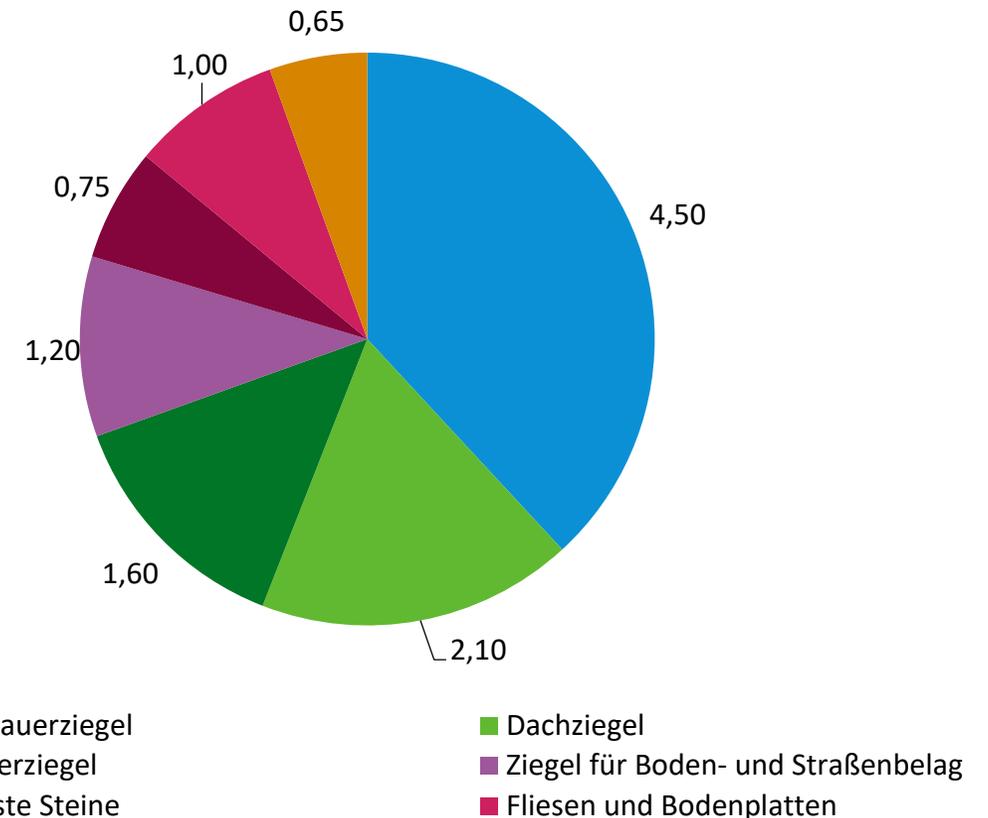
- A ("Advantaged": im Vorteil): Anwendungen, die **früh wirtschaftlich attraktive CO₂-neutrale Techniken** zur Verfügung haben und durch **geringe Anlagenlebensdauern** vergleichsweise schnell wechseln können. Diese Anwendungen können dadurch im maximalen Reformpaket eine (beinahe) vollständige Dekarbonisierung 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 CO₂-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 CO₂-neutralen Techniken aber wenig attraktiv sind. Diese Gruppe benötigt vor allem Preissignale, um CO₂-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 CO₂-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 Keramik

Kurzbeschreibung der Branche und Fokus der Studie

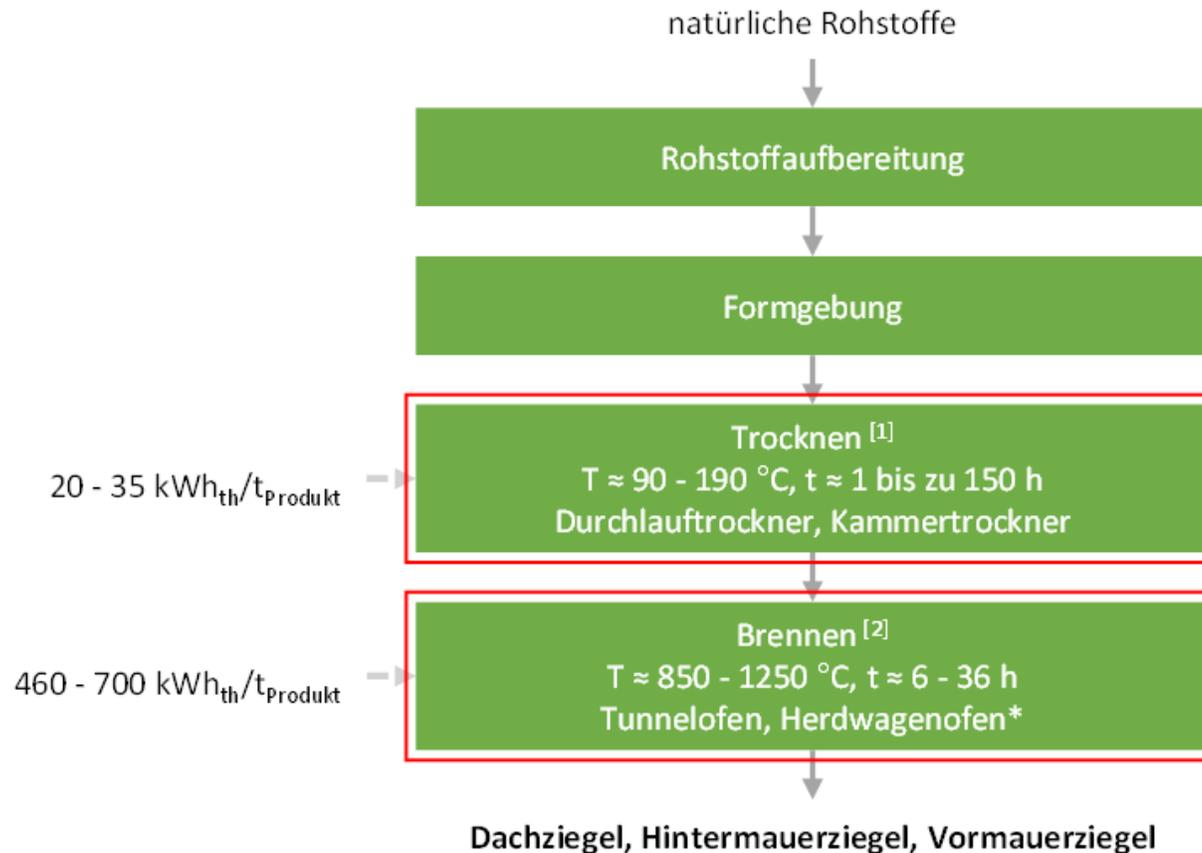
- Sehr unterschiedliche Produkte: von Baumaterial bis Porzellan oder feuerfesten Werkstoffen
- 2018 waren in Deutschland circa 39.200 Beschäftigte in der Keramikindustrie tätig
- Die 221 Betriebe erwirtschafteten 2020 circa 7,2 Mrd. €

Produzierte Mengen keramischer Produkte in Mio. t (Stand 2019)



* technische Keramik, Sanitärkeramik & Haushaltswaren
eigene Darstellung nach, Quelle: (Bundesverband der Deutschen Ziegelindustrie e.V. 2020; Statistisches Bundesamt (Destatis) 2019b)

Prozessketten und Produkte: Herstellung von Ziegeln



Legende:

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

* Annahme: jährliche Produktionsmenge im Herdwagenofen < 5 %

Anmerkungen:

th. = thermisch

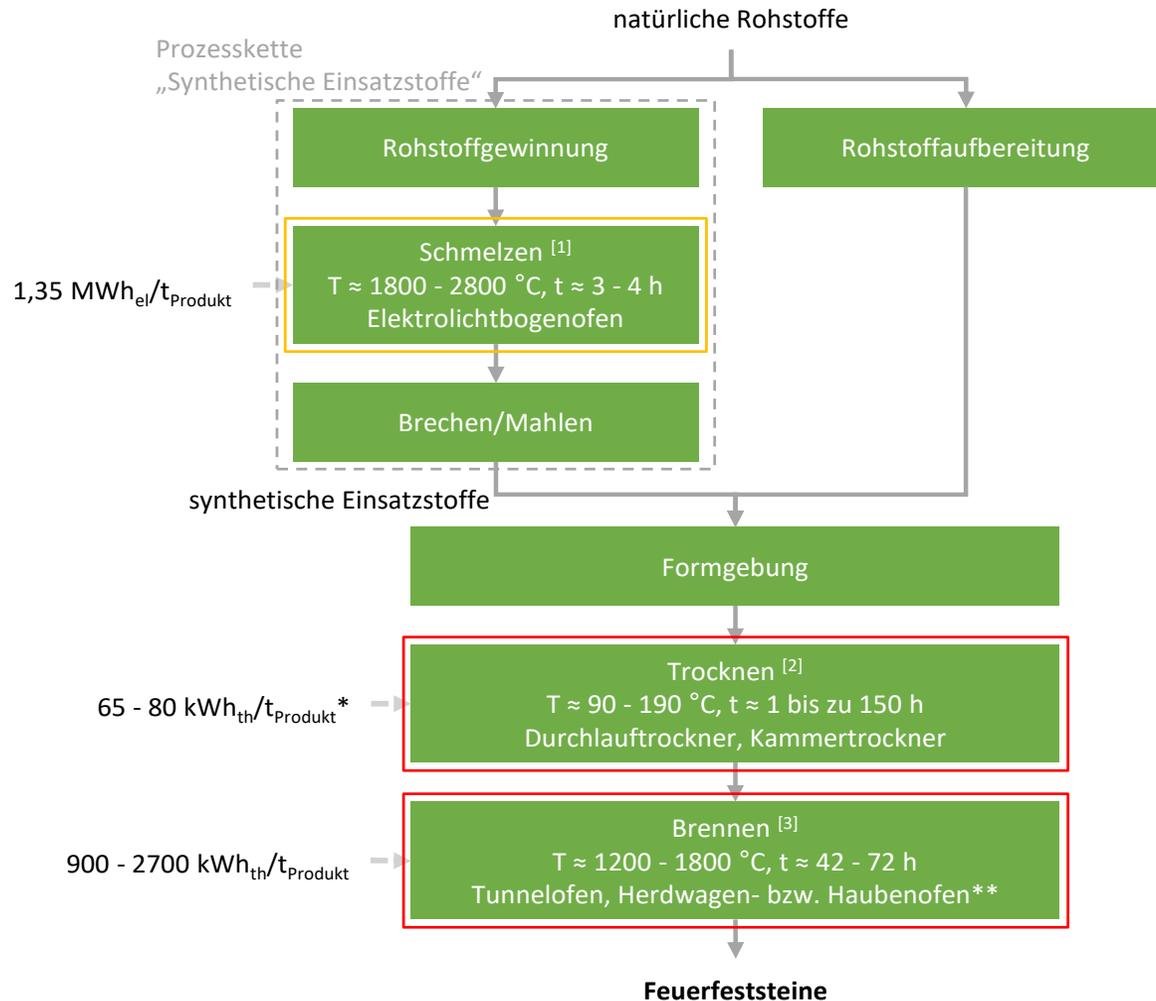
Quellen:

[1] (Becker 2011; Expert:inneninterview 2020y)

[2] (VDI 2585:2018-12)

[3] (European Commission 2007b)

Prozessketten und Produkte: Herstellung von Feuerfeststeinen



Legende:

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

Orange markiert: Energieintensive Prozessschritte, die größtenteils elektrifiziert sind

*Annahme: Wert nach Prozesskette Ziegel

** Annahme: jährliche Produktionsmenge im Herdwagenofen < 30 %

Anmerkungen:

th. = thermisch; el. = elektrisch

Quellen (eigene Darstellung nach):

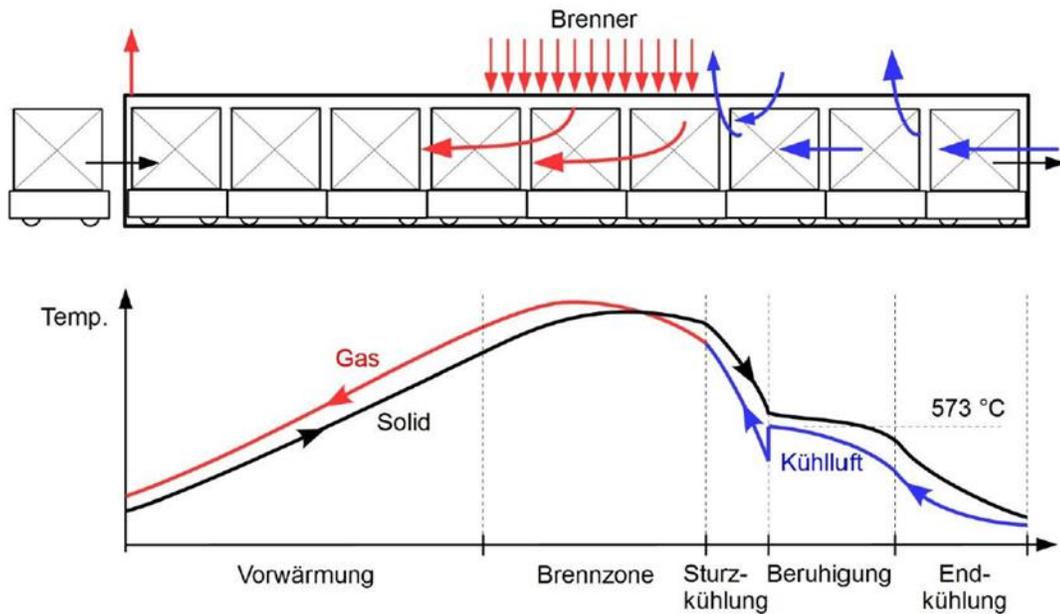
[1] (Becker 2011; Expert:inneninterview 2020y)

[2] (VDI 2585:2018-12)

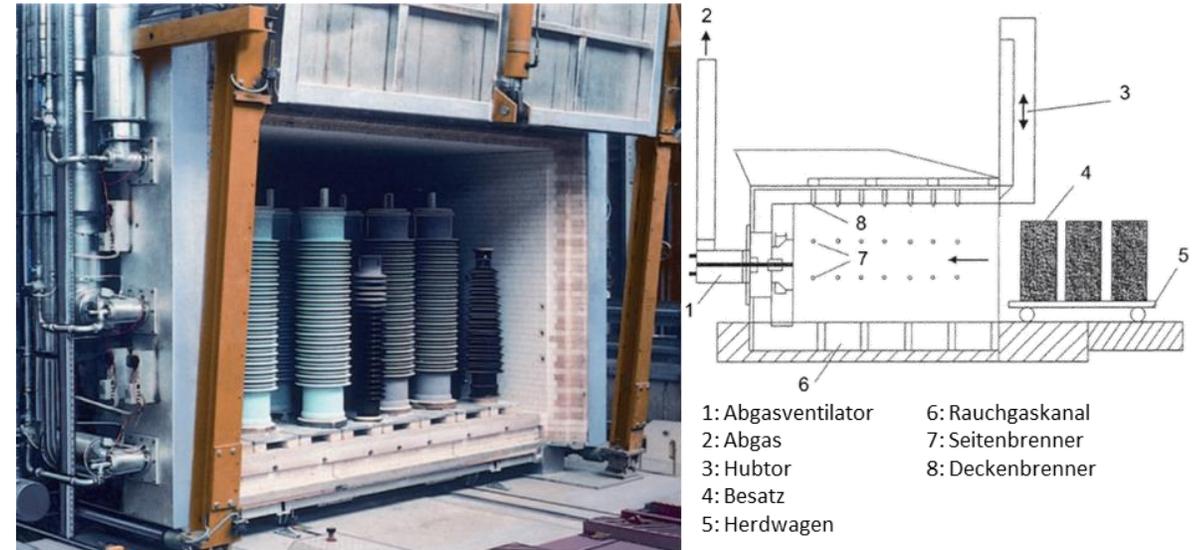
[2] (European Commission 2007b)

Thermoprozessanlagen (exemplarisch, nicht maßstabsgetreu)

Tunnelofens im Längsschnitt und der entsprechenden Temperaturverläufe von Prozessgas und Besatz



Herdwagenofen für den Isolatorenbrand



Quelle: (Becker 2011) (links), (VDI 2585:2018-12) (rechts)

Quelle: (Redemann 2019) nach (Specht 2014)

Auswahl der Anwendungen und Referenztechniken anhand von Energieverbrauch und CO₂-Emissionen

Abschätzung charakteristischer Anlagenkennzahlen zur Auswahl der betrachteten Anwendungen und Referenztechniken „Keramik- und Ziegelindustrie“ in DE

Anlagentypen	Jährlicher Anlagendurchsatz*		Jährlicher Energieverbrauch		Energiebedingte CO ₂ -Emissionen**	
	Gesamt	Anteil	Gesamt	Anteil	Gesamt	Anteil
Tunnelofen (fossil)	10,1 Mio. t	45 %	5.242 - 7.465 GWh	83 - 85 %	1.059 - 1.508 Tsd. t	83 - 85 %
Kammertrockner (fossil)	5,6 Mio. t	25 %	136 - 157 GWh	2 %	27 - 32 Tsd. t	2 %
Durchlauftrockner (fossil)	5,6 Mio. t	25 %	122 - 141 GWh	2 %	25 - 29 Tsd. t	2 %
Rollenofen (fossil)	0,8 Mio. t	4 %	444 - 644 GWh	7 %	90 - 130 Tsd. t	7 %
Herdwagen/Kammerofen (fossil)	0,2 Mio. t	1 %	200 - 554 GWh	3 - 6 %	40 - 112 Tsd. t	3 - 6 %
Verteilung						
Anteil Anlagen mit elektrischer Energie beheizt				< 1 %		< 1 %
Anteil Anlagen mit fossiler Energie beheizt				> 99 %		> 99 %
Davon im Rahmen der Studie betrachtete Anlagentypen (fett)				ca. 89 %		ca. 89 %

Erweiterte Darstellung und Datenbasis siehe Studie Anhang A.12.2

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

Anmerkungen:

* Der Anlagendurchsatz entspricht der Produktionsmenge eines Anlagentyps für den jeweiligen Prozessschritt. Durchläuft ein Produkt mehrere Prozessschritte entlang der Prozesskette, kann der kumulierte Anlagendurchsatz die branchenspezifische Produktionsmenge um ein Vielfaches überschreiten.

** Die prozessbedingten CO₂-Emissionen betragen 15 bis 275 kg_{CO2}/t_{Produkt}, dies entspricht je nach Anwendung und Anlage 10 bis 50 % der gesamten CO₂-Emissionen.

Betrachtete Anwendungen und Referenztechniken

Referenztechnik	
Definition	kontinuierlicher Brennofen Ziegel mit Erdgasbeheizung
Anwendung	kontinuierliches Brennen Ziegel ($T_{\text{Prozess}} \leq 1.250^{\circ}\text{C}$)
Thermoprozessanlage(n)	Tunnelofen
Beheizungstechnologie(n)	Erdgasbeheizung

Referenztechnik	
Definition	kontinuierlicher Brennofen Feuerfeststeine mit Erdgasbeheizung
Anwendung	kontinuierliches Brennen Feuerfeststeine ($T_{\text{Prozess}} > 1.250^{\circ}\text{C}$)
Thermoprozessanlage(n)	Tunnelofen
Beheizungstechnologie(n)	Erdgasbeheizung

Referenztechnik	
Definition	diskontinuierlicher Brennofen Feuerfeststeine mit Erdgasbeheizung
Anwendung	diskontinuierliches Brennen Feuerfeststeine ($T_{\text{Prozess}} > 1.250^{\circ}\text{C}$)
Thermoprozessanlage(n)	Herdwagenofen
Beheizungstechnologie(n)	Erdgasbeheizung

Definition von Alternativtechniken

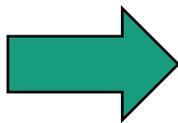
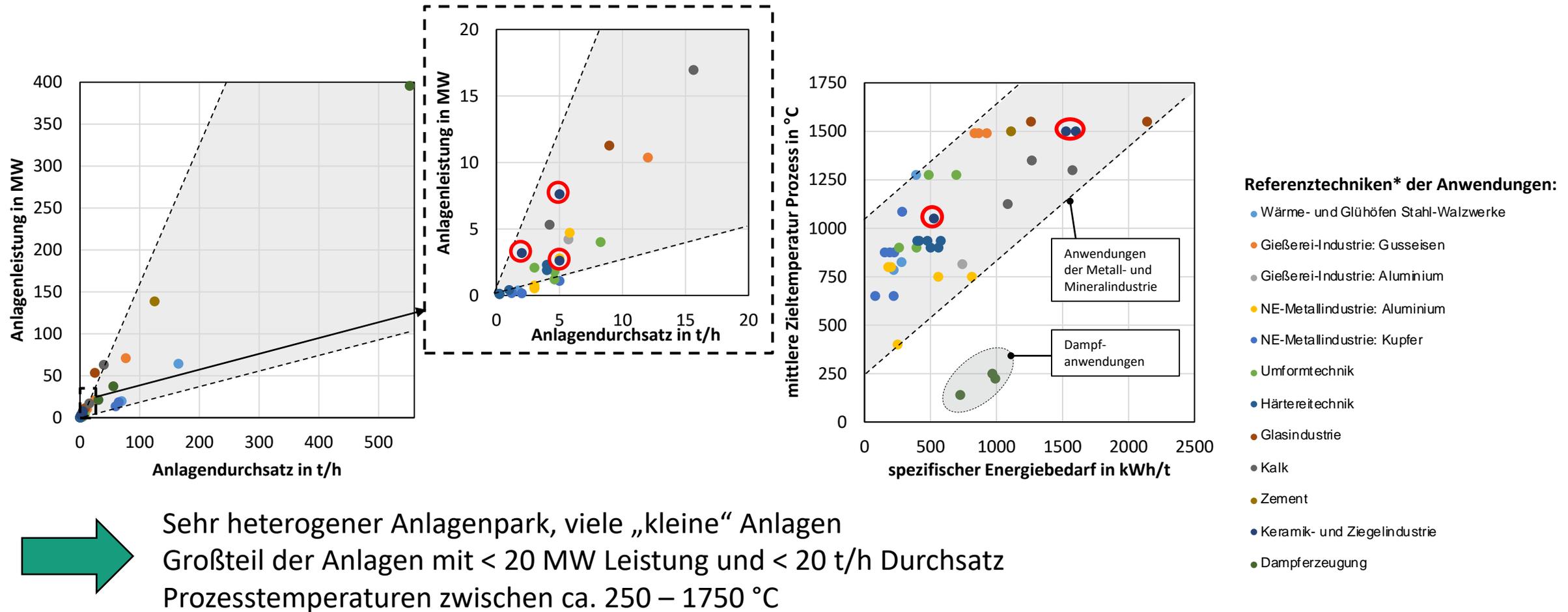
Technik und Technologie	
<i>Referenztechnik</i>	<i>kontinuierlicher Brennofen Ziegel mit Erdgasbeheizung</i>
Alternative Beheizungstechnologie(n)	Elektrifizierung Wasserstoffbeheizung
Alternativtechnik(en)	kontinuierlicher Brennofen Ziegel mit elektrischer Beheizung kontinuierlicher Brennofen Ziegel mit Wasserstoffbeheizung
Technik und Technologie	
<i>Referenztechnik</i>	<i>kontinuierlicher Brennofen Feuerfeststeine mit Erdgasbeheizung</i>
Alternative Beheizungstechnologie(n)	Elektrifizierung Wasserstoffbeheizung
Alternativtechnik(en)	kontinuierlicher Brennofen Feuerfeststeine mit elektrischer Beheizung kontinuierlicher Brennofen Feuerfeststeine mit Wasserstoffbeheizung
Technik und Technologie	
<i>Referenztechnik</i>	<i>diskontinuierlicher Brennofen Feuerfeststeine mit Erdgasbeheizung</i>
Alternative Beheizungstechnologie(n)	Elektrifizierung Wasserstoffbeheizung
Alternativtechnik(en)	diskontinuierlicher Brennofen Feuerfeststeine mit elektrischer Beheizung diskontinuierlicher Brennofen Feuerfeststeine mit Wasserstoffbeheizung

Erhebung von Kenndaten: Anwendung „kontinuierliches Brennen Ziegel“

Technik	Referenztechnik	Alternativtechnik 1	Alternativtechnik 2	Einheit	Quellen
Beheizungstechnologie	Erdgasbeheizung	Wasserstoffbeheizung	Elektrifizierung		
Thermoprozessanlagen	Tunnelofen	Tunnelofen	Tunnelofen		
Produkt	Ziegel				
Investition Neubau	321	321	321	EUR/t _{Kap.}	[1]
Investition Modernisierung	161	161	161	EUR/t _{Kap.}	[1]
Minimale Investition Neubau	214	214	214	EUR/t _{Kap.}	[1]
Min. Investition Modernisierung	107	107	107	EUR/t _{Kap.}	[1]
TRL	9	< 5	< 4	-	[1, 2, 3]
Energieträger 1	Erdgas	EE-Wasserstoff	Strom	-	[1, 2, 3]
Energieträger 2	keiner	keiner	keiner	-	
Energieträger 3	keiner	keiner	keiner	-	
Spezifischer Energiebedarf 1	0,525	0,525	0,499	MWh/t _{Pr.}	[1, 2, 4, 5]
Spezifischer Energiebedarf 2	0,000	0,000	0,000	MWh/t _{Pr.}	
Spezifischer Energiebedarf 3	0,000	0,000	0,000	MWh/t _{Pr.}	
Min. spezifischer Energiebedarf	0,450	0,450	0,450	MWh/t _{Pr.}	[1, 4, 5]
Prozessbedingte Emissionen	0,055	0,055	0,055	t _{CO2} /t _{Pr.}	[1, 4]
Betriebs- und Wartungskosten	32,1	32,1	32,1	EUR/t _{Kap.}	[1]
Abschreibungszeitraum	10	10	10	a	[1]
Lebensdauer	30	30	30	a	[1]
Repräsentative Kapazität	28.000	28.000	28.000	t _{Jahresleistung}	[1, 5, 6, 7]
Auslastung	0,90	0,90	0,90	1,00	[1]
Anteil Bestand 2020	100 %	0 %	0 %	%	[1, 2, 3]
Verfügbar ab	2020	2030	2030		
Verfügbar bis	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 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.

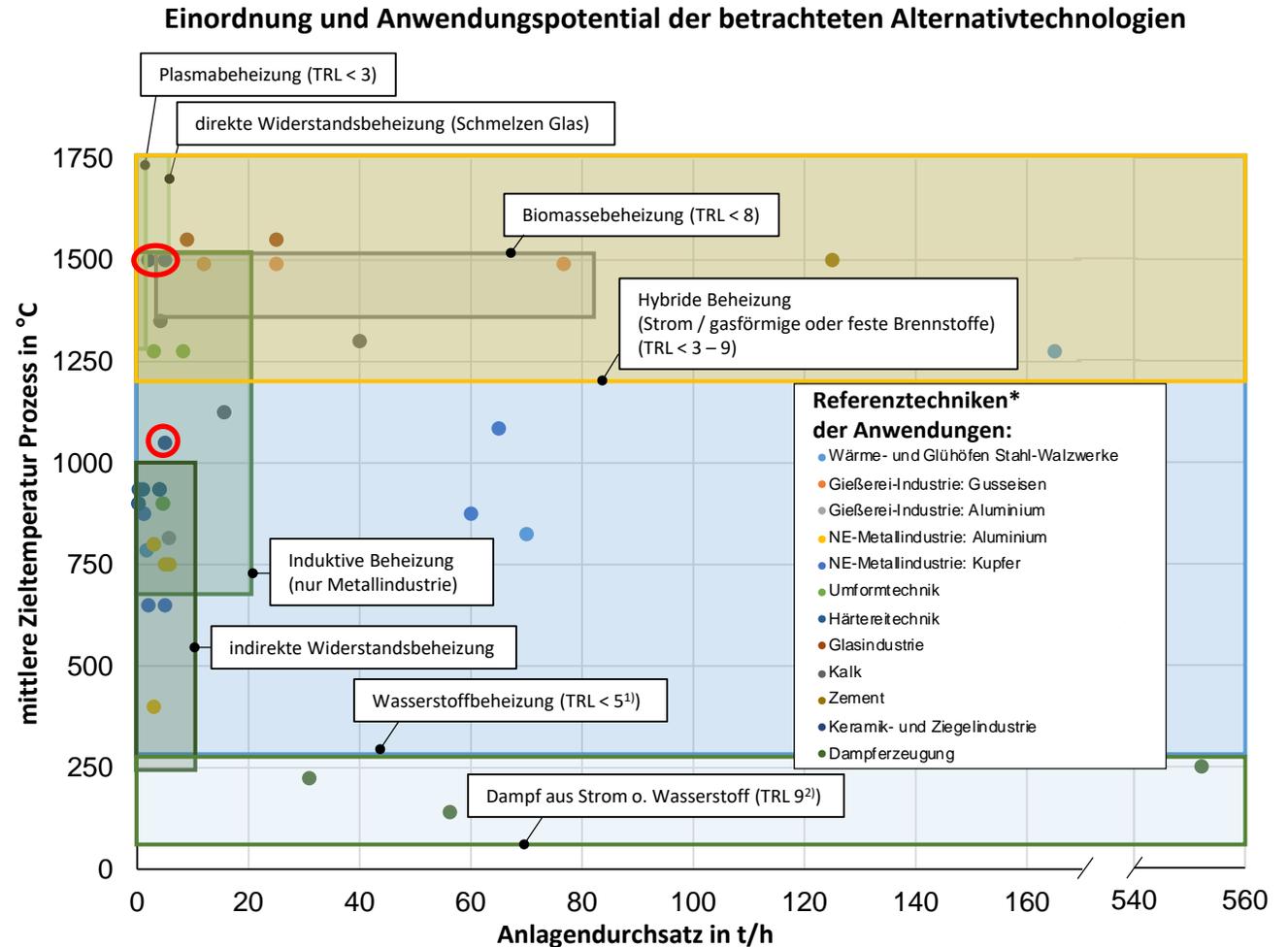
„n.b.“: Anwendung wurde nicht betrachtet. Das TRL der Technologiekombination wird gleich oder geringer als das der Technologie mit jeweils geringeren TRL eingeschätzt.

Weitere Anmerkungen siehe Bericht.

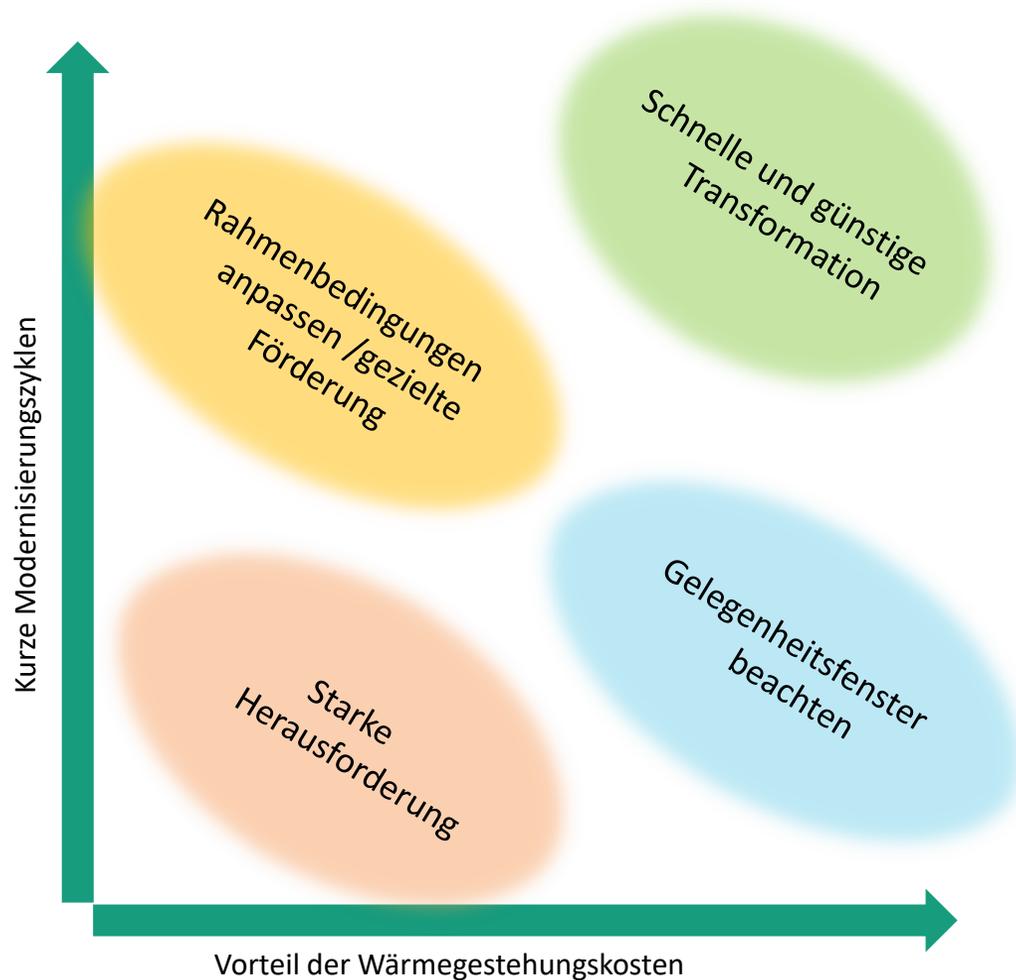
		Branche und Anwendung (zusammengefasst)																	
		Aluminium: Schmelzen, Erwärmen und Wärmebehandlung	Gießerei-Industrie: Schmelzen Al-Formguss	Kupfer: Schmelzen, Erwärmen und Wärmebehandlung	Gießerei-Industrie: Schmelzen Gusseisen	Härterechnik: Aufkohlen und Austenitisieren	Umformtechnik: Erwärmung 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 ¹⁾	< 3	< 3	< 3	< 3	< 3	< 2	< 2	< 2	9 ⁷⁾	
	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 ²⁾	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	< 6 ²⁾	n.b.	n.v.	n.v.	n.v.	< 4 ²⁾	9 ⁸⁾
	Erdgas-/EE-Methanbeheizung	(9)	(9)	(9)	< 8 ³⁾	(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 ⁴⁾	< 4 ⁴⁾	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	9	< 3 ⁵⁾	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 ⁴⁾	< 4 ⁴⁾	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	< 5	< 3 ⁵⁾	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 ⁶⁾	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
	Hybride Beheizung (Biomasse/H ₂ /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 ⁶⁾	n.v.	n.v.	n.v.	n.b.	n.v.

These 6: Elektrifizierung ist bei vielen Anwendungen mit niedrigeren Temp. vorteilhaft – H₂ 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

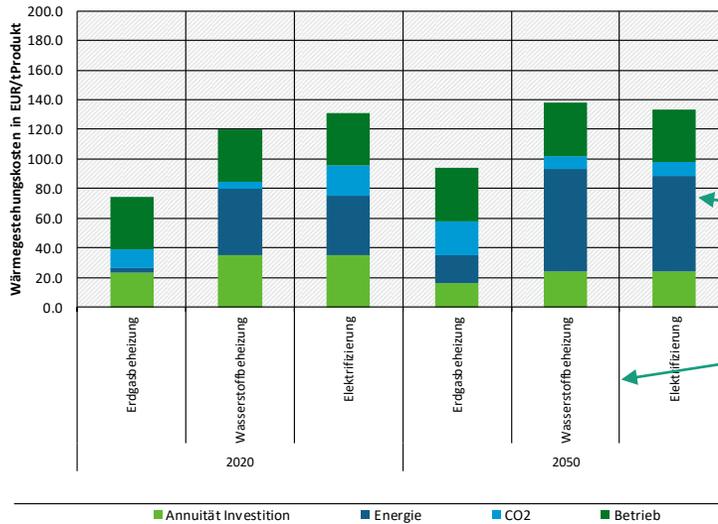


- Modernisierungszyklen
 - Orientieren sich an Abschreibungszeiträumen
 - Vorzeitiger Austausch von Anlagen ist eine Option (und in vielen Fällen notwendig)
- Wärmegestehungskosten
 - Investition, Energie, CO₂, Betrieb und Wartung
 - Differenz zu Referenztechnologie ist maßgeblich

Dimension 1: Wärmegestehungskosten bestimmen die Attraktivität der Techniken

Keramik- und Ziegelindustrie

Kontinuierliches Brennen Ziegel



Eigene Berechnung Fraunhofer ISI

Referenzfall

Transformation

Kostenkomponenten

Techniken

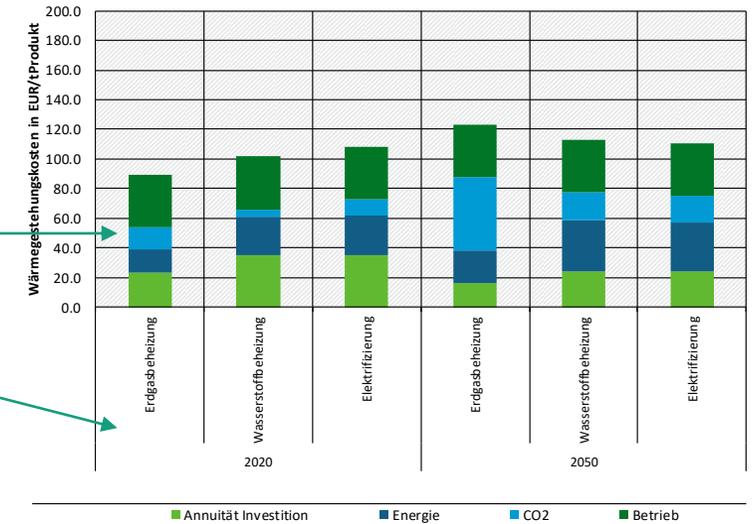
Gas: 30€/MWh
 Strom: 124 €/MWh
 CO₂: 125€/t

Gas: 37€/MWh
 Strom: 62 €/MWh
 CO₂: 300€/t

Angenommene, nicht der aktuellen Realität entsprechende Rahmenbedingungen!

Keramik- und Ziegelindustrie

Kontinuierliches Brennen Ziegel



Eigene Berechnung Fraunhofer ISI

- Konventionelle Technik (Erdgas) ist auch bis 2050 im Referenzfall deutlich wirtschaftlich.
- CO₂-Preise können Energieträger-Kostendifferenz bei Weitem nicht ausgleichen.

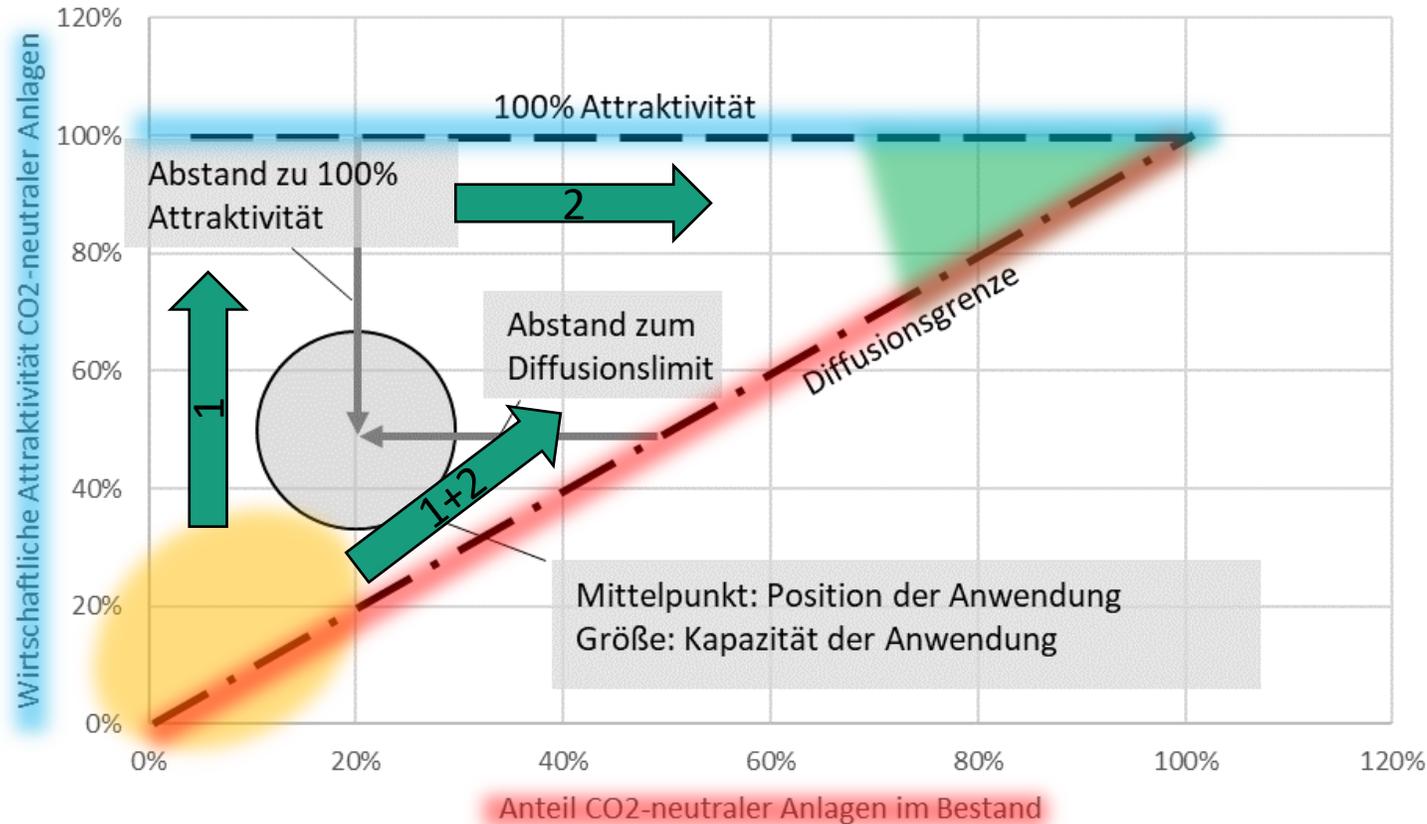
- Im Transformationsfall (hohe CO₂-Preise!) wird die Referenztechnik unwirtschaftlich.
- Kostendifferenz ist aber vergleichsweise gering (~10%).
- Strompreis auch abhängig von Anschlussleistung/Kapazität).
- CO₂-Preise kompensieren höhere Energieträgerpreise, zusätzliche Investitionen und andere Betriebskosten.

Dimension 2: Modernisierungszyklen bestimmen die Austauschrate der Anlagen

#	Anwendung	Lebensdauer	Lebensende bei Invest	Lebensende														
				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 von 2015+ sind gefährdet.
- Für ältere Anlagen existiert **genau eine Gelegenheit** für Reinvestition.
- Damit stehen diese Anwendungen bei Weitem nicht allein.
- Niedrigschwelligem Brennstoffwechsel kommt daher besondere Bedeutung zu.
 - Aber: Verfügbarkeit von Wasserstoff ist fraglich.
- Empfehlung:
 - Standortspezifisch Verfügbarkeit prüfen.
 - Elektrifizierung ernsthaft berücksichtigen.
 - NICHT in fossil investieren und auf Wasserstoff hoffen.

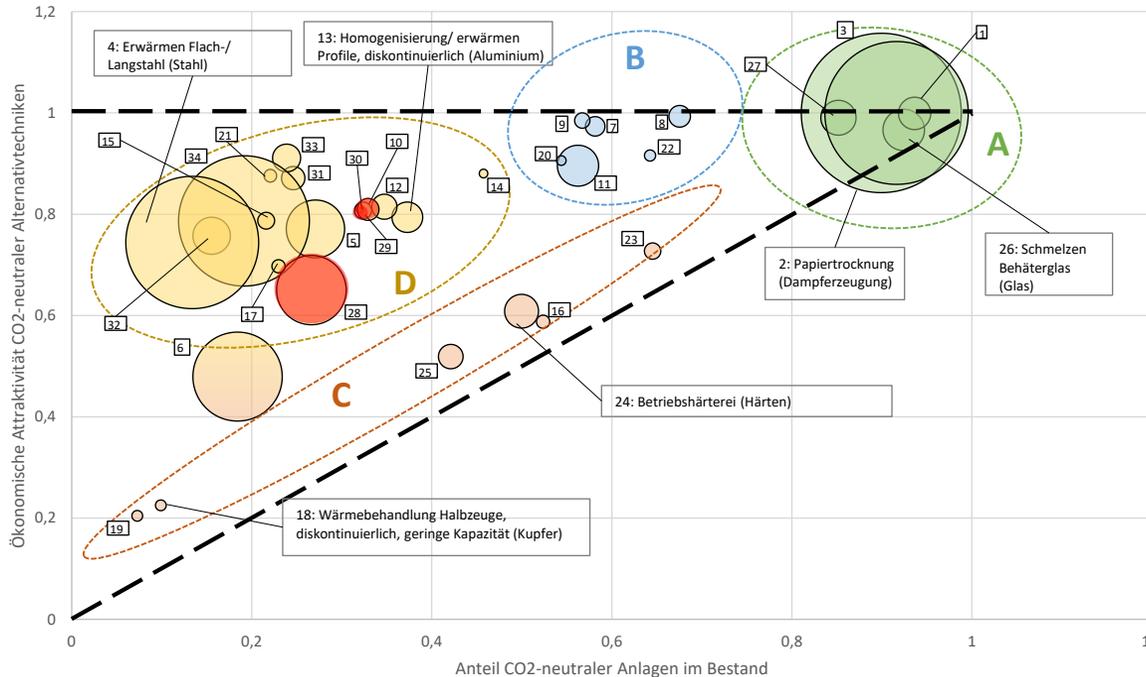
Erläuterung Diffusionsabbildung



■ 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 CO₂-neutraler Anlagen 2040



Transformationszenario, 2040

- 300€/t_{CO2}
- Strompreis 50-65€/MWh

- A ("Advantaged": im Vorteil): Anwendungen, die früh wirtschaftlich attraktive CO₂-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 CO₂-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 CO₂-neutralen Techniken aber wenig attraktiv sind. Diese Gruppe benötigt vor allem Preissignale, um CO₂-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 CO₂-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 CO₂-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 CO₂-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

Gemeinsame Diskussion und interaktives Arbeiten

Ergebnisse Glas (Auszug)

	Elektrifizierung		Wasserstoff		Hybrid		Sonstige Energieträger	
	F&E-Bedarf	Hindernisse	F&E-Bedarf	Hindernisse	F&E-Bedarf	Hindernisse	F&E-Bedarf	Hindernisse
Kont. Schmelzofen Behälterglas		Erweiterung Netzananschluss						
Kont. Schmelzofen Flachglas								
	Notwendige Rahmenbedingungen		Notwendige Rahmenbedingungen		Notwendige Rahmenbedingungen		Notwendige Rahmenbedingungen	
	Politisch CCFD Betriebskostenzuschüsse	Investitionszuschüsse langfristig stabile Rahmenbedingungen	Wirtschaftlich günstige erneuerbarer Strom Netzausbau, Netzananschluss	Strompreiskompensation günstige Netzentgelte, Steuern und Abgaben	Politisch	Wirtschaftlich	Politisch	Wirtschaftlich
	Notwendige Partner		Notwendige Partner		Notwendige Partner		Notwendige Partner	

Ergebnisse Keramik (Auszug)

	Elektrifizierung		Wasserstoff		Hybrid		Sonstige Energieträger	
	F&E-Bedarf	Hindernisse	F&E-Bedarf	Hindernisse	F&E-Bedarf	Hindernisse	F&E-Bedarf	Hindernisse
Kontinuierlicher Brennofen Ziegel		<p>Katharina ARmbrecht: bitte Ziegelroadmap beachten unter www.ziegel.de</p> <p>Lebensdauer der Heizelemente</p> <p>Katharina ARmbrecht: Anschlussleistung muss gegeben sein, häufig nicht der Fall</p>	<p>Katharina ARmbrecht: Verfügbarkeit und Preise entscheidend für Anwendung von H2</p> <p>Infrastruktur ab wann und wo verfügbar ?</p>					
Kontinuierlicher Brennofen Feuerfeststeine		<p>Katharina ARmbrecht: aus unserer Sicht sind die Investitionskosten für elektrische Ofen signifikant höher als für H2 Ofen, siehe Roadmap Ziegel</p>						
Diskontinuierlicher Brennofen Feuerfeststeine								
	Notwendige Rahmenbedingungen		Notwendige Rahmenbedingungen		Notwendige Rahmenbedingungen		Notwendige Rahmenbedingungen	
	Politisch	Wirtschaftlich	Politisch	Wirtschaftlich	Politisch	Wirtschaftlich	Politisch	Wirtschaftlich
	<p>staatliche Subventionen</p> <p>Katharina ARmbrecht: wir gehen davon aus, dass Ofen und Trockner entkoppelt werden und die Trockner dann elektrisch betrieben werden</p>		<p>Katharina ARmbrecht: Verfügbarkeit von grüner Energie als Voraussetzung: Ziegler sind keine Energieerzeuger</p> <p>Katharina ARmbrecht: Umstellung auf H2 bisher nur über KSV denkbar</p>					
	Notwendige Partner		Notwendige Partner		Notwendige Partner		Notwendige Partner	
			<p>Katharina ARmbrecht: aus Sicht von EU ETS Anlagen: die grünen Energien sollten in dem Maße aufwachsen, wie das Cap schrumpft. Es ist unklar, ob das gelingt.</p>					

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
<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
Web: www.iob.rwth-aachen.de

