
CO₂-NEUTRALE PROZESSWÄRMEERZEUGUNG

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

25. Oktober 2023 (online)

Herzlich willkommen!



Foto: NLMK Group

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)

- 09:15 – 09:40 Uhr: Ergebnisse Teil I: Branche Stahl (C. Schwotzer, M. Rehfeldt)
- 09:40 – 10:05 Uhr: Ergebnisse Teil II: Branche Schmieden (C. Schwotzer, M. Rehfeldt)
- 10:05 – 10:30 Uhr: Ergebnisse Teil III: Branche Härtereitechnik (C. Schwotzer, M. Rehfeldt)
- 10:30 – 10:40 Uhr: Einführung in die Methodik des gemeinsamen, interaktiven Arbeitens (C. Schwotzer)

- *10:40 – 10:50 Uhr: Pause*

- 10:50 – 11:50 Uhr: Gemeinsame Diskussion und interaktives Arbeiten (C. Schwotzer, C. Gondorf)
- 11:50 – 12:00 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

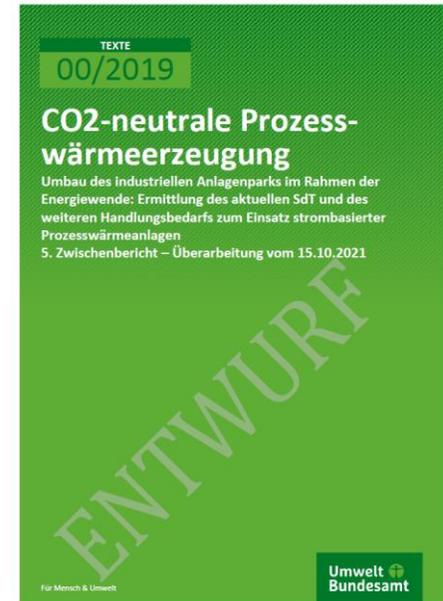


Dr. Christian Schwotzer, Felix Kaiser, Carsten Gondorf,
Justin Hauch, Jan Hof, Lukas Sankowski, Moritz Langhorst

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
 - 35 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

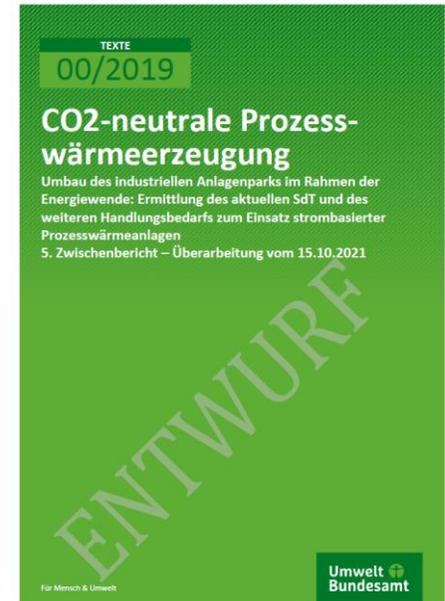


Gesamtbericht 739 Seiten (inkl. Anhang)

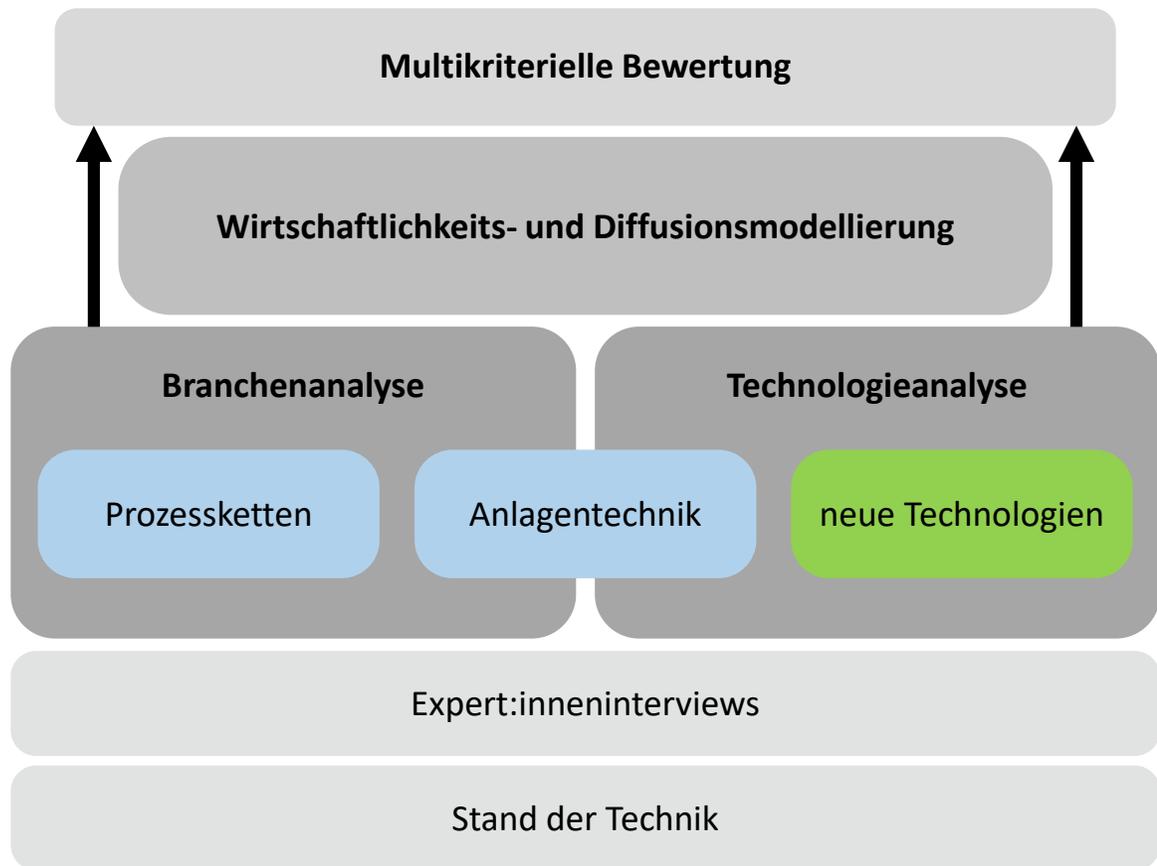
Zielsetzung der Studie

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 Systemsicht 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.

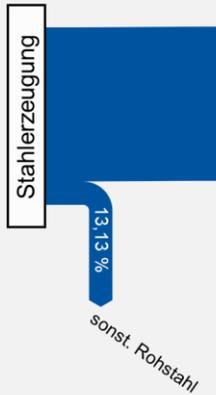
Branchen im Fokus der Studie

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	

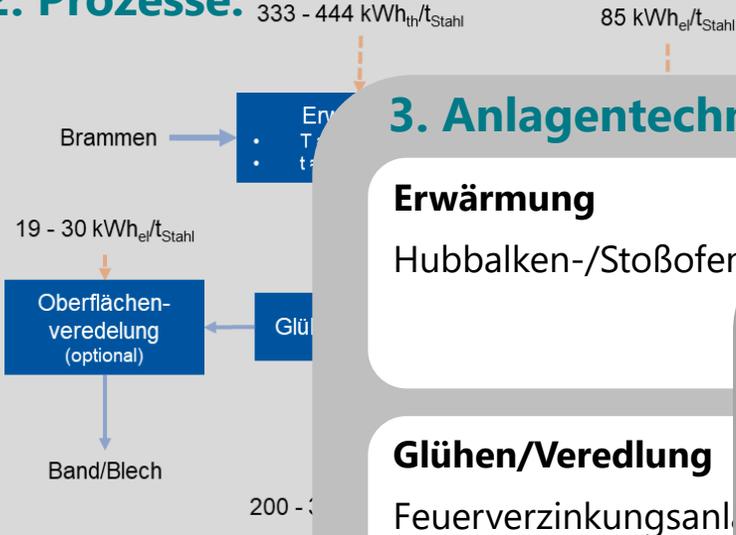
4-schrittiger Lösungsansatz der Branchen- und Technologieanalyse

1. Produkte:

Rohstahlerzeugung in 2016: 42,88 Mrd. t



2. Prozesse:



3. Anlagentechnik (Stand der Technik):

Erwärmung

Hubbalken-/Stoßofen

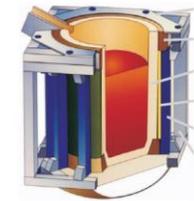
Glühen/Veredlung

Feuerverzinkungsanlage

4. CO₂-neutrale Alternativtechnologien:

Power-to-Heat (PtH)

Induktion, Widerstandsbeheizung, Plasma, ...

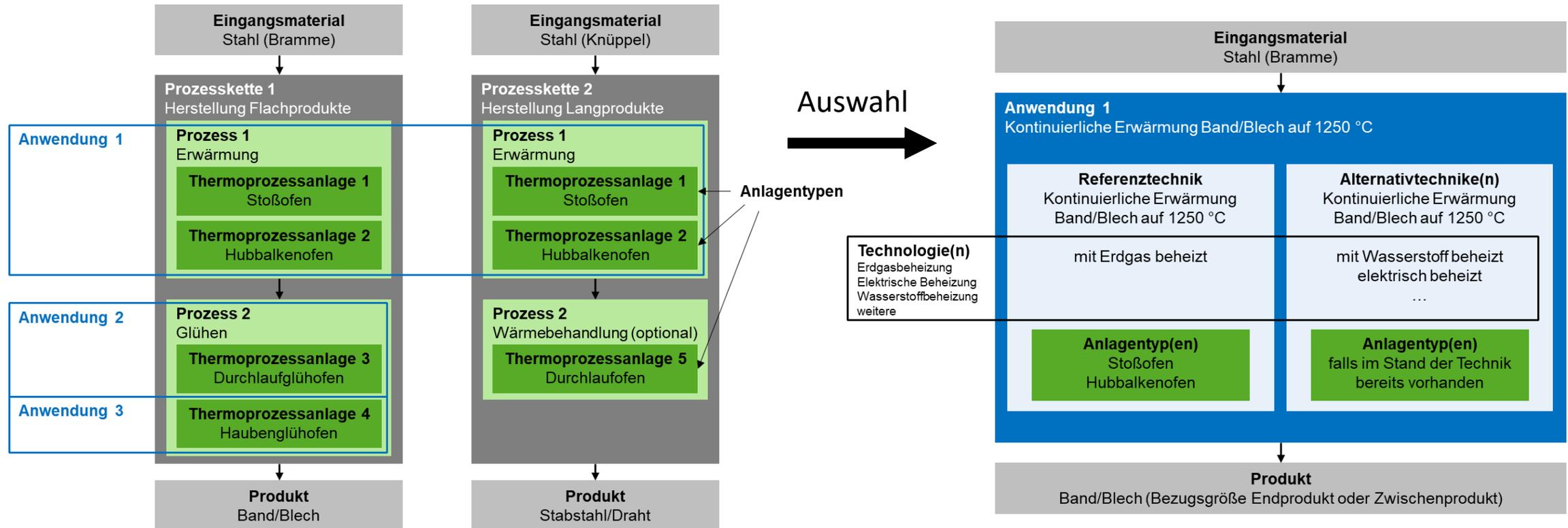


Power-to-Gas (PtG) / Power-to-Liquid (PtL)

Wasserstoff, EE-Methan, ...



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

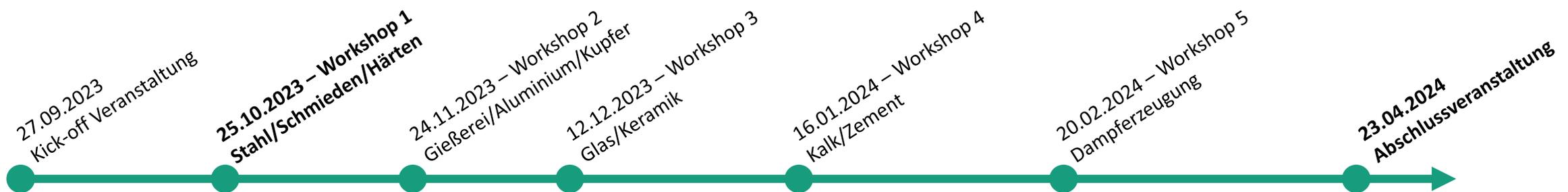


Die Veranstaltungsreihe verfolgt **zwei Ziele** - Kommunikation der Ergebnisse und Erarbeitung von Strategien zur Umsetzung

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.

Zusatztermin Härtereitechnik am 02.11.2023

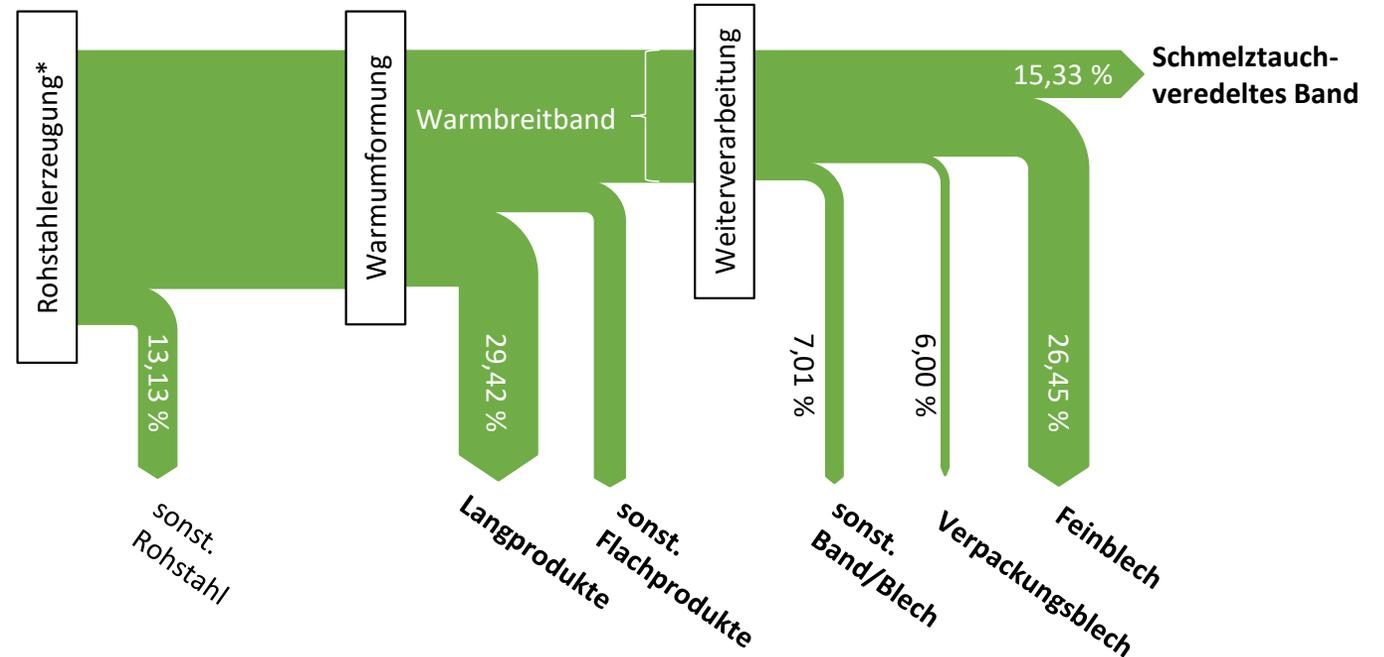


Ergebnisse Teil I: Branche Wärme- und Glühöfen Stahl-Walzwerke

Kurzbeschreibung der Branche und Fokus der Studie

- Die weltweite Rohstahlerzeugung betrug 2016 ca. 1,63 Milliarden Tonnen, wovon knapp die Hälfte aus China stammt.
- Deutschland mit 42,08 Millionen Tonnen in Europa mit Abstand am meisten Rohstahl und belegt damit international Rang 7.
- Zwei Drittel werden über die Oxygenstahlroute produziert, das restliche Drittel stammt aus der Elektrostahlroute.
- Fokus liegt auf der Weiterverarbeitung, insbesondere Lang- und Flachprodukte und der Produktion in Deutschland

Flussdiagramm für die Rohstahlverarbeitung in Deutschland (2016)

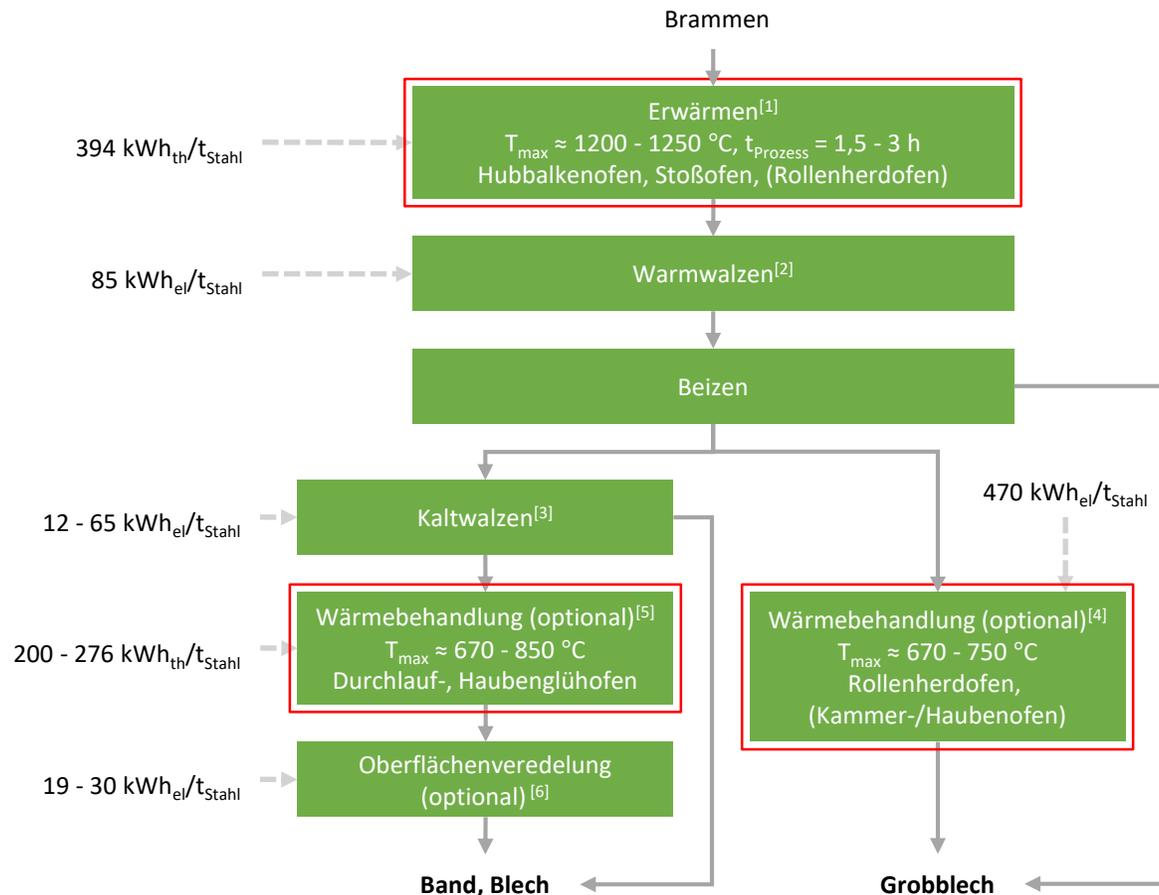


* in 2016: 42,08 Mio. t.

eigene Darstellung, Quelle: Daten nach (Wirtschaftsvereinigung Stahl 2018)

Prozessketten und Produkte:

Prozesskette der Flachstahlerzeugung



Legende:

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

Anmerkungen:

Der thermische Energiebedarf für die **optionalen Glühprozesse** fasst das Glühen von Grobblechen und feineren Produkten wie Weißblechen für Verpackungsanwendungen zusammen, woraus sich Unterschiede im Energieverbrauch und Temperaturbereich ergeben.

Bei der **Verzinkung** ist nur die Energie berücksichtigt, die notwendig ist, um das Zinkbad zu betreiben. In konventionellen Feuerverzinkungsanlagen wird das Band jedoch vor dem Eintauchen ins Zinkbad immer wärmebehandelt, weshalb dieser Schritt bei Betrachtung solcher Anlagen ebenfalls miteinbezogen werden muss.

Quellen:

[1]: Energieverbrauch: Mittelwert aus (European Commission 2019); Temperatur und Dauer: Mittelwert aus (Wladika 1961) und (Weber 1974)

[2]: Stromverbrauch: Mittelwert aller Warmwalzvorgänge aus (European Commission 2019), verglichen mit elektrischem Verbrauch ganzer Walzwerke aus (Spenlé 1959) und (Weber 1974) und entsprechend ergänzt

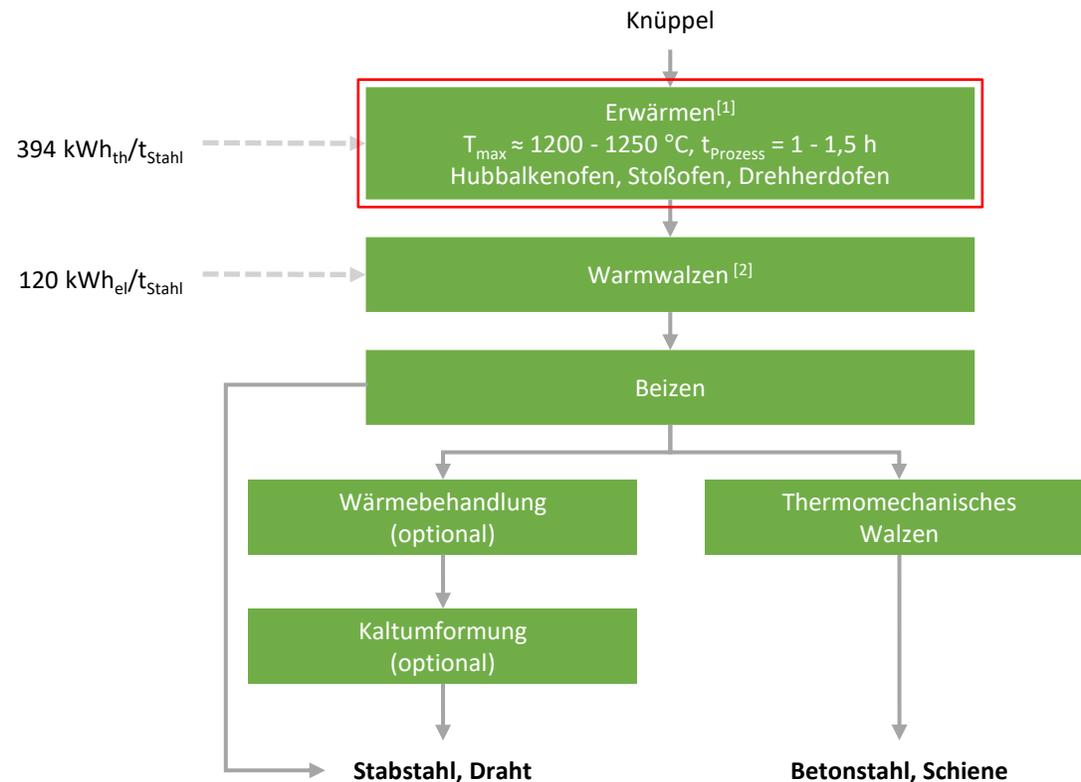
[3]: Stromverbrauch: Berechnet aus Anschlussleistung und durchschnittlichem Produktdurchsatz nach (Thyssenkrupp Rasselstein GmbH). Gemittelt mit Durchschnitt aus (European Commission 2019)

[4]: Energieverbrauch: Mittelwert aller Glühprozesse beim Warmwalzen aus (European Commission 2019). Verglichen mit Verbrauchsangabe realer Grobblechanlage in (Weber 1974)

[5]: Energieverbrauch: Berechnet aus Anschlussleistung und durchschnittlichem Produktdurchsatz nach (Thyssenkrupp Rasselstein GmbH). Gemittelt mit Durchschnitt aus (European Commission 2019)

[6]: Stromverbrauch: Berechnet aus Anschlussleistung und durchschnittlichem Produktdurchsatz nach (INDUGA GmbH & Co. KG), sowie aus Gesamtenergieverbrauch verschiedener Anlagen nach (Bhadra et al. 2013) und dem Mittelwert des Energieverbrauchs von Erwärmungsöfen in einer Feuerverzinkungsanlage aus (European Commission 2019)

Prozessketten und Produkte: Prozesskette der Langstahlerzeugung



Legende:

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

Anmerkungen:

Die **Wärmebehandlung** findet in den Öfen des Prozessschrittes Erwärmung oder in Herdwagen-, Kammer- sowie Durchlauföfen statt. Der Anteil dieses Prozessschritts an der produzierten Menge über diese Prozesskette beträgt weniger als 20 % (eigene Annahme auf Basis der Recherche zu Produktionszahlen und Anlagenpark) und wird nicht weiter betrachtet.

Quellen:

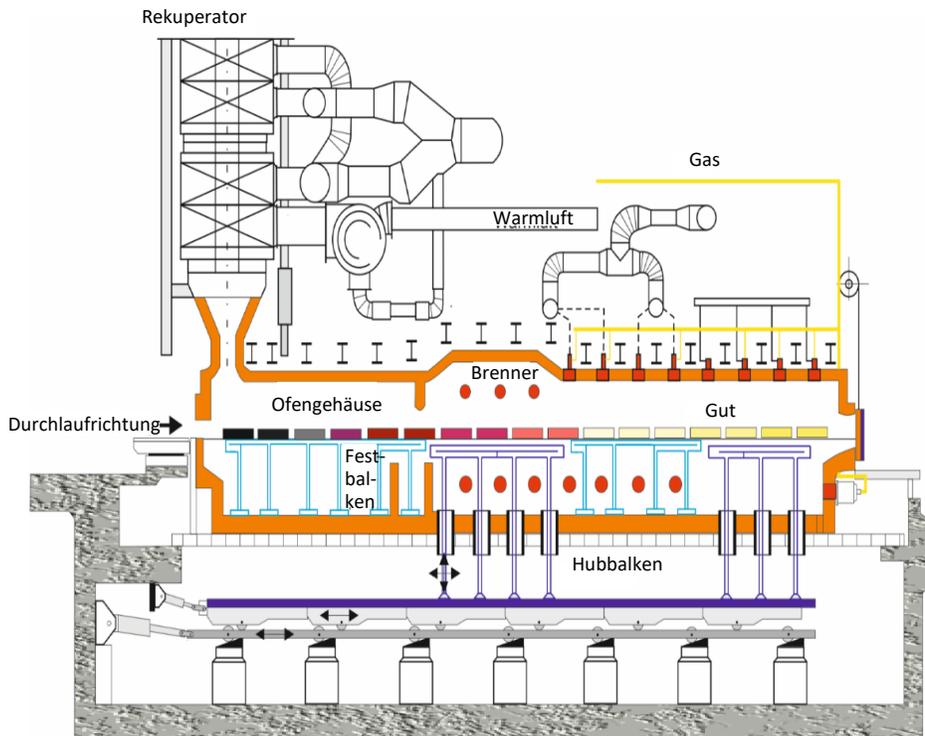
[1]: Energieverbrauch: Berechnet aus Gesamt-Gasverbrauch des Ofens, Heizwert des als Brennstoff verwendeten Hochofengases und dem durchschnittlichen Produktdurchsatz der Anlage aus (Weyel und Weide 1957). Anschließend gemittelt mit dem Datensatz des (European Commission 2019), sowie der Energieverbrauchsangaben der Anlage aus (SMS Meer GmbH).

Temperatur und Dauer: Mittelwert aus (Weyel und Weide 1957) und (SMS Meer GmbH)

[2]: Stromverbrauch: Gemittelt aus (European Commission 2019). Angepasst nach Stromverbräuchen ganzer Walzwerke in (Kösters 1962), (Weyel und Weide 1957) und (Schwenzfeier und Pawelski 1963)

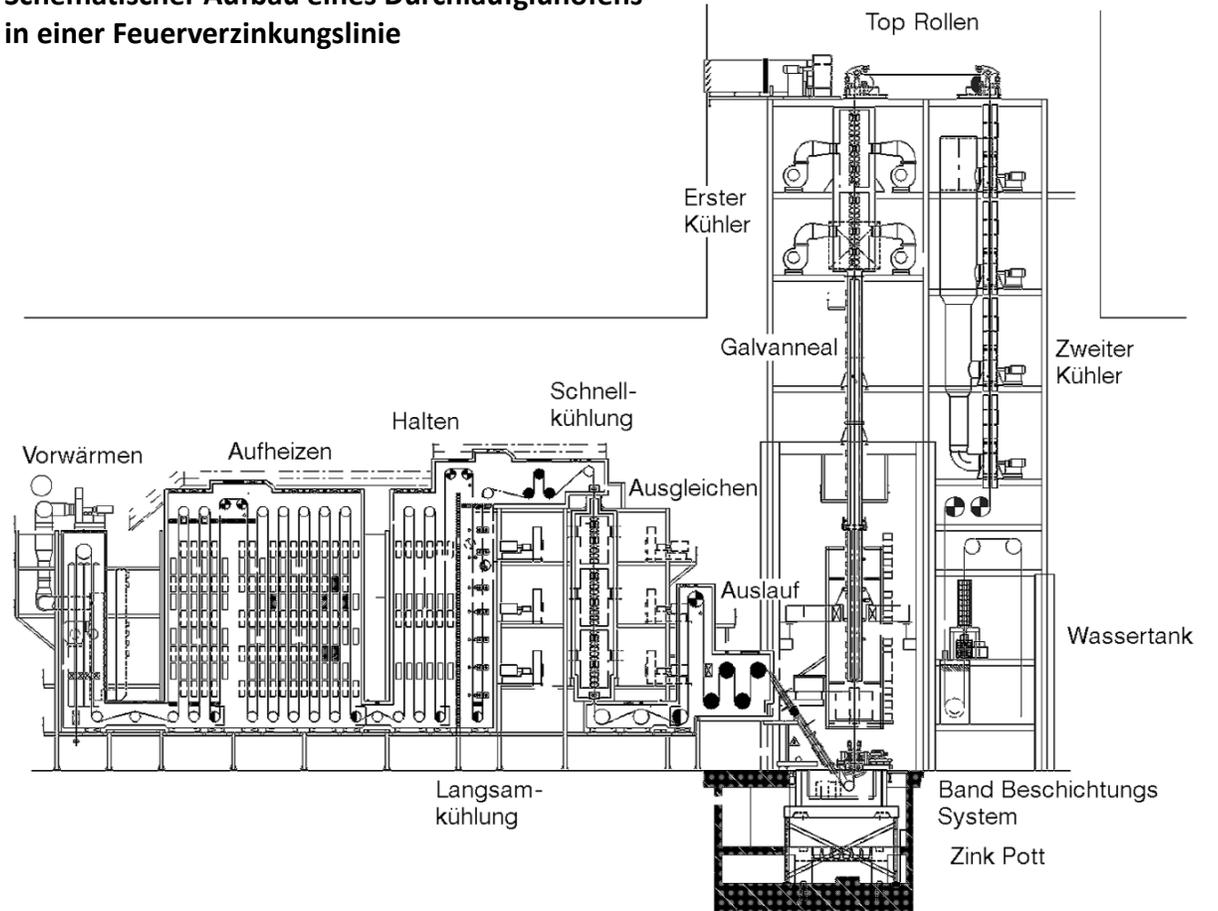
Thermoprozessanlagen (exemplarisch, nicht maßstabsgetreu)

Schematischer Aufbau eines Hubbalkenofens



Quelle: nach (Hachenberg et al. 1987)

Schematischer Aufbau eines Durchlaufglühofens
in einer Feuerverzinkungslinie



Quelle: (Raick und Chalh-Andreas 2011)

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

Abschätzung charakteristischer Anlagenkennzahlen zur Auswahl der betrachteten Anwendungen und Referenztechniken „Wärme- und Glühöfen Stahl“ in DE

Anlagentypen	Jährlicher Anlagendurchsatz*		Jährlicher Energieverbrauch		Energiebedingte CO ₂ -Emissionen	
	57,4 Mio. t	Anteil	18.774 - 23.507 GWh	Anteil	3.773 - 4.725 Tsd. t	Anteil
Hubbalken-/Stoßofen (fossil)	28,8 Mio. t	50 %	11.345 GWh	48 – 60 %	2.280 Tsd. t	48 - 60 %
Rollenherdofen (fossil)	6,8 Mio. t	12 %	2.844 GWh	12 - 15 %	570 Tsd. t	12 - 15 %
Durchlaufglühofen (fossil)	5,1 Mio. t	9 %	1.010 - 1.528 GWh	5 - 7 %	203 - 307 Tsd. t	5 - 7 %
Haubenglühofen (fossil)	15,3 Mio. t	27 %	3.054 - 7.176 GWh	16 - 31 %	615 - 1.444 Tsd. t	16 - 31 %
Drehherdofen (fossil)	1,1 Mio. t	2 %	452 GWh	2 %	91 Tsd. t	2 %
Herdwagen/Kammerofen (fossil)	0,3 Mio. t	1 %	69 - 162 GWh	< 1 %	14 - 33 Tsd. t	< 1 %
Verteilung						
Anteil Anlagen mit elektrischer Energie beheizt				< 1 %	< 1 %	
Anteil Anlagen mit fossiler Energie beheizt				> 99 %	> 99 %	
Davon im Rahmen der Studie betrachteten Anlagentypen (fett)				97 %	79 %	

* 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.

Quellen: (Deutsche Emissionshandelsstelle (DEHSt) 2020; Umweltbundesamt (UBA) 2016; Wirtschaftsvereinigung Stahl 2018)

Betrachtete Anwendungen und Referenztechniken

Referenztechnik	
Definition	kontinuierlicher Erwärmungs-ofen Flach-/Langstahl mit Erdgasbeheizung
Anwendung	kontinuierliches Erwärmen Flach-/Langstahl ($T_{\text{Werkstück,max}} \approx 1.250^{\circ}\text{C}$)
Thermoprozessanlage(n)	Hubbalkenofen, Stoßofen, Rollenherdofen
Beheizungstechnologie(n)	Erdgasbeheizung (offen)
Referenztechnik	
Definition	kontinuierlicher Wärmebehandlungs-ofen Flachstahl mit Erdgasbeheizung
Anwendung	kontinuierliche Wärmebehandlung Flachstahl ($T_{\text{Werkstück,max}} \approx 850^{\circ}\text{C}$)
Thermoprozessanlage(n)	Durchlaufglühofen
Beheizungstechnologie(n)	Erdgasbeheizung (indirekt SHR)
Referenztechnik	
Definition	diskontinuierlicher Wärmebehandlungs-ofen Flachstahl mit Erdgasbeheizung
Anwendung	diskontinuierliche Wärmebehandlung Flachstahl ($T_{\text{Werkstück,max}} \approx 850^{\circ}\text{C}$)
Thermoprozessanlage(n)	Haubenglühofen
Beheizungstechnologie(n)	Erdgasbeheizung (indirekt SHR)

Definition von Alternativtechniken

Technik und Technologie	
Referenztechnik	<i>kontinuierlicher Erwärmungssofen Flach-/Langstahl mit Erdgasbeheizung ($T_{\text{Werkstück,max}} \approx 1.250^{\circ}\text{C}$)</i>
Alternative Beheizungstechnologie(n)	hybride Beheizung (Strom/Erdgas (EE-Methan)) hybride Beheizung (Strom/Wasserstoff) Wasserstoffbeheizung
Alternativtechnik(en)	konti. Erwärmungssofen Flach-/Langstahl mit hybrider Beh. (Strom/Erdgas) konti. Erwärmungssofen Flach-/Langstahl mit hybrider Beheizung (Strom/H ₂) kontinuierlicher Erwärmungssofen Flach-/Langstahl mit Wasserstoffbeheizung
Technik und Technologie	
Referenztechnik	<i>kontinuierlicher Wärmebehandlungssofen Flachstahl mit Erdgasbeheizung ($T_{\text{Werkstück,max}} \approx 850^{\circ}\text{C}$)</i>
Alternative Beheizungstechnologie(n)	Elektrifizierung (Widerstandsbeheizung im Strahlheizrohr) Wasserstoffbeheizung (bzw. andere synthetische Gase)
Alternativtechnik(en)	konti. Wärmebehandlungssofen Flachstahl mit elektr. Widerstandsbeheizung kontinuierlicher Wärmebehandlungssofen Flachstahl mit Wasserstoffbeheizung
Technik und Technologie	
Referenztechnik	<i>diskontinuierlicher Wärmebehandlungssofen Flachstahl mit Erdgasbeheizung ($T_{\text{Werkstück,max}} \approx 850^{\circ}\text{C}$)</i>
Alternative Beheizungstechnologie(n)	Elektrifizierung (Widerstandsbeheizung mit Schutzhaube) Wasserstoffbeheizung (bzw. andere synthetische Gase)
Alternativtechnik(en)	diskontinuierlicher Wärmebehandlungssofen Flachstahl mit elektrischer Widerstandsbeheizung diskontinuierlicher Wärmebehandlungssofen Flachstahl mit Wasserstoffbeheizung

Erhebung von Kenndaten: „Kontinuierliches Erwärmen Flach-/Langstahl“

Technik	Referenztechnik	Alternativtechnik 1	Alternativtechnik 2	Alternativtechnik 3	Einheit	Quellen
Beheizungstechnologie	Erdgasbeheizung	Hybride Beheizung (Strom/Erdgas (EE-Methan))	Hybride Beheizung (Strom/Wasserstoff)	Wasserstoffbeheizung		
Thermoprozessanlagen	Hubbalken-, Stoßofen	Drehherdofen	Drehherdofen	Hubbalken-, Stoßofen		
Produkt	Flach- und Langprodukte Walzstahl					
Investition Neubau	21,4	34,1	35,1	21,4	EUR/t _{Kap.}	[1], [3], [5], [6]
Investition Modernisierung	10,7	11,9	12,3	10,7	EUR/t _{Kap.}	[1], [3], [5], [6]
Minimale Investition Neubau	21,4	34,1	35,1	21,4	EUR/t _{Kap.}	[1], [3], [5]
Min. Investition Modernisierung	10,7	11,9	12,3	10,7	EUR/t _{Kap.}	[1], [3], [5]
TRL	9	< 3*	< 3*	< 4	-	[1], [2]
Energieträger 1	Erdgas	Strom	Strom	EE-Wasserstoff	-	
Energieträger 2	keiner	Erdgas	EE-Wasserstoff	keiner	-	
Energieträger 3	keiner	keiner	keiner	keiner	-	
Spezifischer Energiebedarf 1	0,390	0,222	0,222	0,390	MWh/t _{Pr.}	[1], [2], [5], [6]
Spezifischer Energiebedarf 2	0,000	0,148	0,148	0,000	MWh/t _{Pr.}	[6]
Spezifischer Energiebedarf 3	0,000	0,000	0,000	0,000	MWh/t _{Pr.}	
Min. spezifischer Energiebedarf	0,370	0,370	0,370	0,370	MWh/t _{Pr.}	[1], [2], [7]
Prozessbedingte Emissionen	0,000	0,000	0,000	0,000	t _{CO2} /t _{Pr.}	
Betriebs- und Wartungskosten	2,1	3,4	3,1	2,1	EUR/t _{Kap.}	[1]
Abschreibungszeitraum	10	10	10	10	a	[1], [4]
Lebensdauer	35	30	30	35	a	[1]
Repräsentative Kapazität	1.400.000	220.000	220.000	1.400.000	t _{Jahresleistung}	[1], [2]
Auslastung	0,90	0,80	0,80	0,90	1,00	[1], [2]
Anteil Bestand 2020	100 %	0 %	0 %	0 %	%	
Verfügbar ab	2020	2040	2040	2030		[1], [2]
Verfügbar bis	2050	2050	2050	2050		[1], [2]

Annahmen, Legende und Quellen siehe Bericht

Erhebung von Kenndaten: „Kontinuierliche Wärmebehandlung Flachstahl“

Technik	Referenztechnik	Alternativtechnik 1	Alternativtechnik 2	Einheit	Quellen
Beheizungstechnologie	Erdgasbeheizung	Wasserstoffbeheizung	Elektrifizierung		
Thermoprozessanlagen	Durchlaufglühofen	Durchlaufglühofen	Durchlaufglühofen		
Produkt	Flachprodukte Walzstahl				
Investition Neubau	190,3	190,3	152,2	EUR/t _{Kap.}	[1], [5]
Investition Modernisierung	95,1	95,1	76,1	EUR/t _{Kap.}	[1], [5]
Minimale Investition Neubau	190,3	190,3	152,2	EUR/t _{Kap.}	[1], [5]
Min. Investition Modernisierung	95,1	95,1	76,1	EUR/t _{Kap.}	[1], [5]
TRL	9	< 4	< 4	-	[1], [2]
Energieträger 1	Erdgas	EE-Wasserstoff	Strom	-	[1], [2]
Energieträger 2	keiner	keiner	keiner	-	
Energieträger 3	keiner	keiner	keiner	-	
Spezifischer Energiebedarf 1	0,280	0,280	0,240	MWh/t _{Pr.}	[1], [2], [5], [6]
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	0,250	0,250	0,210	MWh/t _{Pr.}	[1], [2], [5], [6]
Prozessbedingte Emissionen	0,000	0,000	0,000	t _{CO2} /t _{Pr.}	
Betriebs- und Wartungskosten	11,4	11,4	11,4	EUR/t _{Kap.}	[1]
Abschreibungszeitraum	10	10	10	a	[1], [4]
Lebensdauer	35	35	35	a	[1]
Repräsentative Kapazität	530.000	530.000	530.000	t _{Jahresleistung}	[1], [2]
Auslastung	0,95	0,95	0,95	1,00	[1], [2]
Anteil Bestand 2020	100%	0%	0%	%	
Verfügbar ab	2020	2030	2030		[1], [2]
Verfügbar bis	2050	2050	2050		[1], [2]

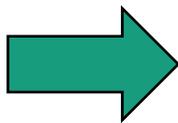
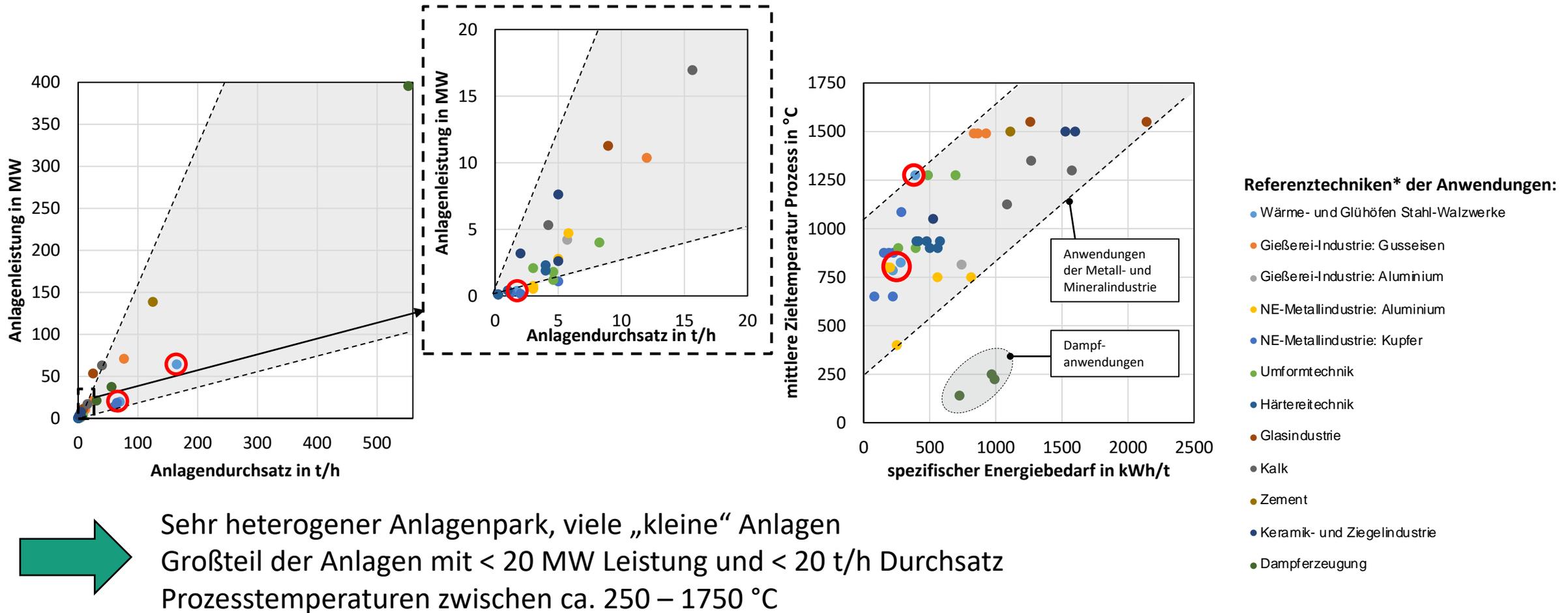
Annahmen, Legende und Quellen siehe Bericht

Erhebung von Kenndaten: „Diskontinuierliche Wärmebehandlung Flachstahl“

Technik	Referenztechnik	Alternativtechnik 1	Alternativtechnik 2	Einheit	Quellen
Beheizungstechnologie	Erdgasbeheizung	Wasserstoffbeheizung	Elektrifizierung		
Thermoprozessanlagen	Haubenglühofen	Haubenglühofen	Haubenglühofen		
Produkt	Flachprodukte Walzstahl				
Investition Neubau	606,1	606,1	484,8	EUR/t _{Kap.}	[1], [4]
Investition Modernisierung	18,2	18,2	14,5	EUR/t _{Kap.}	[1], [4]
Minimale Investition Neubau	606,1	606,1	484,8	EUR/t _{Kap.}	[1], [4]
Min. Investition Modernisierung	18,2	18,2	14,5	EUR/t _{Kap.}	[1], [4]
TRL	9	< 4	< 4	-	[1], [2]
Energieträger 1	Erdgas	EE-Wasserstoff	Strom	-	[1], [2]
Energieträger 2	keiner	keiner	keiner	-	
Energieträger 3	keiner	keiner	keiner	-	
Spezifischer Energiebedarf 1	0,220	0,220	0,190	MWh/t _{Pr.}	[1], [2]
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	0,200	0,200	0,190	MWh/t _{Pr.}	[1], [2], [5]
Prozessbedingte Emissionen	0,000	0,000	0,000	t _{CO2} /t _{Pr.}	
Betriebs- und Wartungskosten	242,4	242,4	242,4	EUR/t _{Kap.}	[1]
Abschreibungszeitraum	10	10	10	a	[1], [3]
Lebensdauer	35	35	35	a	[1]
Repräsentative Kapazität	10.000	10.000	10.000	t _{Jahresleistung}	[1], [2]
Auslastung	0,95	0,95	0,95	1,00	[1], [2]
Anteil Bestand 2020	100%	0%	0%	%	
Verfügbar ab	2020	2030	2030		[1], [2]
Verfügbar bis	2050	2050	2050		[1], [2]

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.

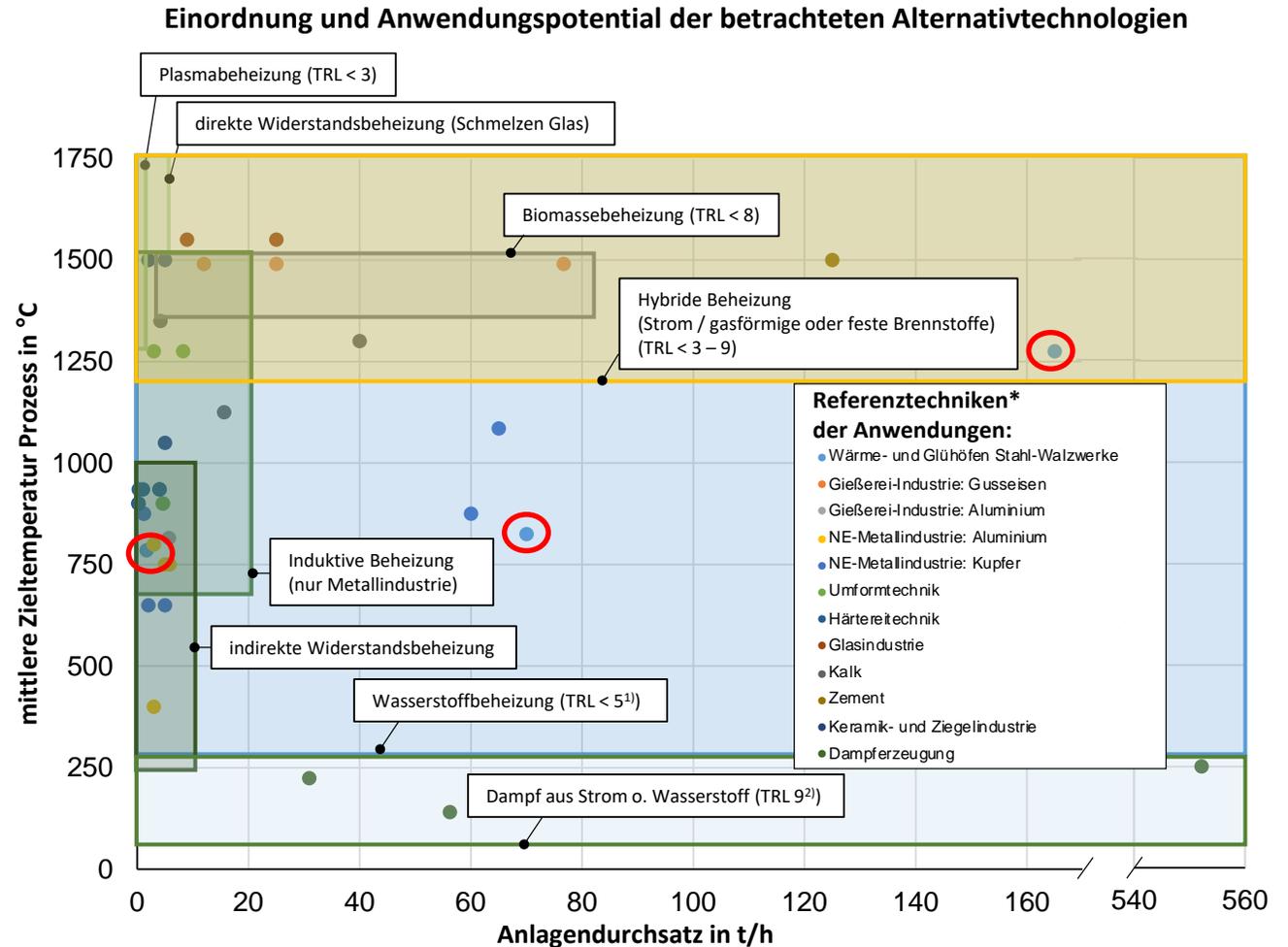
„n.b.“: Anwendung wurde nicht betrachtet. Das TRL der Technologiekombination wird gleich oder geringer als das der Technologie mit jeweils geringeren TRL eingeschätzt.

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	< 2	9 ⁷⁾
	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 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.



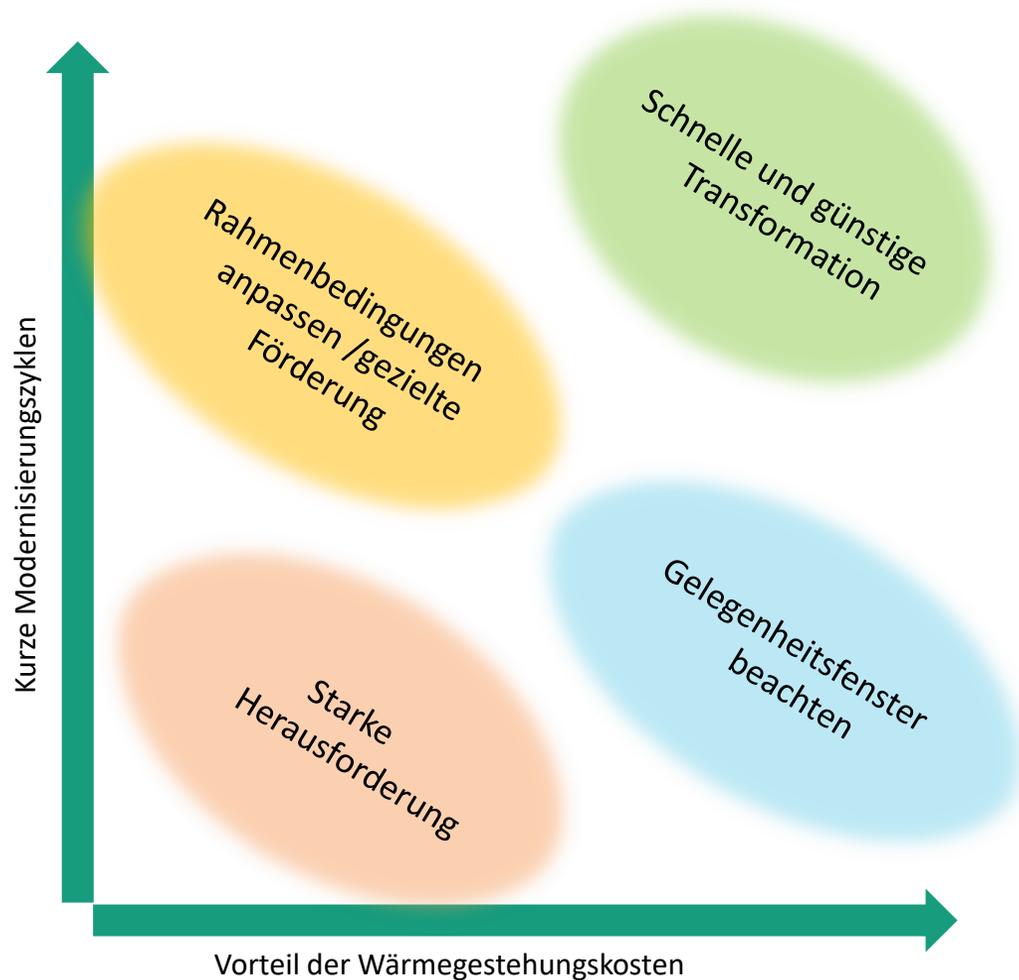
Zusammenfassung und Zwischenergebnis

	Betrachtete Anwendungen und Thermoprozessanlagen		
	Kontinuierliches Erwärmen Flach-/Langstahl ($T_{\text{Prozess}} \approx 1250 \text{ }^\circ\text{C}$) Hubbalken-, Stoßofen, Rollenherdofen	Kontinuierliche Wärmebehandlung Flachstahl ($T_{\text{Prozess}} \approx 850 \text{ }^\circ\text{C}$) Durchlaufglühofen	Diskontinuierliche Wärmebehandlung Flachstahl ($T_{\text{Prozess}} \approx 850 \text{ }^\circ\text{C}$) Haubenglühofen
Technisches Gesamtpotenzial für die betrachteten Anwendungen im Anlagenpark in Deutschland	Stand der Technik: ca. 27 Großanlagen* Durchsatz: 130 – 200 t/h Erdgasbeheizung > 99 % Alternativtechnologien: Elektrifizierung, Wasserstoffbeheizung	Stand der Technik: ca. 14 Großanlagen* Durchsatz: hier \approx 70 t/h Erdgasbeheizung > 99 % Alternativtechnologien: Elektrifizierung, Wasserstoffbeheizung	Stand der Technik: ca. 1700 Großanlagen* Durchsatz: hier \approx 2 t/h Erdgasbeheizung > 99 % Alternativtechnologien: Elektrifizierung, Wasserstoffbeheizung
F&E-Bedarf	hybride Beheizung (Strom/Erdgas): TRL < 3, Nachweis der Funktionstüchtigkeit nur bedingt gegeben, Entwicklung und Demonstrationsbetrieb in Einsatzumgebung insbesondere für hohe Kapazitäten notwendig hybride Beheizung (Strom/Wasserstoff): TRL < 3, Technologieentwicklung insbesondere für die Kombination mit einer Wasserstoffbeheizung notwendig Wasserstoffbeheizung: TRL < 4, Labor-, Demonstrations-, und Betriebserfahrung notwendig	elektr. Widerstandsbeheizung: TRL < 4, Entwicklung und Demonstrationsbetrieb in Einsatzumgebung notwendig Wasserstoffbeheizung: TRL < 4, Labor-, Demonstrations-, und Betriebserfahrung notwendig	elektr. Widerstandsbeheizung: TRL < 4, Entwicklung und Demonstrationsbetrieb notwendig Wasserstoffbeheizung: TRL < 4, Labor-, Demonstrations-, und Betriebserfahrung notwendig
Endenergiebedarf	Gesamtenergiebedarf aktuell: Ca. 13.000 GWh/a Erdgas (Prod.-menge ca. 33,5 Mio. t/a)	Gesamtenergiebedarf aktuell: Ca. 2000 GWh/a Erdgas (Prod.-menge ca. 6,9 Mio. t/a)	Gesamtenergiebedarf aktuell: Ca. 3.500 GWh/a Erdgas (Prod.-menge ca. 16,1 Mio. t/a)
Summe für alle Anlagen der betrachteten Anwendung (ohne Berücksichtigung des Energiebedarfs von Vorketten für die Erzeugung)	zukünftig (100 %): hybride Beheizung: Verringerung erwartet (-5%) H_2 : keine erhebliche Veränderung erwartet Potenzial zur Flexibilisierung: Ca. 1 % d. Gesamtenergiebedarfs	zukünftig (100 %): elektrisch: Verringerung erwartet (-15%) H_2 : keine erhebliche Veränderung erwartet Potenzial zur Flexibilisierung: Ca. 1 % d. Gesamtenergiebedarfs	zukünftig (100 %): elektrisch: Verringerung erwartet (-15%) H_2 : keine erhebliche Veränderung erwartet Potenzial zur Flexibilisierung: Ca. 50 % d. Ges.-energiebedarfs
Abwärmeentstehung	Erdgasbeheizung: 15.000 – 77.500 m ³ /h STP; $T \approx 400 - 450 \text{ }^\circ\text{C}$	Erdgasbeheizung: 15.000 - 20.000 m ³ /h STP; $T \approx 400 - 450 \text{ }^\circ\text{C}$	Erdgasbeheizung: 1.000 - 7.000 m ³ /h STP; $T \approx 200 - 300 \text{ }^\circ\text{C}$
Mittelwerte für Einzelanlagen (exemplarisch)	Elektrifizierung: leichte Verringerung erwartet Wasserstoffbeheizung: keine Veränderung erwartet	Elektrifizierung: leichte Verringerung erwartet Wasserstoffbeheizung: keine Veränderung erwartet	Elektrifizierung: leichte Verringerung erwartet Wasserstoffbeheizung: keine Veränderung erwartet

Anmerkungen:

* Auf Basis der Gesamtkapazität und den Technikbeispielen

Wir untersuchen zwei Dimensionen der wirtschaftlichen Bewertung

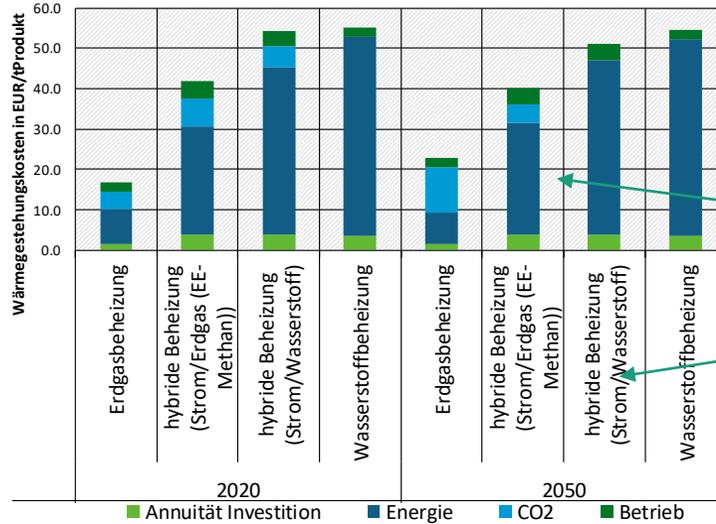


- Modernisierungszyklen
 - Orientieren sich an Abschreibungszeiträumen
 - Vorzeitiger Austausch von Anlagen ist eine Option (und in vielen Fällen notwendig)
- Wärmegestehungskosten
 - Investition, Energie, CO₂, Betrieb und Wartung
 - Differenz zu Referenztechnologie ist maßgeblich

Dimension 1: Wärmegestehungskosten bestimmen die Attraktivität der Techniken

Wärme- und Glühöfen Stahl-Walzwerke

Kontinuierliches Erwärmen Flach-/Langstahl



Eigene Berechnung Fraunhofer ISI

Referenzfall

Transformation

Kostenkomponenten

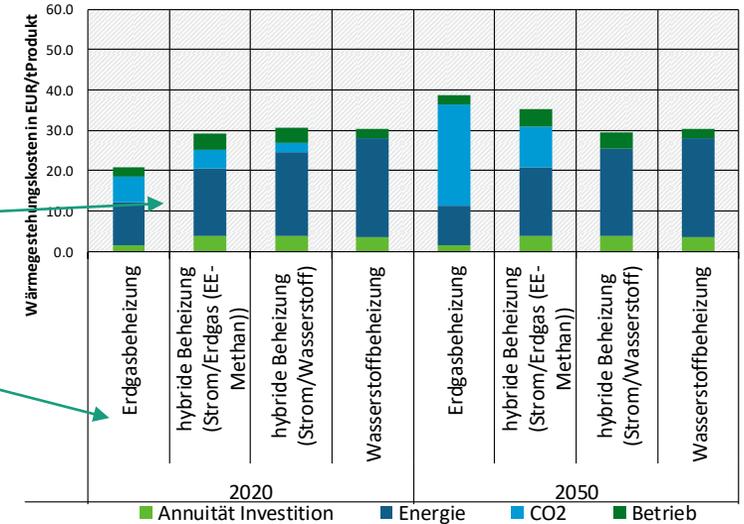
Techniken

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

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

Wärme- und Glühöfen Stahl-Walzwerke

Kontinuierliches Erwärmen Flach-/Langstahl



Eigene Berechnung Fraunhofer ISI

- Konventionelle Technik (Erdgas) ist auch bis 2050 im Referenzfall deutlich günstiger
- CO₂-Preise können Energieträger-Kostendifferenz nicht ausgleichen
- Insbesondere hohe Strompreise sorgen für die Differenz
- Zusätzliche Investitionen für Anlagenumbau sind vorhanden, aber nicht entscheidungsrelevant

- Hybride Beheizung mit Strom+Wasserstoff in 2050 günstiger als fossile Technik
- Dafür sorgen hohe CO₂- und niedrige Strompreise
- Differenz ist relevant, aber nicht extrem (keine Effizienzvorteile)
- Hybrid und vollständige Wasserstoffnutzung gleichauf

Dimension 2: Modernisierungszyklen bestimmen die Austauschrate der Anlagen

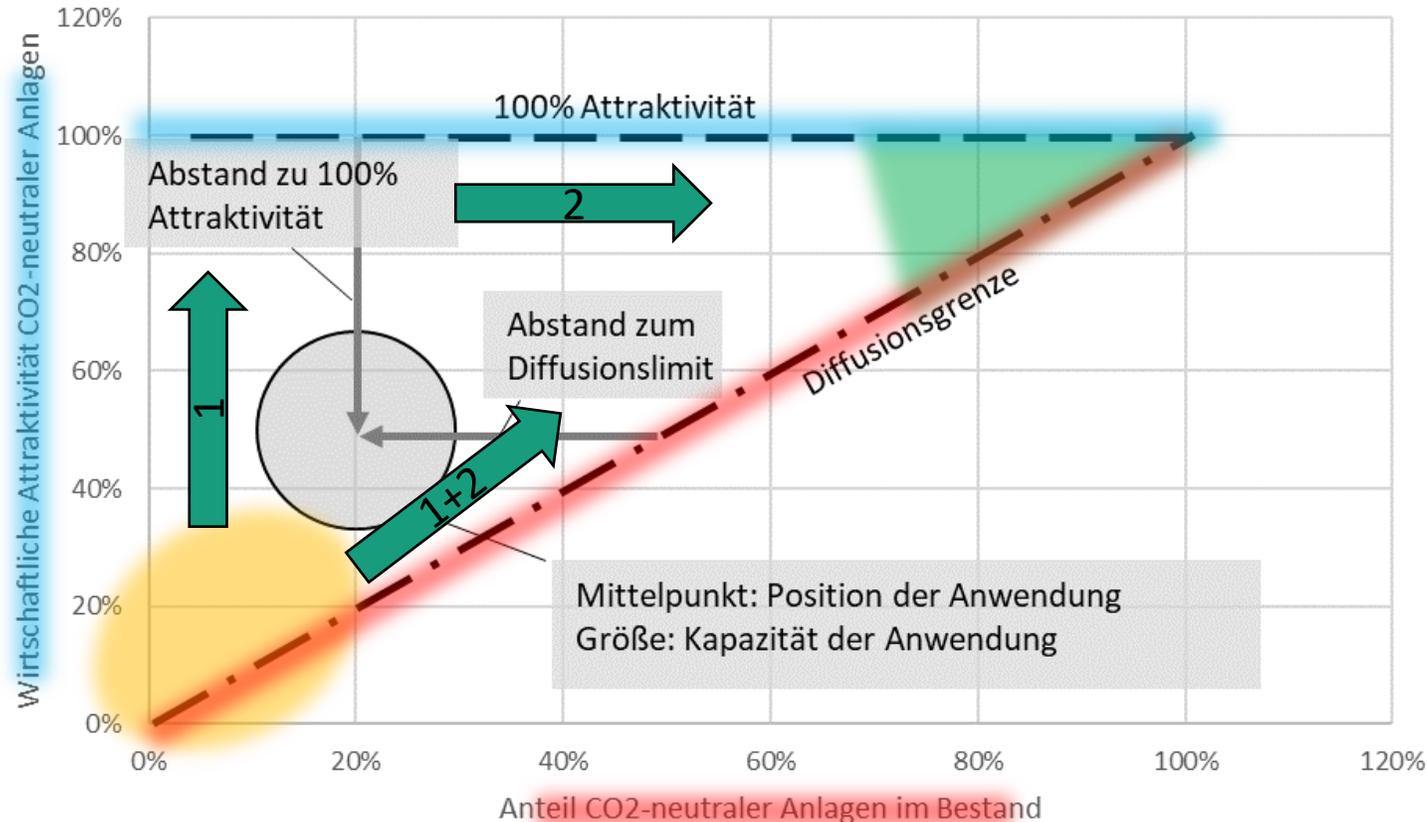
#	Anwendung	Lebensdauer	Lebensende bei Invest 2020	Lebensende bei Invest													
				2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050	2055	2060	2065	2070	2075		
1	Milchpulverherstellung	20	2040														
2	Papier Trocknung	20	2040														
3	Chemiepark-Dampfversorgung	20	2040														
4	Kontinuierliches 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)	13	2033														
24	Kontinuierliches Aufkohlen und Austenitisieren (Betriebshärtereien)	13	2033														
25	Diskontinuierliches Aufkohlen und Austenitisieren	13	2033														
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 2010+ sind gefährdet
- Für ältere Anlagen existiert genau eine Gelegenheit für Reinvestition

- Damit steht diese Anwendung bei Weitem nicht allein.
- Niedrigschwelligem Brennstoffwechsel kommt daher besondere Bedeutung zu.
- Aber: Verfügbarkeit und Attraktivität von z.B. Wasserstoff ist fraglich.

- Daher:
 - Standortspezifisch Verfügbarkeit prüfen.
 - Elektrifizierung ernsthaft berücksichtigen.
 - NICHT in fossil investieren und auf Wasserstoff hoffen.

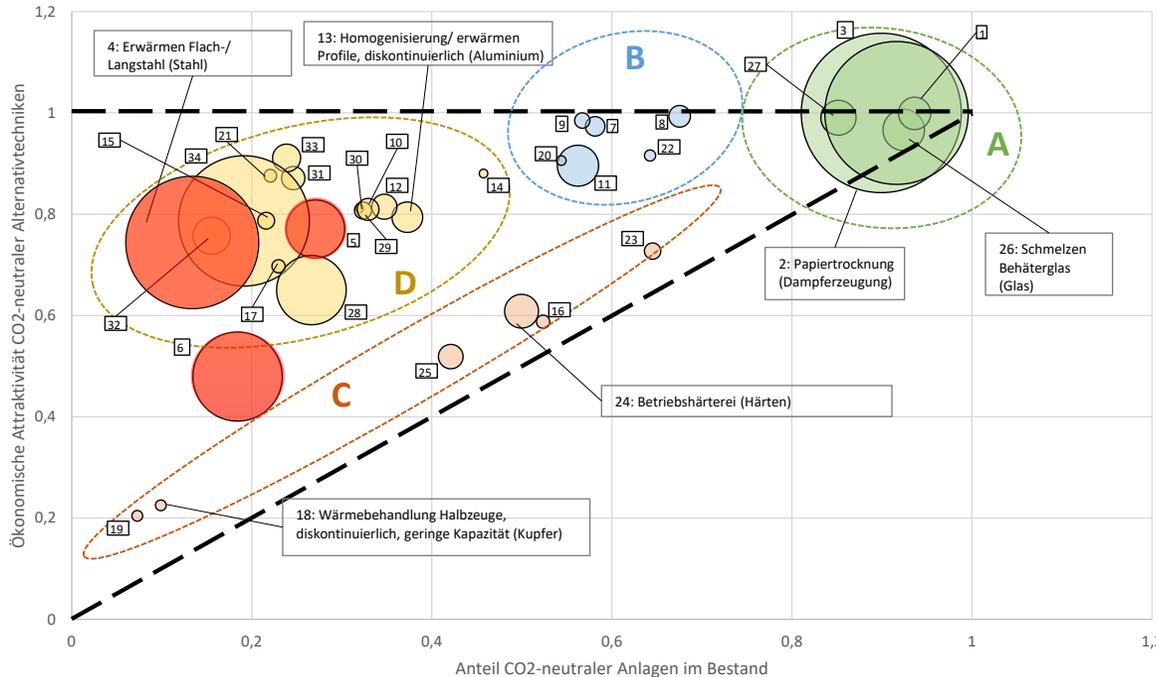
Erläuterung Diffusionsabbildung



■ 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



- 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 Umformtechnik

Kurzbeschreibung der Branche und Fokus der Studie

- Grundsätzlich wird in der Umformtechnik zwischen der *Massivumformung* und der *Blechumformung (Presshärten)* unterschieden.
- Die Schmiedeindustrie besteht größtenteils aus klein- und mittelständigen Unternehmen. Insgesamt beschäftigte sie im Jahr 2019 etwa 105.000 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter in rund 1.700 Betrieben in Deutschland.
- Im Rahmen dieser Studie sind von besonderem Interesse:
 - das Gesenkschmieden,
 - das Freiformschmieden,
 - das Ringwalzen.

Kennzahlen entsprechend Wirtschaftszweig 25.5	
Umsatz	21,192 Mrd. Euro
Beschäftigte	105.045
Unternehmen	1.723
Produktionsmenge gesamt	7,229 Mio. t
Produktionsmenge Blechformteile ^{a)}	5,108 Mio. t
davon pressgehärtete Bauteile	ca. 0,240 Mio. t ^{b)}
Produktionsmenge Gesenkschmiedeteile	1,239 Mio. t
Produktionsmenge Fließpressteile	0,490 Mio. t
Produktionsmenge Freiformschmiedestücke ^{c)}	0,333 Mio. t
Produktionsmenge Pulvermetallurgische Erzeugnisse	0,060 Mio. t

a) Press-, Zieh- und Stanzteilen (Kaltumformung, nicht im Fokus der Betrachtungen im Rahmen dieser Studie)

b) Berechnung Produktionsmenge: 275 kg (Rohbaukarosserie) * 0,75 (Anteil Strukturbauteile) * 0,25 (Anteil Presshärtebauteile) * 4,66 Mio. (Produktion PKW 2019 in DE)

Quelle: (Statistisches Bundesamt (Destatis) 2019a)

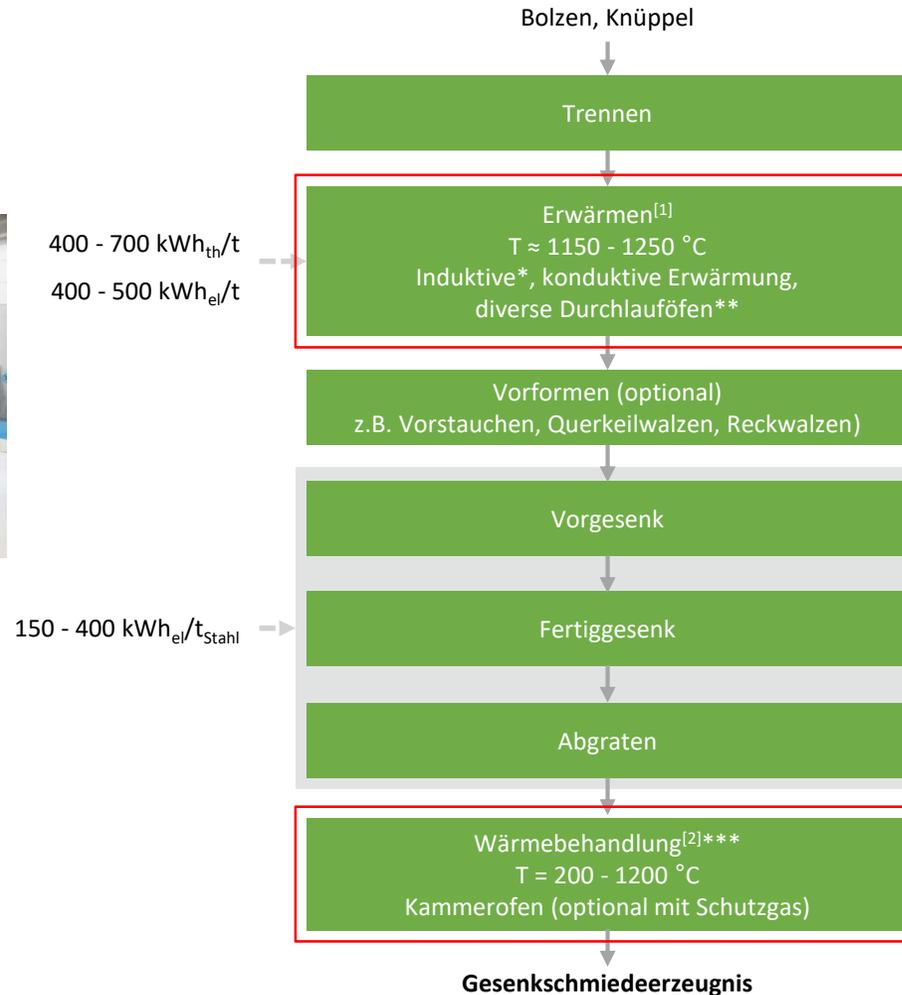
c) inkl. geschmiedeter/gewalzter Ringe (0,139 Mio. t)

Prozessketten und Produkte: Gesensschmieden

Induktive
Schmiedeerwärmungsanlage



Quelle: (SMS Elotherm GmbH 2021)



Legende:

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

th. = thermisch; el. = elektrisch

Anmerkungen:

* Der Prozessschritt Erwärmen wird überwiegend mit induktiven Erwärmungsanlagen durchgeführt (Annahme ca. 80 % - 85 % der Produktionsmenge nach (Herbertz et al. 2012; Pfeifer et al. 2011c))

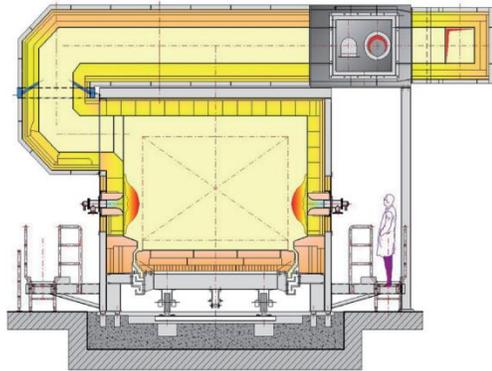
**gasbeheizt

***diverse Zeit-, Temperaturzyklen möglich, die Anlagen der Wärmebehandlung werden in der Branche Härtereitechnik betrachtet

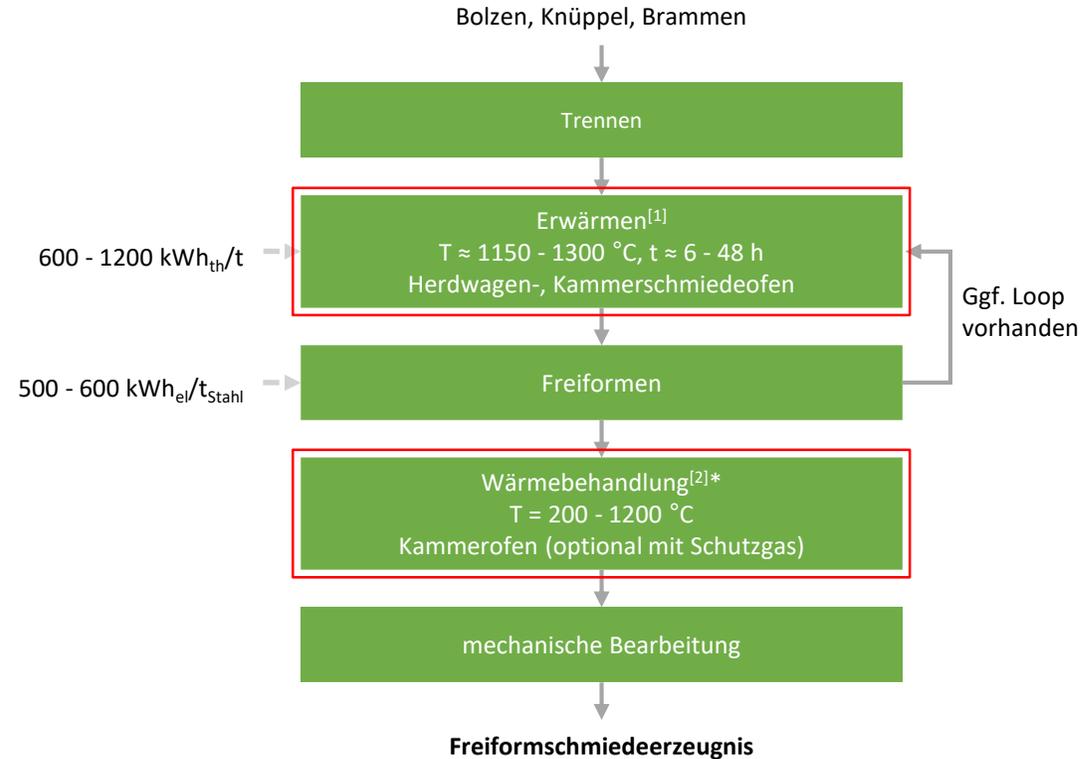
Quellen: [1, 2] (Pfeifer et al. 2011c; VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH 2013; Herbertz et al. 2012; Ade 2017)

Prozessketten und Produkte: Freiformschmieden

Herdwagenschmiedeofen mit
Flachflammenbrennern und
Zentralrekuperator



Quelle: (Tschapowetz 2011)



Legende:

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

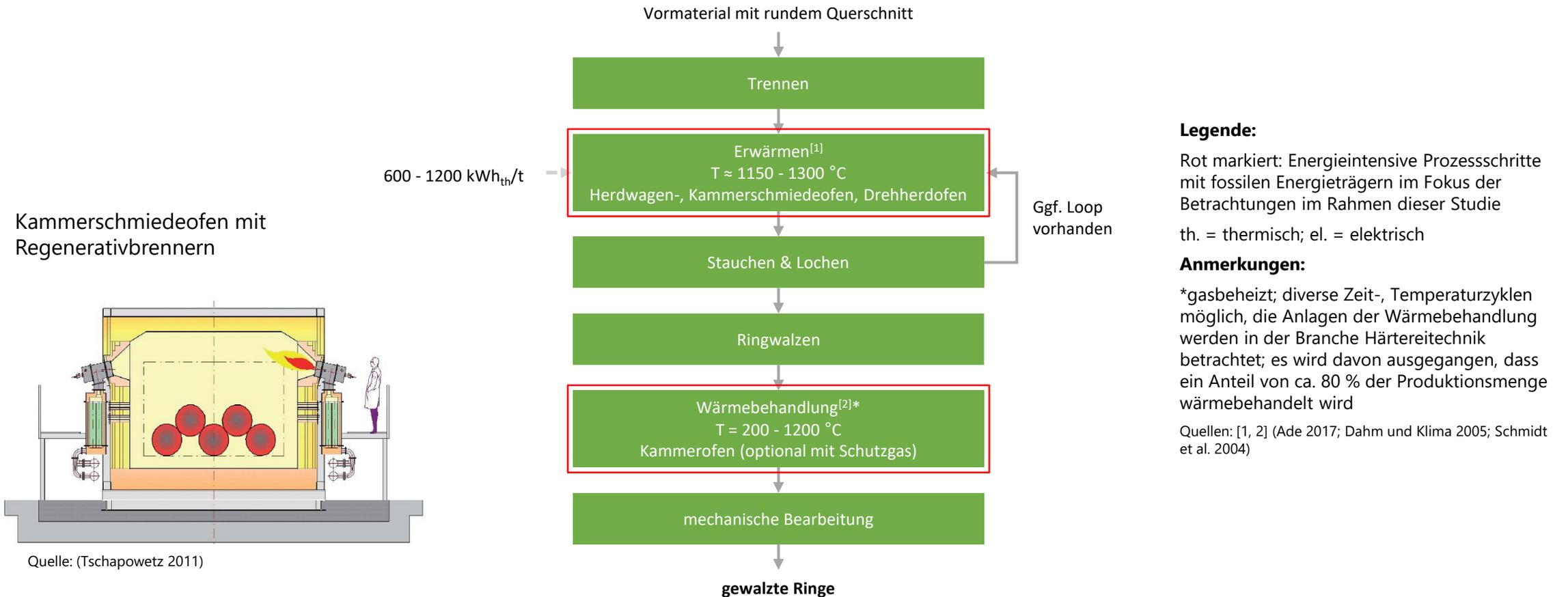
th. = thermisch; el. = elektrisch

Anmerkungen:

*gasbeheizt; diverse Zeit-, Temperaturzyklen möglich, die Anlagen der Wärmebehandlung werden in der Branche Härtereitechnik betrachtet, es wird davon ausgegangen, dass ca. 80 % der Produktionsmenge wärmebehandelt wird

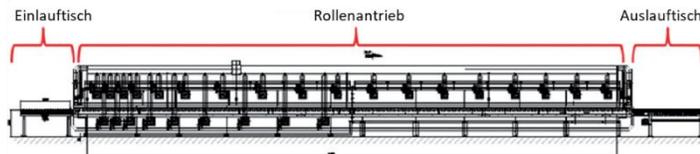
Quellen: [1, 2] (Ade 2017; Borate et al. 2021; Dahm und Klima 2005; Pfeifer et al. 2011c; Schmidt et al. 2004)

Prozessketten und Produkte: Ringwalzen

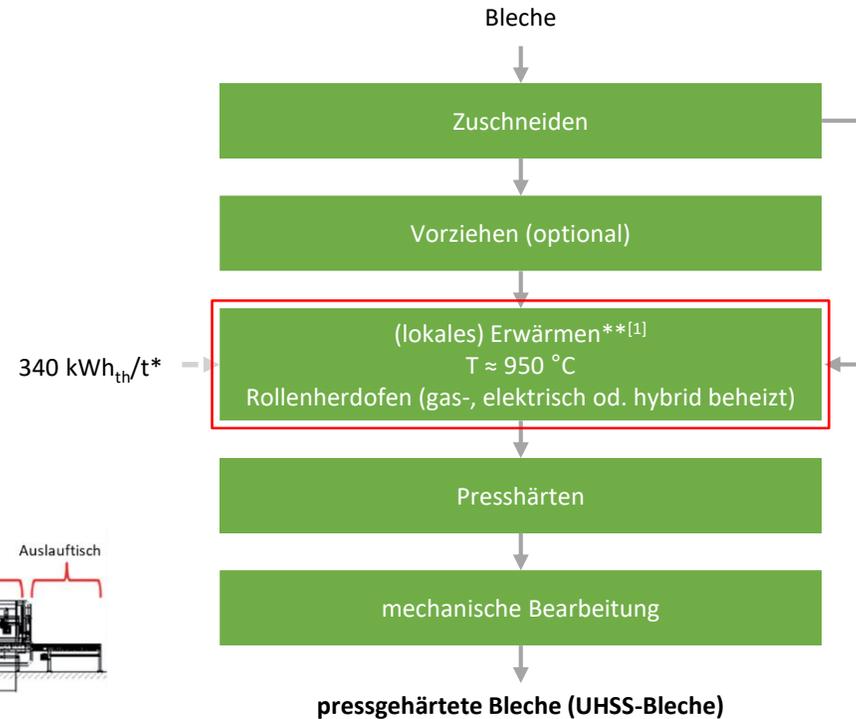


Prozessketten und Produkte: Presshärten

Schematische Darstellung
eines Rollenherdofens



Quelle: (Lehmann 2011) nach Schwartz



Legende:

Rot markiert: Energieintensive Prozessschritte mit fossilen Energieträgern im Fokus der Betrachtungen im Rahmen dieser Studie
th. = thermisch

Anmerkungen:

* Abschätzung: Enthalpie 170 kWh/t, Wirkungsgrad 0,5

** teilweise werden die Blechzuschnitte nur lokal/sektionell erwärmt (auch Tailored Tempering; (schwartz GmbH 2021) www.schwartz-wba.com)

Quellen: [1] (Merklein und Lechler 2006; Merklein et al. 2008; Forschungsvereinigung Stahlanwendung e.V. 2018; Kolleck et al. 2009)

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

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

Anlagentypen	Jährlicher Anlagendurchsatz*		Jährlicher Energieverbrauch		Energiebedingte CO ₂ -Emissionen	
	1,8 Mio. t	Anteil	846 - 1.008 GWh	Anteil	297 - 376 Tsd. t	Anteil
Drehherdofen (fossil) ¹⁾	27 Tsd. t	1 %	13 - 16 GWh	1 - 2 %	3 - 3 Tsd. t	< 1 %
Durchlauf-, Dreherdofen (fossil)²⁾	186 Tsd. t	10 %	74 - 130 GWh	9 - 13 %	15 - 26 Tsd. t	5 - 7 %
Induktive Erwärmungsanlage	1.053 Tsd. t	58 %	421 - 527 GWh	50 - 52 %	211 - 263 Tsd. t	70 - 71 %
Kammerschmiedofen (fossil)	123 Tsd. t	7 %	148 GWh	15 - 17 %	30 Tsd. t	8 - 10 %
Herdwagenschmiedofen (fossil)	183 Tsd. t	10 %	101 - 152 GWh	12 - 15 %	20 - 31 Tsd. t	7 - 8 %
Rollenherdofen Presshärten (fo.)	154 Tsd. t	8 %	62 - 11 GWh	1 - 7 %	11 - 12 Tsd. t	3 - 4 %
Rollenherdofen Presshärten (el.)	38 Tsd. t	2 %	12 - 5 GWh	< 1 %	5 - 6 Tsd. t	2 %
Kettenträgerofen (fossil)	24 Tsd. t	1 %	8 - 10 GWh	< 1 %	2 - 2 Tsd. t	< 1 %
Mehrlagenkammerofen (fossil)	24 Tsd. t	1 %	8 - 10 GWh	< 1 %	2 - 2 Tsd. t	< 1 %
Verteilung						
Anteil Anlagen mit elektrischer Energie beheizt				51 - 53 %	72 - 73 %	
Anteil Anlagen mit fossiler Energie beheizt				47 - 49 %	27 - 28 %	
Davon im Rahmen der Studie betrachteten Anlagentypen (fett)				96 %	96 %	

* 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.

1) Ringwalzen und Freiformschmieden

2) Gesenkschmieden

Betrachtete Anwendungen und Referenztechniken

Referenztechnik	
Definition	kontinuierlicher Erwärmungssofen Schmiedebauteile mit Erdgasbeheizung
Anwendung	kontinuierliche Erwärmung Schmiedebauteile ($T_{\text{Prozess,max}} \approx 1.250^{\circ}\text{C}$)
Thermoprozessanlage(n)	Durchlauf-, Drehherdofen
Beheizungstechnologie(n)	Erdgasbeheizung
Referenztechnik	
Definition	diskontinuierlicher Erwärmungssofen Schmiedebauteile mit Erdgasbeheizung
Anwendung	diskontinuierliche Erwärmung Schmiedebauteile ($T_{\text{Prozess,max}} \approx 1.250^{\circ}\text{C}$)
Thermoprozessanlage(n)	Kammerschmiedeofen, Herdwagenschmiedeofen
Beheizungstechnologie(n)	Erdgasbeheizung
Referenztechnik	
Definition	kontinuierlicher Erwärmungssofen Stahlblechzuschnitte mit Erdgasbeheizung
Anwendung	kontinuierliche Erwärmung Stahlblechzuschnitte ($T_{\text{Prozess,max}} \approx 950^{\circ}\text{C}$)
Thermoprozessanlage(n)	Rollenherdofen
Beheizungstechnologie(n)	Erdgasbeheizung

Definition von Alternativtechniken

<i>Referenztechnik</i>	<i>kontinuierlicher Erwärmungssofen Schmiedebauteile mit Erdgasbeheizung ($T_{\text{Prozess,max}} \approx 1.250^{\circ}\text{C}$)</i>
Alternative Beheizungstechnologie(n)	hybride Beheizung (Strom (Widerstandsbeheizung), Erdgas(EE-Methan)) hybride Beheizung (Strom (Widerstandsbeheizung), H ₂) Wasserstoffbeheizung
Alternativtechnik(en)	konti. Erwärmungssofen Schmiedebauteile mit hybrider Beh. (Strom/Erdgas) konti. Erwärmungssofen Schmiedebauteile mit hybrider Beheizung (Strom/H ₂) konti. Erwärmungssofen Schmiedebauteile mit Wasserstoffbeheizung
Technik und Technologie	
<i>Referenztechnik</i>	<i>diskontinuierlicher Erwärmungssofen Schmiedebauteile mit Erdgasbeheizung ($T_{\text{Prozess,max}} \approx 1.250^{\circ}\text{C}$)</i>
Alternative Beheizungstechnologie(n)	Elektrifizierung (Widerstandsbeheizung) Wasserstoffbeheizung
Alternativtechnik(en)	diskonti. Erwärmungssofen Schmiedebauteile mit elektrischer Beheizung diskonti. Erwärmungssofen Schmiedebauteile mit Wasserstoffbeheizung
Technik und Technologie	
<i>Referenztechnik</i>	<i>kontinuierliche Erwärmungssofen Stahlblechzuschnitte mit Erdgasbeheizung ($T_{\text{Prozess,max}} \approx 950^{\circ}\text{C}$)</i>
Alternative Beheizungstechnologie(n)	Elektrifizierung Wasserstoffbeheizung
Alternativtechnik(en)	konti. Erwärmungssofen Stahlblechzuschnitte mit elektrischer Beheizung konti. Erwärmungssofen Stahlblechzuschnitte mit Wasserstoffbeheizung

Erhebung von Kenndaten: Anwendung „Kontinuierliche Erwärmung Schmiedebauteile“

Technik	Referenztechnik	Alternativtechnik 1	Alternativtechnik 2	Alternativtechnik 3	Einheit	Quellen
Beheizungstechnologie	Erdgasbeheizung	hybride Beheizung (Strom/Erdgas (EE-Methan))	hybride Beheizung (Strom/Wasserstoff)	Wasserstoffbeheizung		
Thermoprozessanlagen*	Durchlauf-, Drehherdofen	Durchlauf-, Drehherdofen	Durchlauf-, Drehherdofen	Durchlauf-, Drehherdofen		
Produkt	Gesensschmiedeteile	Gesensschmiedeteile	Gesensschmiedeteile	Gesensschmiedeteile		
Investition Neubau	41	45	46	43	EUR/t _{kap.}	[1]
Investition Modernisierung	14	16	16	15	EUR/t _{kap.}	[1]
Minimale Investition Neubau	41	45	46	43	EUR/t _{kap.}	
Min. Investition Modernisierung	14	16	16	15	EUR/t _{kap.}	
TRL	9	9	< 5	< 5	-	
Energieträger 1	Erdgas	Strom	Strom	EE-Wasserstoff	-	
Energieträger 2	keiner	Erdgas	EE-Wasserstoff	keiner	-	
Energieträger 3	keiner	keiner	keiner	keiner	-	
Spezifischer Energiebedarf 1	0,486	0,251	0,251	0,486	MWh/t _{Pr.}	[1]
Spezifischer Energiebedarf 2	0,000	0,167	0,167	0,000	MWh/t _{Pr.}	[1]
Spezifischer Energiebedarf 3	0,000	0,000	0,000	0,000	MWh/t _{Pr.}	
Min. spezifischer Energiebedarf	0,486	0,418	0,418	0,486	MWh/t _{Pr.}	
Prozessbedingte Emissionen	0,000	0,000	0,000	0,000	t _{CO2} /t _{Pr.}	
Betriebs- und Wartungskosten	4,1	4,5	4,1	4,5	EUR/t _{kap.}	[1]
Abschreibungszeitraum	10	10	10	10	a	
Lebensdauer	30	30	30	30	a	
Repräsentative Kapazität	57.600	57.600	57.600	57.600	t _{Jahresleistung}	[1]
Auslastung	0,80	0,80	0,80	0,80	1,00	
Anteil Bestand 2020	100 %	0 %	0 %	0 %	%	
Verfügbar ab	2020	2020	2030	2030		
Verfügbar bis	2050	2050	2050	2050		

Annahmen, Legende und Quellen siehe Bericht

Erhebung von Kenndaten: Anwendung „Diskontinuierliche Erwärmung Schmiedebauteile“

Technik	Referenztechnik	Alternativtechnik 1	Alternativtechnik 2	Einheit	Quellen
Beheizungstechnologie	Erdgasbeheizung	Elektrifizierung	Wasserstoffbeheizung		
Thermoprozessanlagen	Kammer-/Herdwagenschmiedeofen	Kammer-/Herdwagenschmiedeofen	Kammer-/Herdwagenschmiedeofen		
Produkt	Freiformschmiedeteile/Ringe	Freiformschmiedeteile/Ringe	Freiformschmiedeteile/Ringe		
Investition Neubau	86	77	90	EUR/t _{kap.}	[1]
Investition Modernisierung	26	23	27	EUR/t _{kap.}	[1]
Minimale Investition Neubau	86	77	90	EUR/t _{kap.}	
Min. Investition Modernisierung	26	23	27	EUR/t _{kap.}	
TRL	9	< 3	< 5	-	
Energieträger 1	Erdgas	Strom	EE-Wasserstoff	-	
Energieträger 2	keiner	keiner	keiner	-	
Energieträger 3	keiner	keiner	keiner	-	
Spezifischer Energiebedarf 1	0,694	0,598	0,694	MWh/t _{Pr.}	[1, 2]
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	0,556	0,478	0,556	MWh/t _{Pr.}	[2]
Prozessbedingte Emissionen	0,000	0,000	0,000	t _{CO2} /t _{Pr.}	
Betriebs- und Wartungskosten	0,9	0,8	0,9	EUR/t _{kap.}	[1]
Abschreibungszeitraum	10	10	10	a	
Lebensdauer	30	30	30	a	
Repräsentative Kapazität	14.600	14.600	14.600	t _{Jahresleistung}	[1, 2]
Auslastung	0,80	0,80	0,80	1,00	
Anteil Bestand 2020	100%	0%	0%	%	
Verfügbar ab	2020	2040	2030		
Verfügbar bis	2050	2050	2050		

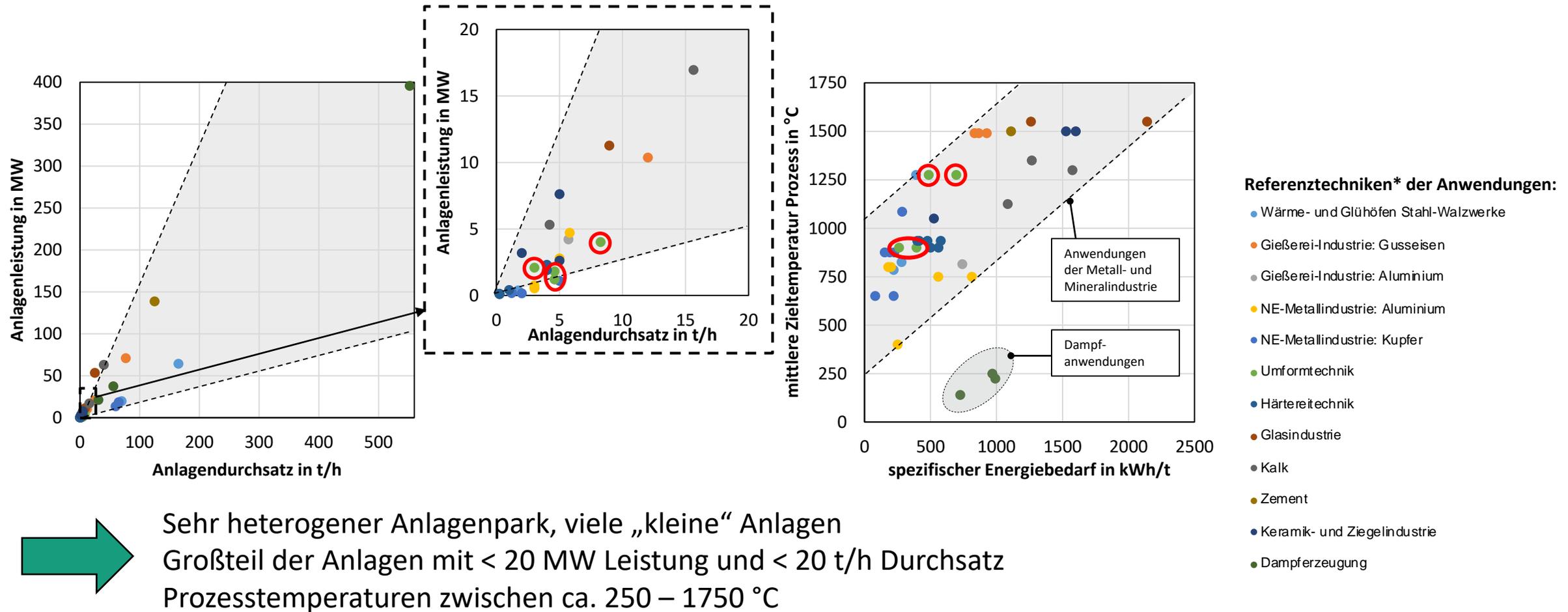
Annahmen, Legende und Quellen siehe Bericht

Erhebung von Kenndaten: Anwendung „Erwärmung Stahlblechzuschnitte (Presshärten)“

Technik	Referenztechnik	Alternativtechnik 1	Alternativtechnik 2	Einheit	Quellen
Beheizungstechnologie	Erdgasbeheizung	Elektrifizierung (Widerstandsbeheizung)	Wasserstoffbeheizung		
Thermoprozessanlagen	Rollenherdofen	Rollenherdofen	Rollenherdofen		
Produkt	Bleche	Bleche	Bleche		
Investition Neubau	54	54	54	EUR/t _{Kap.}	[1]
Investition Modernisierung	5	5	5	EUR/t _{Kap.}	[2]
Minimale Investition Neubau	54	54	54	EUR/t _{Kap.}	
Min. Investition Modernisierung	5	5	5	EUR/t _{Kap.}	
TRL	9	9	< 5	-	
Energieträger 1	Erdgas	Strom	EE-Wasserstoff	-	
Energieträger 2	keiner	keiner	keiner	-	
Energieträger 3	keiner	keiner	keiner	-	
Spezifischer Energiebedarf 1	0,379	0,261	0,379	MWh/t _{Pr.}	[1]
Spezifischer Energiebedarf 2	0,014	0,000	0,000	MWh/t _{Pr.}	[1]
Spezifischer Energiebedarf 3	0,000	0,000	0,000	MWh/t _{Pr.}	
Min. spezifischer Energiebedarf	0,393	0,261	0,393	MWh/t _{Pr.}	
Prozessbedingte Emissionen	0,000	0,000	0,000	t _{CO2} /t _{Pr.}	
Betriebs- und Wartungskosten	5,4	5,4	5,4	EUR/t _{Kap.}	[2]
Abschreibungszeitraum	10	10	10	a	
Lebensdauer	30	30	30	a	
Repräsentative Kapazität	39.100	39.100	39.100	t _{Jahresleistung}	[1, 2]
Auslastung	0,80	0,80	0,80	1,00	
Anteil Bestand 2020	80 %	20 %	0 %	%	[3, 4]
Verfügbar ab	2020	2020	2030		
Verfügbar bis	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.

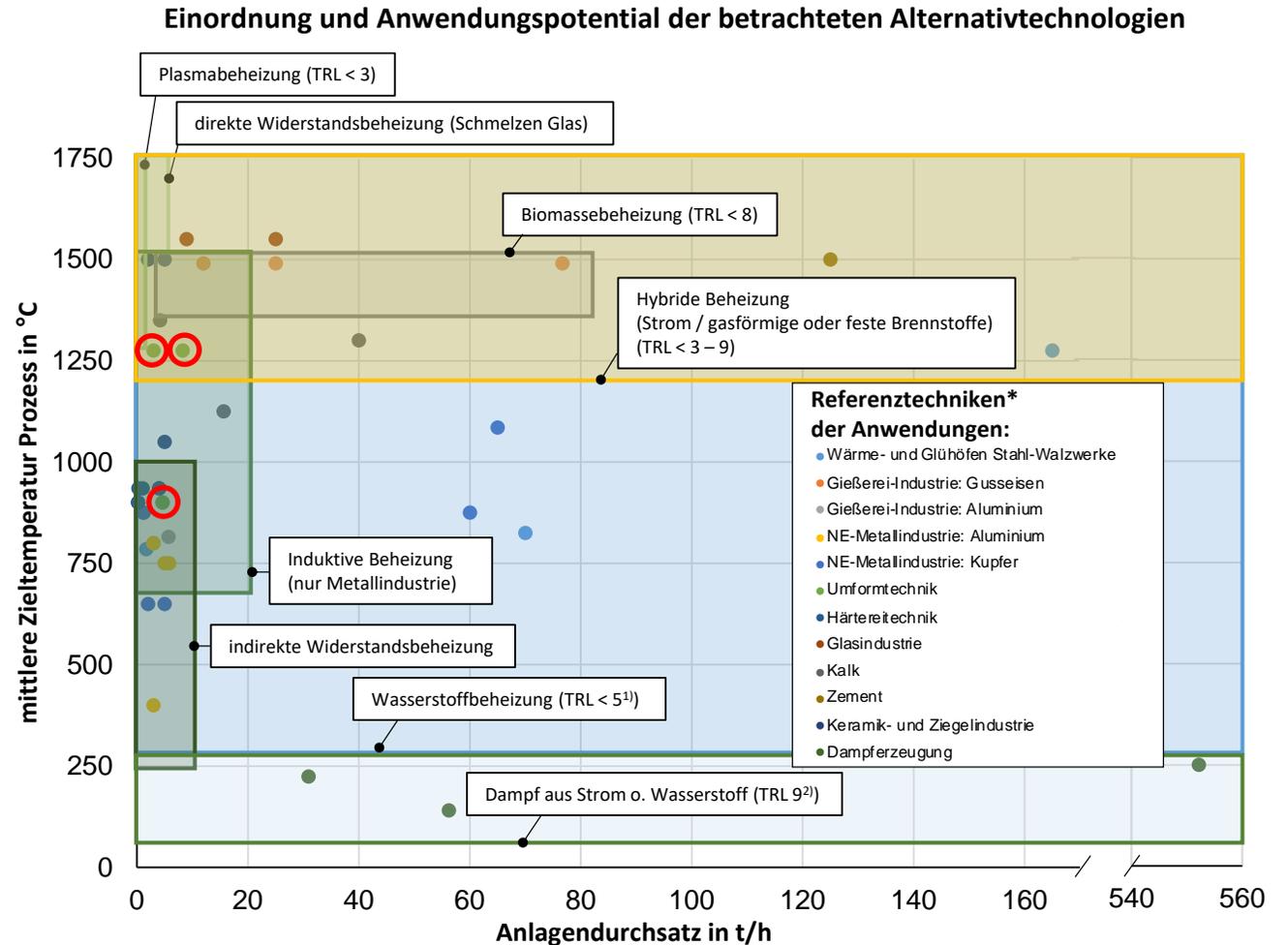
„n.b.“: Anwendung wurde nicht betrachtet. Das TRL der Technologiekombination wird gleich oder geringer als das der Technologie mit jeweils geringeren TRL eingeschätzt.

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	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	< 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.



Zusammenfassung und Zwischenergebnis

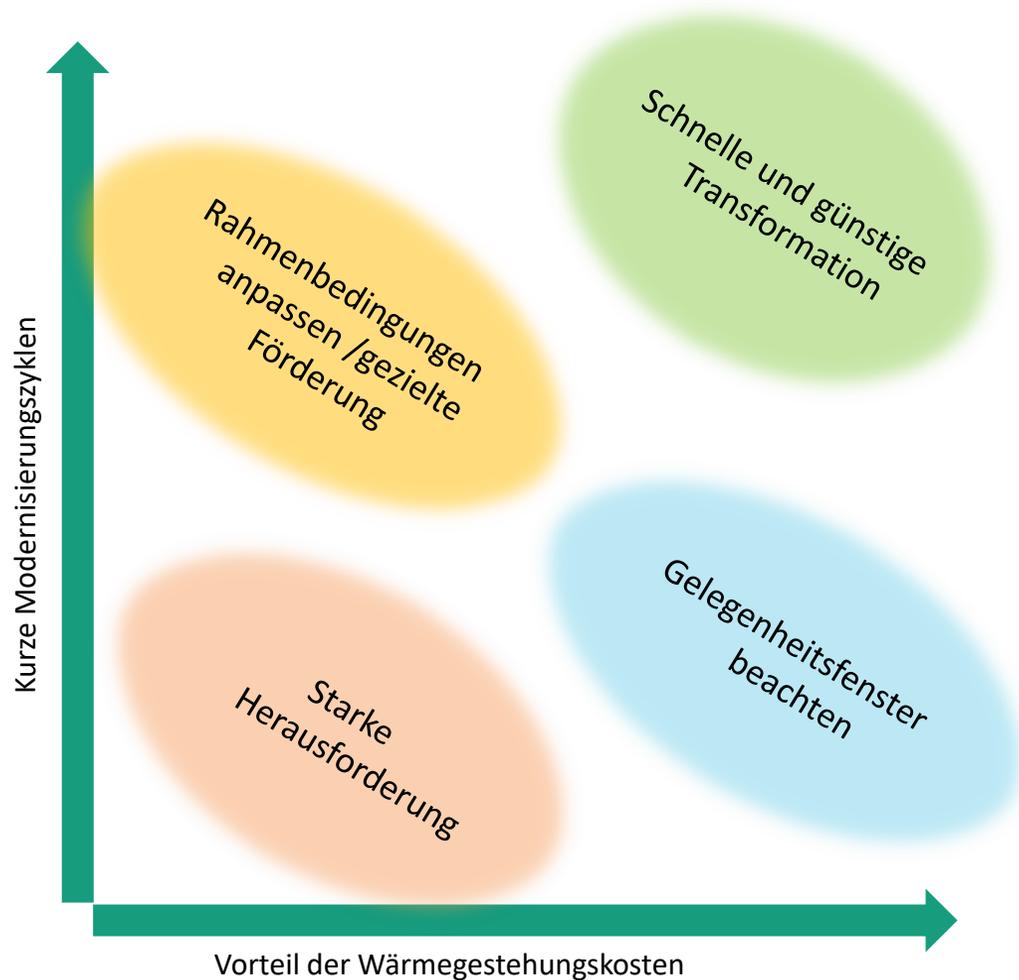
	Betrachtete Anwendungen und Thermoprozessanlagen		
	Kontinuierliches Erwärmen Schmieden ($T_{\text{Prozess,max.}} \approx 1300 \text{ °C}$) Durchlauf-, Drehherdofen	Diskontinuierliches Erwärmen Schmieden ($T_{\text{Prozess,max.}} \approx 1300 \text{ °C}$) Herdwagen-, Kammerschmiedeofen	Kontinuierliches Erwärmen Presshärten ($T_{\text{Prozess,max.}} \approx 950 \text{ °C}$) Rollenherdofen
Technisches Gesamtpotenzial für die betrachteten Anwendungen im Anlagenpark in Deutschland	Stand der Technik: ¹⁾ < 5 Großanlagen*; Durchsatz: 4 – 12 t/h Erdgasbeheizung 100 % Alternativtechnologien: Hybride Beheizung (Strom/Erdgas oder Strom/Wasserstoff), Wasserstoffbeheizung	Stand der Technik: ca. 26 Großanlagen; Durchsatz: 1 – 5 t/h Erdgasbeheizung 100 % Alternativtechnologien: Elektrifizierung, Wasserstoffbeheizung	Stand der Technik: ca. 8 Großanlagen; Durchsatz: 4 – 5 t/h Erdgasbeheizung (ca. 80 %, Rest elektrisch beheizt) Alternativtechnologien: Elektrifizierung, Wasserstoffbeheizung
F&E-Bedarf	Hybride Beheizung: (Widerstandsbeh./Erdgasbeh.) TRL = 9 (Stand der Technik) Hybride Beheizung: (Widerstandsbeh./H ₂ -Beh.) TRL < 5, Umsetzung auf Industriemaßstab steht aus, Demonstrations-, und Betriebserfahrung notwendig Wasserstoffbeheizung: TRL < 5, Umsetzung auf Industriemaßstab steht aus, Demonstrations-, und Betriebserfahrung notwendig ²⁾	Elektrifizierung: TRL < 3, Nachweis der Funktionstüchtigkeit nur bedingt gegeben (Einsatztemperatur begrenzt), Technologieentwicklung notwendig Wasserstoffbeheizung: TRL < 5, Umsetzung auf Industriemaßstab steht aus, Demonstrations-, und Betriebserfahrung notwendig ²⁾	Elektrifizierung: TRL = 9 (Stand der Technik) ökonomische Restriktionen vorhanden Wasserstoffbeheizung: TRL < 5, Umsetzung auf Industriemaßstab steht aus, Demonstrations-, und Betriebserfahrung notwendig
Endenergiebedarf Summe für alle Anlagen der betrachteten Anwendung (ohne Berücksichtigung des Energiebedarfs von Vorketten für die Erzeugung)	Gesamtenergiebedarf aktuell: ca. 90 GWh/a Erdgas; ca. 185 Tsd. t/a zukünftig (100%): Hybride Beheizung: ca. 80 GWh/a (Verringerung um ca. 15 %) H ₂ : unverändert Potenzial zur Flexibilisierung: gering	Gesamtenergiebedarf aktuell: ca. 210 GWh/a Erdgas; ca. 300 Tsd. t/a zukünftig (100%): Elektrisch: ca. 180 GWh/a (Verringerung um ca. 15 %) H ₂ : unverändert Potenzial zur Flexibilisierung: gering	Gesamtenergiebedarf aktuell: ca. 70 GWh/a Erdgas; ca. 250 Tsd. t/a zukünftig (100%): Elektrisch: ca. 65 GWh/a (Verringerung um ca. 30 %) H ₂ : unverändert Potenzial zur Flexibilisierung: vorhanden, sofern redundante Anlagen vorgehalten werden
Abwärmeentstehung Mittelwerte für Einzelanlagen (exemplarisch)	Erdgasbeheizung: Abgas: 10,6 m ³ Abgas/m ³ Erdgas; T = 400 - 450 °C Elektrifizierung: leichte Verringerung erwartet Wasserstoffbeheizung: keine Veränderung erwartet	Erdgasbeheizung: Abgas: 10,6 - 11,5 m ³ Abgas/m ³ Erdgas; T = 400 - 450 °C Elektrifizierung: leichte Verringerung erwartet Wasserstoffbeheizung: keine Veränderung erwartet	Erdgasbeheizung: Abgas: 10,6 - 11,5 m ³ Abgas/m ³ Erdgas; T = < 500 °C Elektrifizierung: leichte Verringerung erwartet Wasserstoffbeheizung: keine Veränderung erwartet

Anmerkungen:

1) Ein Großteil des der Gesenkgeschmiedeten Teil wird induktiv erwärmt. Die Studie fokussiert sich auf den fossil beheizten Anteil, welcher nicht induktiv beheizt werden kann.

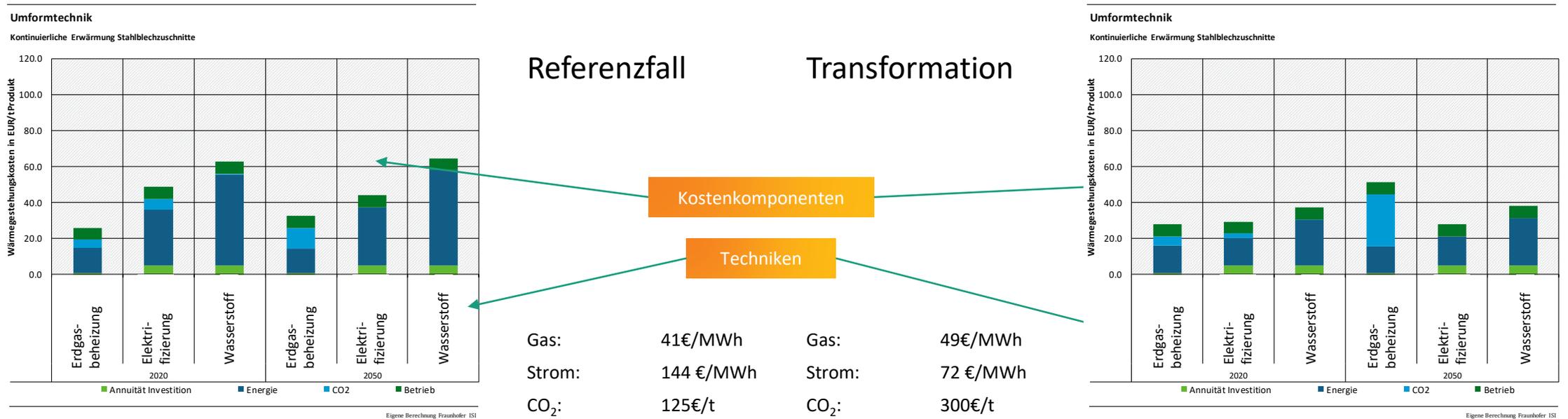
2) Bei einem Austausch der Gasart sind insbesondere die prozess- und werkstofftechnische Aspekte wie Zunderbildung, der Einfluss der Gasatmosphäre auf das Produkt, evtl. geringere Leistung und ein erhöhter Wasseranteil im Abgas sowie deren Auswirkung auf Prozess und Produktqualität zu überprüfen.

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



- Konventionelle Technik (Erdgas) ist auch bis 2050 im Referenzfall deutlich günstiger
- CO₂-Preise können Energieträger-Kostendifferenz nicht ausgleichen
- Insbesondere hohe Strompreise sorgen für die Differenz
- Zusätzliche Investitionen für Anlagenumbau sind vorhanden, aber nicht entscheidungsrelevant

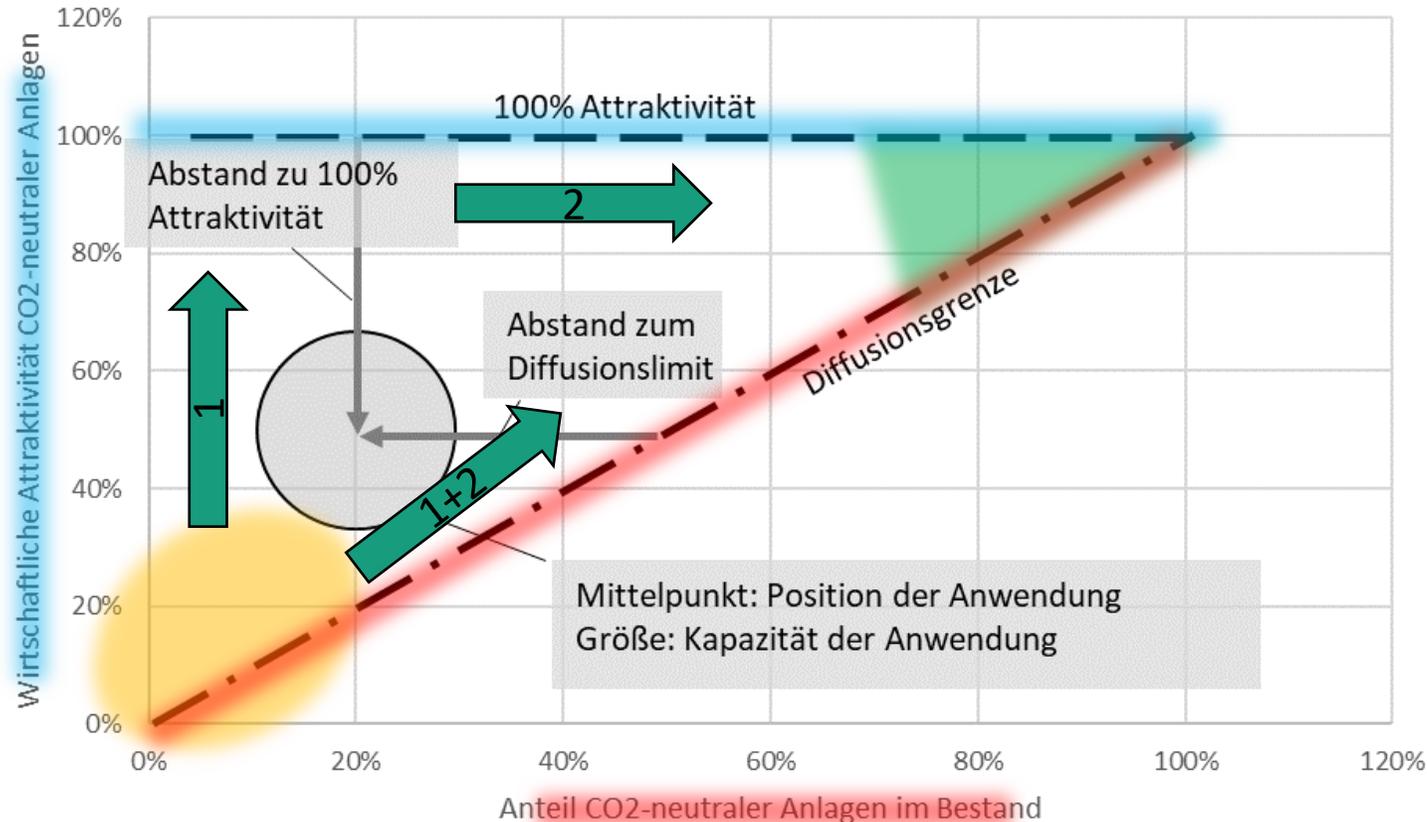
- Elektrifizierung und Wasserstoff in 2050 günstiger als fossile Technik
- Dafür sorgen hohe CO₂- und niedrige Strompreise
- Und starke Effizienzvorteile (~33% geringerer Energiebedarf Elektrifizierung)

Dimension 2: Modernisierungszyklen bestimmen die Austauschrate der Anlagen

#	Anwendung	Lebensdauer	Lebensende bei Invest 2020	Lebensende bei Invest													
				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)	13	2033														
24	Kontinuierliches Aufkohlen und Austenitisieren (Betriebshärtereien)	13	2033														
25	Diskontinuierliches Aufkohlen und Austenitisieren	13	2033														
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 steht diese Anwendung bei Weitem nicht allein.
- Niedrigschwelligem Brennstoffwechsel kommt daher besondere Bedeutung zu.
- Aber: Verfügbarkeit und Attraktivität von z.B. Wasserstoff ist fraglich.
- Daher:
 - Standortspezifisch Verfügbarkeit prüfen.
 - Elektrifizierung ernsthaft berücksichtigen.
 - NICHT in fossil investieren und auf Wasserstoff hoffen.

Erläuterung Diffusionsabbildung



■ Kernbotschaften

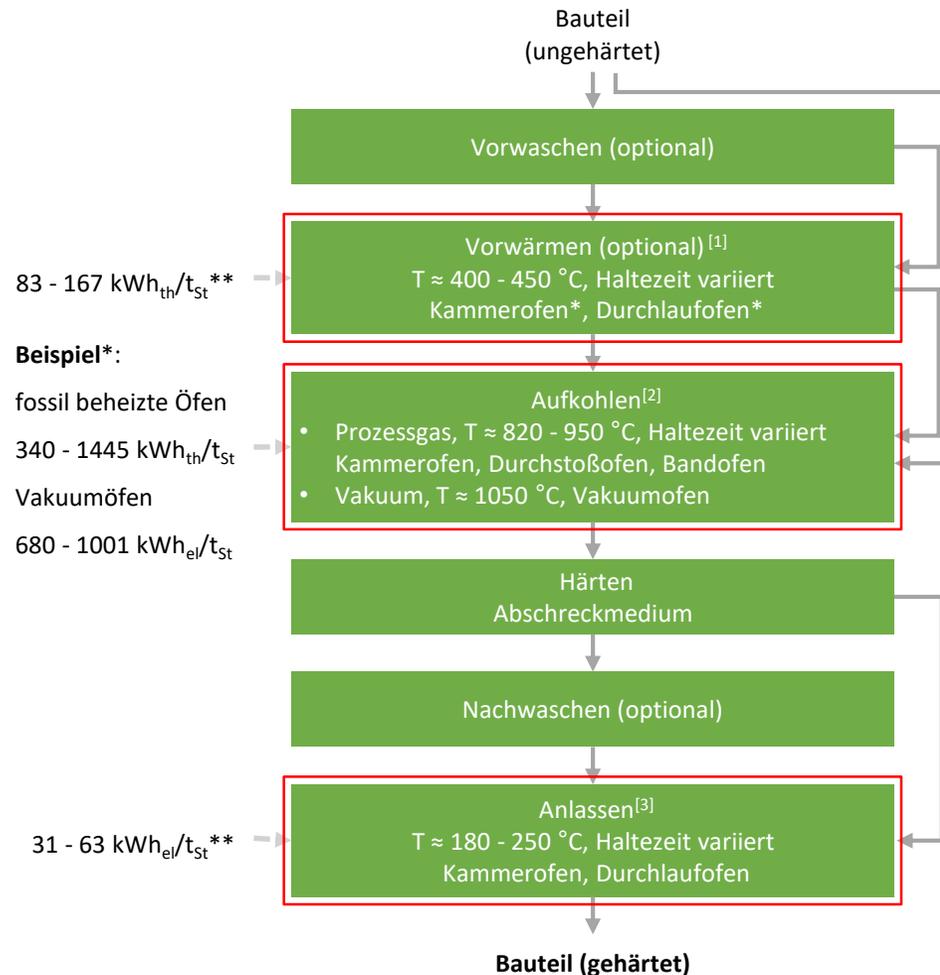
- Es ist eine Vereinfachung!
- Wir zeigen **Attraktivität** und **Diffusion** als unterschiedliche **Dimensionen**.
- Langfristig begrenzt die Attraktivität die Diffusion.
- Unten links ist schlecht, **oben rechts ist gut** 😊

Ergebnisse Teil III: Branche Härtereitechnik

Kurzbeschreibung der Branche und Fokus der Studie

- Die Branche der Härtereitechnik kann dabei grob in zwei Teilbereiche eingeteilt werden:
 - Große Unternehmen, beispielsweise aus der Automobilbranche, besitzen in der Regel eigene Härtereien, die „in-house“ produzieren.
 - Daneben existieren sog. Lohnhärtereien. Diese sind als „Spezialbetriebe auf den Gebieten der Wärmebehandlung und Werkstofftechnik“ tätig.
- Der Fokus der Betrachtungen im Rahmen dieser Studie liegt dabei auf den Lohnhärtereien. Hierbei sind 106 der ca. 185 Lohnhärtebetriebe in Deutschland im Industrieverband Härtetechnik e.V. (IHT) organisiert (Stand: 2019).
- Lohnhärtereien sind „typische Vertreter des industriellen Mittelstands und häufig inhabergeführt“.
- Die durchschnittliche Beschäftigtenzahl wird mit ca. 35 Personen angegeben. In der gesamten deutschen Lohnhärtebranche sind ca. 6.700 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter beschäftigt. Diese erwirtschafteten 2018 einen Umsatz von ca. 1,35 Mrd. €
- Die Lohnhärtereien gehören zum Wirtschaftszweig „Oberflächenveredelung und Wärmebehandlung“ (WZ 2008 Code 2561) und damit zu den stromkostenintensiven Unternehmen.
- zwischen den folgenden Verfahren unterschieden werden:
 - Thermische Verfahren (Glühen, Anlassen, Härten),
 - Thermochemische Verfahren (Einsatzhärten, Nitrieren),
 - Thermomechanische Verfahren.

Prozessketten und Produkte: Einsatzhärten



Legende:

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

th. = thermisch; el. = elektrisch

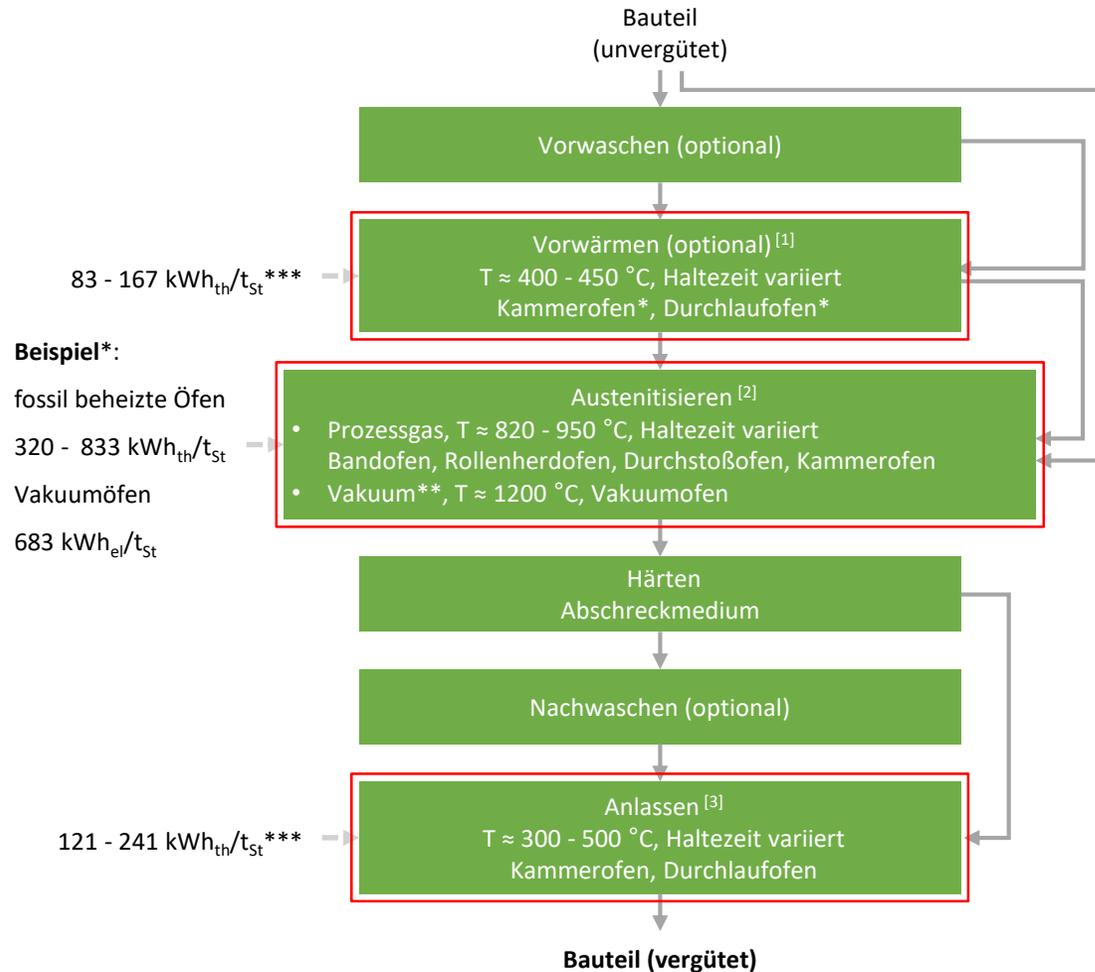
Anmerkungen:

* Exemplarische Werte für einzelne Anlagen mit spezifischen Betriebsparametern (z. B. die Haltezeit) zur Verdeutlichung der Heterogenität des Anlagenparks. Die Werte besitzen keine Allgemeingültigkeit und variieren je nach Werkstoff und Anforderungen. Neben fossil beheizten Anlagen wie Kammerofen, Durchstoßofen, Bandöfen sind nach dem Stand der Technik vielfach auch elektrisch beheizte Anlagen verfügbar.

** Annahme: Theoretischer Wert berechnet aus der Werkstoffenthalpie und einem Anlagenwirkungsgrad von 40 % bis 80 % ohne Berücksichtigung einer Haltephase. Der Energiebedarf im Realbetrieb kann deutlich von diesen Werten abweichen.

Quellen: [1-3]: Prozesskette nach DIN EN ISO 683-3, Anlagenkenndaten nach (Edenhofer et al. 2015)

Prozessketten und Produkte: Vergüten



Legende:

Rot markiert: Energieintensive Prozessschritte mit fossilen Energieträgern im Fokus der Betrachtungen im Rahmen dieser Studie
th. = thermisch; el. = elektrisch

Anmerkungen:

* Exemplarische Werte für einzelne Anlagen mit spezifischen Betriebsparametern (z. B. die Haltezeit) zur Verdeutlichung der Heterogenität des Anlagenparks. Die Werte besitzen keine Allgemeingültigkeit und variieren je nach Werkstoff und Anforderungen. Neben fossil beheizten Anlagen sind nach dem Stand der Technik vielfach auch elektrisch beheizte Anlagen verfügbar

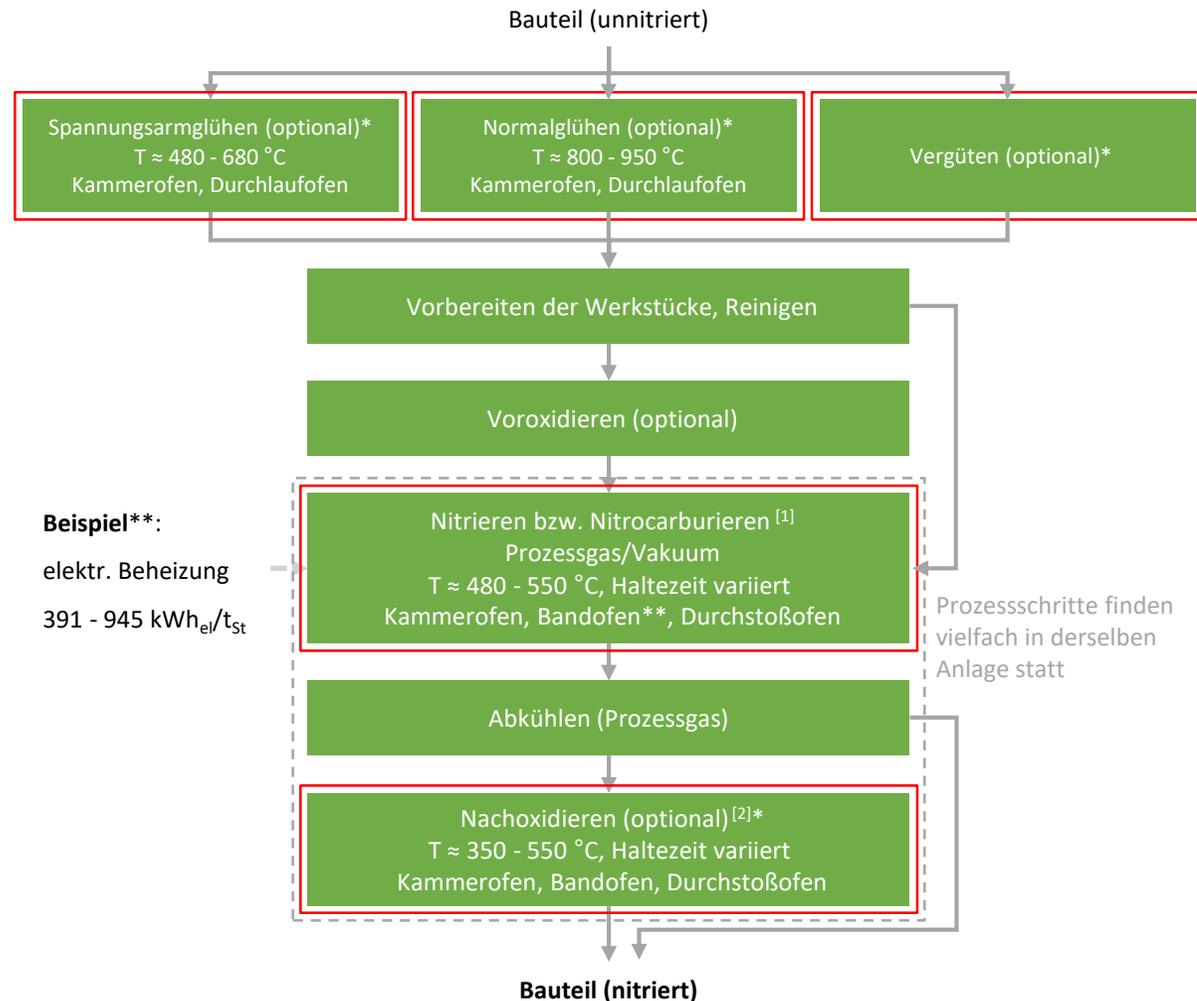
** Vakuumöfen elektrisch beheizt, Anteil dieses Anlagentyps an der jährlichen Produktionsmenge < 1 %

*** Annahme: Theoretischer Wert berechnet aus der Werkstoffenthalpie und einem Anlagenwirkungsgrad von 40 % bis 80 % ohne Berücksichtigung einer Haltephase. Der Energiebedarf im Realbetrieb kann deutlich von diesen Werten abweichen.

Quellen:

[1-3]: Prozesskette nach (DIN EN ISO 683-1:2018-09) und -2, Anlagenkenndaten nach (Expert:inneninterview 2020u)

Prozessketten und Produkte: Nitrieren und Nitrocarburieren



Legende:

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

th. = thermisch; el. = elektrisch

Anmerkungen:

* Kein wesentlicher Teil der Prozesskette nach DIN 17022-4

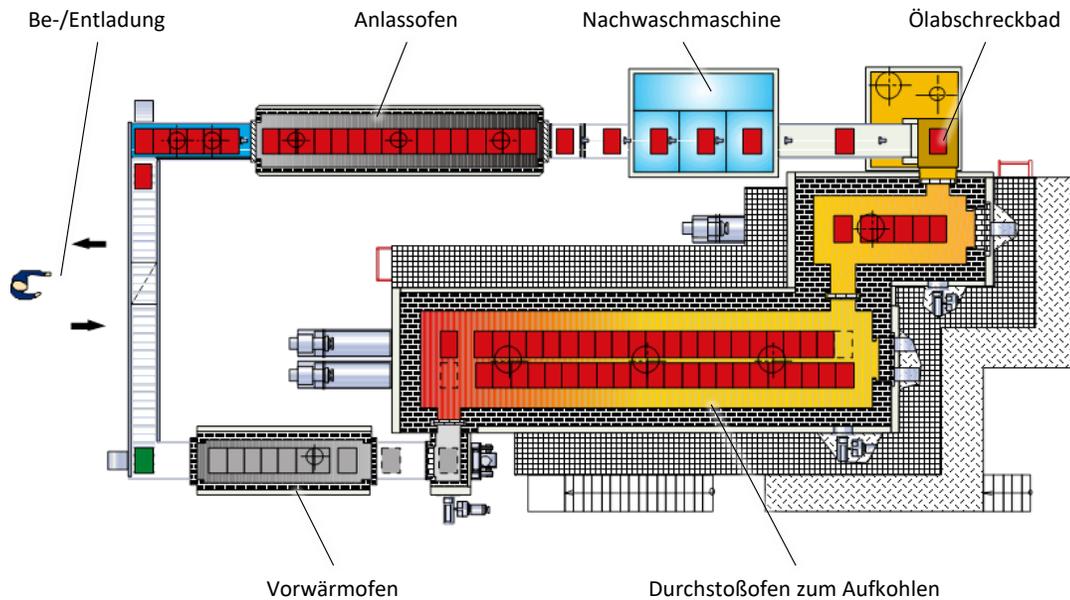
** Exemplarische Werte für einzelne Anlagen mit spezifischen Betriebsparametern (hier z. B. mit einer Haltezeit von ca. 10 bis 60 h) zur Verdeutlichung der Heterogenität des Anlagenparks. Die Werte besitzen keine Allgemeingültigkeit und variieren je nach Werkstoff und Anforderungen. Neben elektrisch beheizten Anlagen sind nach dem Stand der Technik vielfach auch fossil beheizte Anlagen verfügbar

Quellen:

[1, 2]: Eigene Darstellung nach (DIN 17022-4:1998-01) und (Expert:inneninterview 2020u)

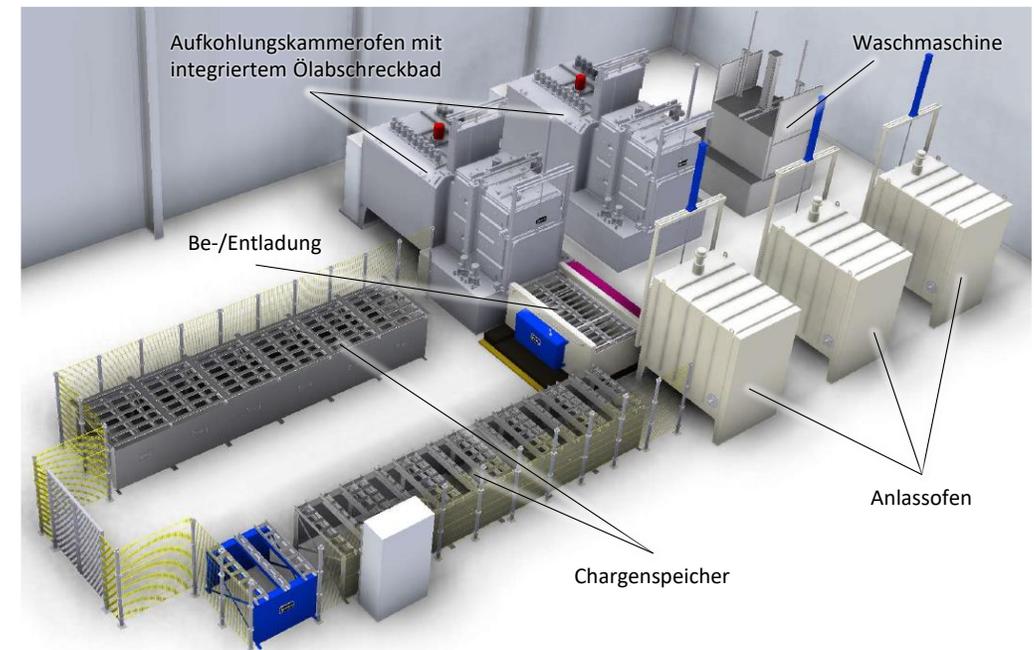
Thermoprozessanlagen (exemplarisch, nicht maßstabsgetreu)

Darstellung einer Anlage zum Einsatzhärten mit Durchstoßofen zum Aufkohlen



Quelle: (Ipsen International GmbH 2022a)

Darstellung einer Anlage zum Einsatzhärten mit Kammeröfen zum Aufkohlen



Quelle: (Ipsen International GmbH 2022b)

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

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

Anlagentypen	Jährlicher Anlagendurchsatz*		Jährlicher Energieverbrauch		Energiebedingte CO ₂ -Emissionen**	
	9,4 Mio. t	Anteil	1.985 - 4.835 GWh	Anteil	588 - 1.490 Tsd. t	Anteil
Durchlauföfen Lohnhärtereien (fossil) ¹⁾	478 Tsd. t	5 %	156 - 267 GWh	6 - 8 %	31 - 54 Tsd. t	4 - 5 %
Durchlauföfen Betriebshärtereien (fossil) ²⁾	1.700 Tsd. t	18 %	544 - 1.003 GWh	21 - 27 %	110 - 203 Tsd. t	14 - 19 %
Kammeröfen Lohnhärtereien (fossil) ³⁾	918 Tsd. t	10 %	514 - 1.327 GWh	26 - 27 %	104 - 268 Tsd. t	18 %
Durchlauföfen (Lohnhärtereien) (el.) ¹⁾	56 Tsd. t	1 %	23 - 27 GWh	< 1 %	11 - 14 Tsd. t	1 - 2 %
Durchlauföfen (Betriebshärtereien) (el.) ²⁾	450 Tsd. t	5 %	180 - 216 GWh	4 - 9 %	90 - 108 Tsd. t	7 - 15 %
Kammeröfen (Lohnhärtereien) (el.) ³⁾	243 Tsd. t	3 %	58 - 479 GWh	3 - 10 %	29 - 239 Tsd. t	5 - 16 %
Diverse Vorwärmöfen (fossil oder elektrisch) ⁴⁾	2.522 Tsd. t	27 %	209 - 421 GWh	9 - 11 %	73 - 148 Tsd. t	10 - 12 %
Diverse Anlassöfen (fossil oder elektrisch) ⁴⁾	2.522 Tsd. t	27 %	78 - 610 GWh	4 - 13 %	27 - 214 Tsd. t	5 - 14 %
Vakuumöfen (überwiegend elektrisch) ⁵⁾	83 Tsd. t	< 1 %	57 - 84 GWh	2 - 3 %	28 - 42 Tsd. t	3 - 5 %
Diverse Nitrieröfen (überwiegend elektrisch) ⁶⁾	425 Tsd. t	< 5 %	166 - 402 GWh	8 %	83 - 201 Tsd. t	13 - 14 %
Verteilung						
Anteil Anlagen mit elektrischer Energie beheizt				32 - 36 %	50 - 53 %	
Anteil Anlagen mit fossiler Energie beheizt				64 - 68 %	47 - 50 %	
Davon im Rahmen der Studie betrachteten Anlagentypen (fett)				83 - 89 %	74 - 83 %	

* 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. ** Neben energiebedingten CO₂-Emissionen fallen prozessbedingte CO₂-Emissionen an

1) Der Anlagendurchsatz wird aus der mittleren Anlagenkapazität (ca. 6.000 //a bis 7.000 t/a) und Anlagenanzahl (ca. 100 Stk.) für Bandanlagen und Durchstoßöfen in Lohnhärtereien im Anlagenpark in Deutschland auf Basis von Informationen nach (Expert:inneninterview 2021t, 2021u) abgeschätzt. Der Anteil fossil beheizter Anlagen wird mit 90 % angenommen. 2) Die Anlagendurchsatz wird aus der mittleren Anlagenkapazität (ca. 32 Tsd. t/a) und Anlagenanzahl (ca. 80 Stk.) für Durchstoßöfen in Betriebshärtereien im Anlagenpark in Deutschland auf Basis von Informationen nach (Expert:inneninterview 2021t, 2021q) abgeschätzt. Der Anteil fossil beheizter Anlagen wird mit 80 % angenommen. 3) Die Anlagendurchsatz wird aus der mittleren Anlagenkapazität (ca. 1.800 t/a) und Anlagenanzahl (ca. 750 Stk.) für Kammeröfen in Lohnhärtereien im Anlagenpark in Deutschland auf Basis von Informationen nach (Expert:inneninterview 2021t, 2021u) abgeschätzt. Der Anteil fossil beheizter Anlagen wird mit 80 % angenommen.

Betrachtete Anwendungen und Referenztechniken

Referenztechnik	
Definition	konti. Aufkohlungs-/Austenitisierungsöfen Stahl mit Erdgasbeheizung
Anwendung	kontinuierliches Aufkohlen und Austenitisieren Stahl ($T_{\text{Prozess,max}} \approx 1050^\circ\text{C}$)
Thermoprozessanlage(n)	Durchstoßöfen, Bandöfen, Rollenherdöfen
Beheizungstechnologie(n)	Erdgasbeheizung

Unterscheidung zwischen Lohn- und Betriebshärtereien

Referenztechnik	
Definition	diskonti. Aufkohlungs-/Austenitisierungsöfen Stahl mit Erdgasbeheizung
Anwendung	diskontinuierliches Aufkohlen und Austenitisieren Stahl ($T_{\text{Prozess,max}} \approx 1.050^\circ\text{C}$)
Thermoprozessanlage(n)	Kammeröfen
Beheizungstechnologie(n)	Erdgasbeheizung

Definition Alternativtechniken

Technik und Technologie	
Referenztechnik	konti. Aufkohlungs-/Austenitisierungsofen mit Erdgasbeheizung ($T_{\text{Prozess,max}} \approx 1.050^{\circ}\text{C}$)
Alternative Beheizungstechnologie(n)	Elektrifizierung (im Strahlheizrohr) Wasserstoffbeheizung (im Strahlheizrohr)
Alternativtechnik(en)	konti. Aufkohlungs-/Austenitisierungsofen mit elektrischer Beheizung konti. Aufkohlungs-/Austenitisierungsofen mit Wasserstoffbeheizung

Unterscheidung zwischen Lohn- und Betriebshärtereien

Technik und Technologie	
Referenztechnik	diskonti. Aufkohlungs-/Austenitisierungsofen mit Erdgasbeheizung ($T_{\text{Prozess,max}} \approx 1.050^{\circ}\text{C}$)
Alternative Beheizungstechnologie(n)	Elektrifizierung (im Strahlheizrohr) Wasserstoffbeheizung (im Strahlheizrohr)
Alternativtechnik(en)	diskonti. Aufkohlungs-/Austenitisierungsofen mit elektrischer Beheizung diskonti. Aufkohlungs-/Austenitisierungsofen mit Wasserstoffbeheizung

Erhebung von Kenndaten: „Kontinuierliches Aufkohlen und Austenitisieren (Lohnhärterei)“

Technik	Referenztechnik	Alternativtechnik 1	Alternativtechnik 2	Alternativtechnik 3	Einheit	Quellen
Beheizungstechnologie	Erdgasbeheizung	Elektrifizierung	Elektrifizierung (Alt.)	Wasserstoffbeheizung		
Thermoprozessanlagen	(Durchstoß-,) Bandofen Vergüten*					
Produkt	Härteteil	Härteteil	Härteteil	Härteteil		
Investition Neubau	288	515	250	288	EUR/t _{Kap.}	[1]
Investition Modernisierung	17	26	12	17	EUR/t _{Kap.}	[1]
Minimale Investition Neubau	288	515	250	288	EUR/t _{Kap.}	[1]
Min. Investition Modernisierung	17	26	12	17	EUR/t _{Kap.}	[1]
TRL	9	9	9	< 4	-	[1]
Energieträger 1	Erdgas	Strom	Strom	EE-Wasserstoff	-	
Energieträger 2	keiner	keiner	keiner	keiner	-	
Energieträger 3	keiner	keiner	keiner	keiner	-	
Spezifischer Energiebedarf 1 ^{a)}	0,413	0,400	0,400	0,413	MWh/t _{Pr.}	[1]
Spezifischer Energiebedarf 2	0,000	0,000	0,000	0,000	MWh/t _{Pr.}	
Spezifischer Energiebedarf 3	0,000	0,000	0,000	0,000	MWh/t _{Pr.}	
Min. spezifischer Energiebedarf	0,413	0,400	0,400	0,413	MWh/t _{Pr.}	[1]
Prozessbedingte Emissionen ^{b)}	0,039	0,093	0,039	0,039	t _{CO2} /t _{Pr.}	[1]
Betriebs- und Wartungskosten	23,1	25,8	12,5	23,1	EUR/t _{Kap.}	[1]
Abschreibungszeitraum	12	12	12	12	a	[2]
Lebensdauer	13	13	13	13	a	[1]
Repräsentative Kapazität	7.640	1.940	7.760	7.640	t _{Jahresleistung}	[1]
Auslastung	0,85	0,90	0,90	0,85	1,00	[1]
Anteil Bestand 2020	90 %	10 %	0 %	0 %	%	[1]
Verfügbar ab	2020	2020	2020	2030		
Verfügbar bis	2050	2050	2050	2050		

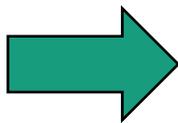
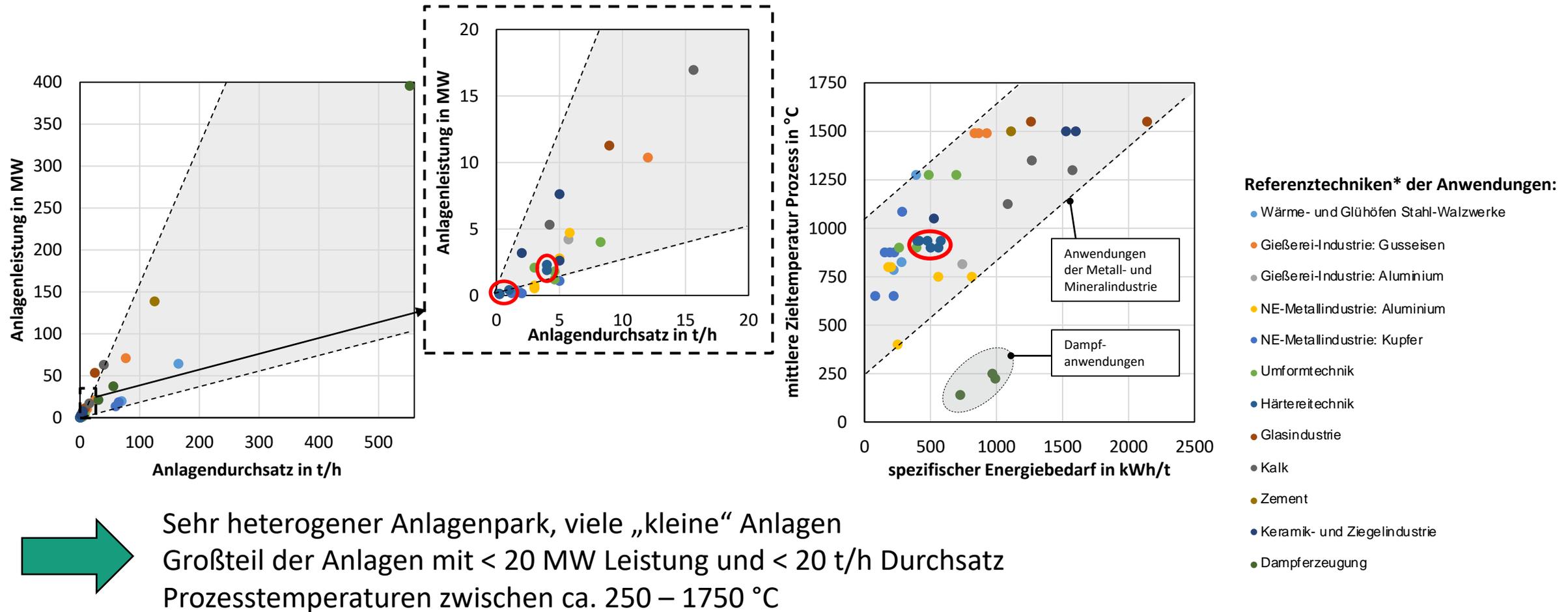
Annahmen, Legende und Quellen siehe Bericht

Erhebung von Kenndaten: „Kontinuierliches Aufkohlen und Austenitisieren (Betriebshärterei)“

Technik	Referenztechnik	Alternativtechnik 1	Alternativtechnik 2	Einheit	Quellen
Beheizungstechnologie	Erdgasbeheizung	Elektrifizierung	Wasserstoffbeheizung		
Thermoprozessanlagen	Durchstoßofen Vergüten	Durchstoßofen Vergüten	Durchstoßofen Vergüten		
Produkt	Härteteil	Härteteil	Härteteil		
Investition Neubau	322	250	322	EUR/t _{Kap.}	[1]
Investition Modernisierung	19	13	19	EUR/t _{Kap.}	[1]
Minimale Investition Neubau	250	250	322	EUR/t _{Kap.}	[1, 2]
Min. Investition Modernisierung	17	13	19	EUR/t _{Kap.}	[1, 2]
TRL	9	9	< 4	-	[1]
Energieträger 1	Erdgas	Strom	EE-Wasserstoff	-	
Energieträger 2	keiner	keiner	keiner	-	
Energieträger 3	keiner	keiner	keiner	-	
Spezifischer Energiebedarf 1	0,577	0,477	0,577	MWh/t _{Pr.}	[1]
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	0,248	0,477	0,577	MWh/t _{Pr.}	[1, 2]
Prozessbedingte Emissionen	0,021	0,021	0,021	t _{CO2} /t _{Pr.}	[1]
Betriebs- und Wartungskosten	15,4	11,1	15,4	EUR/t _{Kap.}	[1]
Abschreibungszeitraum	12	12	12	a	[3]
Lebensdauer	13	13	13	a	[1]
Repräsentative Kapazität	31.080	34.000	31.080	t _{Jahresleistung}	[1]
Auslastung	0,85	0,90	0,85	1,00	[1]
Anteil Bestand 2020	80 %	20 %	0 %	%	[1]
Verfügbar ab	2020	2020	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.

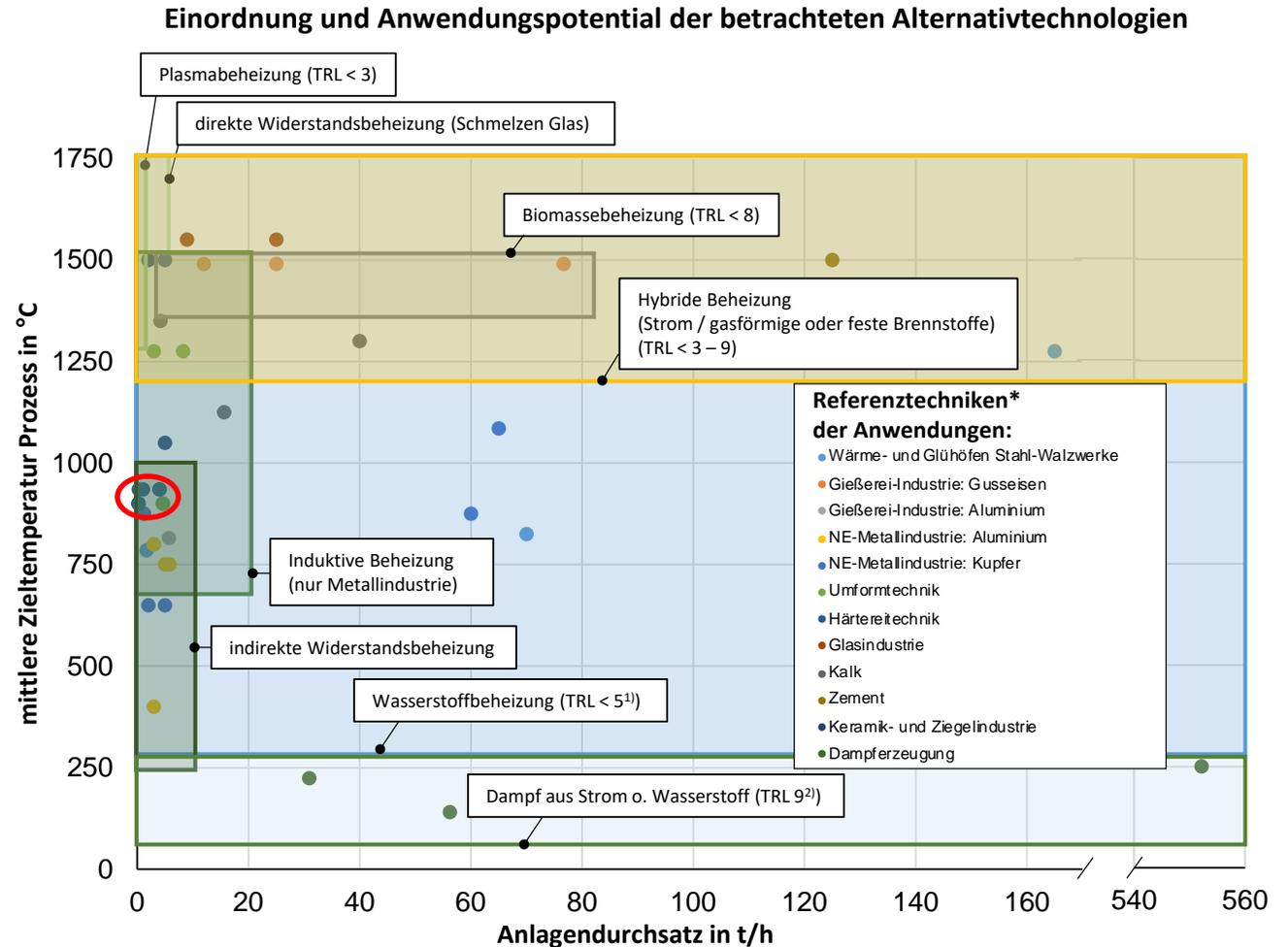
„n.b.“: Anwendung wurde nicht betrachtet. Das TRL der Technologiekombination wird gleich oder geringer als das der Technologie mit jeweils geringeren TRL eingeschätzt.

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	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 Drehrohrföfen	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	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	< 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.



Zusammenfassung und Zwischenergebnis

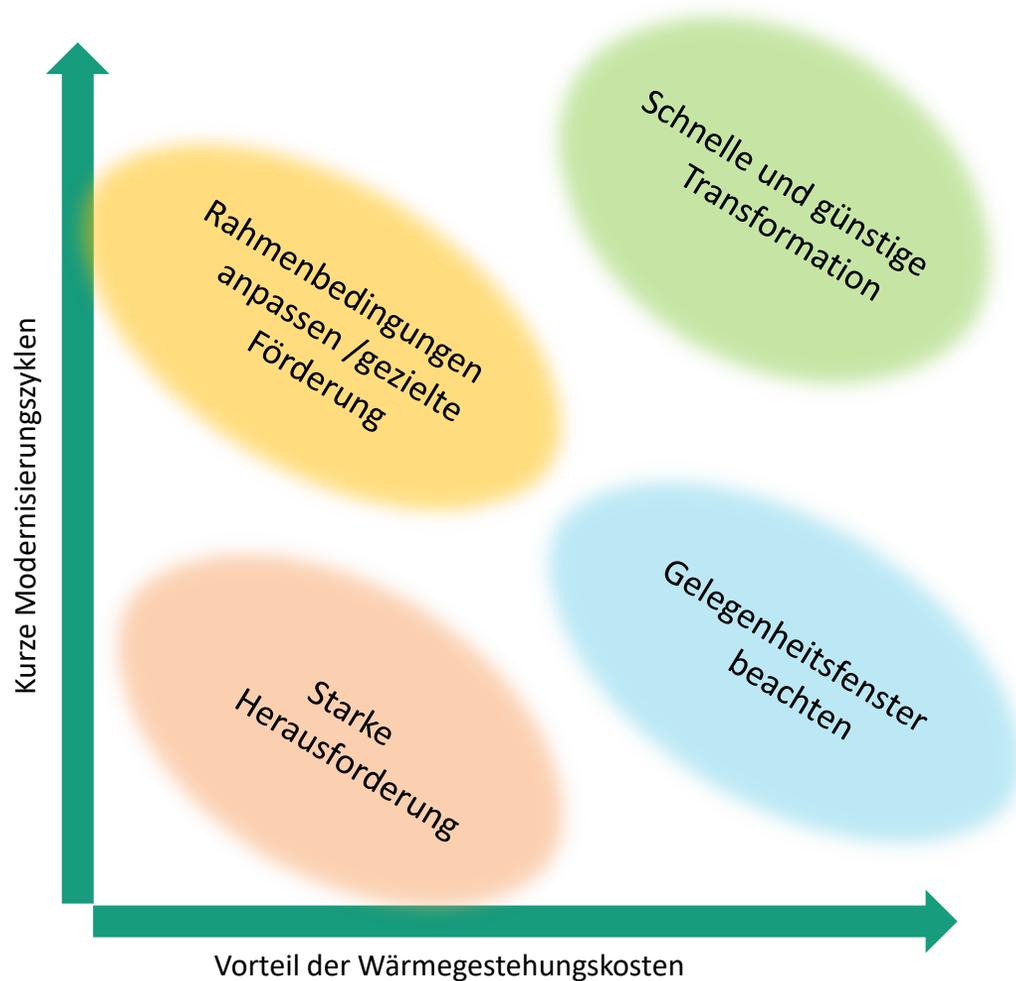
	Betrachtete Anwendungen und Thermoprozessanlagen*	
	Kontinuierliches Aufkohlen u. Austenitisieren Stahl ($T_{\text{Prozess,max.}} \approx 1050 \text{ °C}$)	Diskontinuierliches Aufkohlen u. Austenitisieren Stahl ($T_{\text{Prozess,max.}} \approx 1050 \text{ °C}$)
	Durchstoß-, Bandofen	Kammerofen
Technisches Gesamtpotenzial für die betrachteten Anwendungen im Anlagenpark in Deutschland	<p>Stand der Technik: ca. 100 Anlagen diesen Typs in Lohnhärtereien; ca. 80 Anlagen diesen Typs in Betriebshärtereien Durchsatz: ca. 0,25 - 1 t/h (Lohnhärtereien); Durchsatz: ca. 1 - 4 t/h (Betriebshärtereien)</p> <p>Erdgasbeheizung ca. 80 - 90 %, Elektrifizierung ca. 10 - 20 % Alternativtechnologien: Elektrifizierung (SHR); Wasserstoffbeheizung (SHR)</p>	<p>Stand der Technik: ca. 700 unterschiedlicher Größe überwiegend in Lohnhärtereien Durchsatz: ca. 0,25 t/h \pm X**</p> <p>Erdgasbeheizung 80 %, Elektrifizierung ca. 20 % Alternativtechnologien: Elektrifizierung (SHR); Wasserstoffbeheizung (SHR)</p>
F&E-Bedarf	<p>Elektrifizierung: TRL = 9 (Stand der Technik), aber ökonomische und ökologische Restriktionen vorhanden Wasserstoffbeheizung: TRL < 4, Labor-, Demonstrations-, und Betriebserfahrung notwendig</p>	<p>Elektrifizierung: TRL = 9 (Stand der Technik), aber ökonomische und ökologische Restriktionen vorhanden Wasserstoffbeheizung: TRL < 4, Labor-, Demonstrations-, und Betriebserfahrung notwendig</p>
Endenergiebedarf Summe für alle Anlagen der betrachteten Anwendung (ohne Berücksichtigung des Energiebedarfs von Vorketten für die Erzeugung)	<p>Gesamtenergiebedarf aktuell: ca. 220 GWh/a (Lohnhärtereien); ca. 1.200 GWh/a (Betriebshärtereien) für Produktionsmengen von: ca. 530 Tsd. t/a (Lohnhärtereien); ca. 2.150 Tsd. t/a (Betriebshärtereien) zukünftig: vergleichbar oder geringer (ca. -10 %) Potenzial zur Flexibilisierung: gering</p>	<p>Gesamtenergiebedarf aktuell: ca. 640 GWh/a für Produktionsmenge von: ca. 1.150 Tsd. t/a zukünftig: vergleichbar oder geringer (ca. -5 %) Potenzial zur Flexibilisierung: gering</p>
Abwärmeentstehung Mittelwerte für Einzelanlagen (exemplarisch)	<p>Erdgasbeheizung: hier ca. 500 m³/h STP (Lohnhärtereien); hier ca. 2750 m³/h STP (Betriebshärtereien); T = 400 - 450 °C Elektrifizierung: leichte Verringerung erwartet Wasserstoffbeheizung: keine Veränderung erwartet</p>	<p>Erdgasbeheizung: hier ca. 155 m³/h STP; T = 400 - 450 °C Elektrifizierung: leichte Verringerung erwartet Wasserstoffbeheizung: keine Veränderung erwartet</p>

Anmerkungen:

* Neben den hier vorgestellten Anlagen sind in werden in der Härtereitechnik eine ähnlich hohe Anzahl von elektrisch oder fossil beheizten Vorwärm- und Anlassöfen eingesetzt, welche in den Kennzahlen dieser Tabelle nicht enthalten sind.

** Der Wert bezieht sich auf das Technikbeispiel und besitzt keine Allgemeingültigkeit. Es sind aufgrund der unterschiedlichen durchgeführten Prozesse in diesen Anlagen größerer Abweichungen möglich.

Wir untersuchen zwei Dimensionen der wirtschaftlichen Bewertung

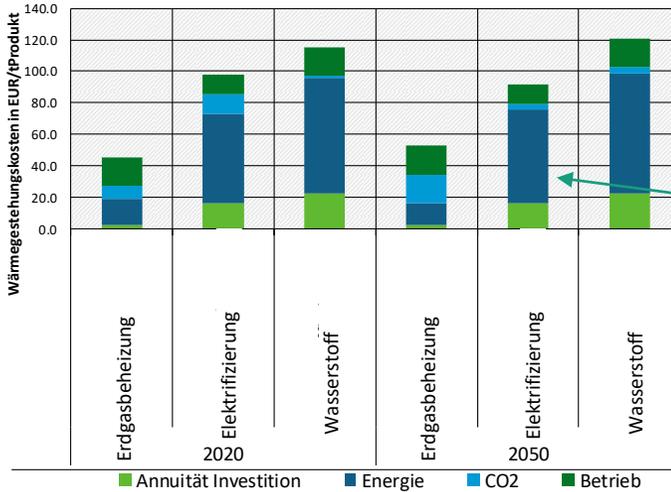


- Modernisierungszyklen
 - Orientieren sich an Abschreibungszeiträumen
 - Vorzeitiger Austausch von Anlagen ist eine Option (und in vielen Fällen notwendig)
- Wärmegestehungskosten
 - Investition, Energie, CO₂, Betrieb und Wartung
 - Differenz zu Referenztechnologie ist maßgeblich

Dimension 1: Wärmegestehungskosten bestimmen die Attraktivität der Techniken

Härtereitechnik

Kontinuierliches Aufkohlen und Austenitisieren (Betriebswärtereien)



Eigene Berechnung Fraunhofer ISI

Referenzfall

Transformation

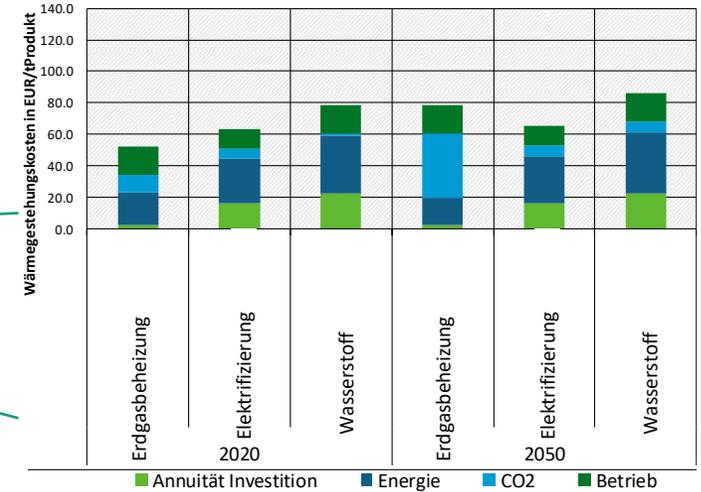
Kostenkomponenten

Techniken

Gas:	41€/MWh	Gas:	49€/MWh
Strom:	144 €/MWh	Strom:	72 €/MWh
CO ₂ :	125€/t	CO ₂ :	300€/t

Härtereitechnik

Kontinuierliches Aufkohlen und Austenitisieren (Betriebswärtereien)



Eigene Berechnung Fraunhofer ISI

- Konventionelle Technik (Erdgas) ist auch bis 2050 im Referenzfall deutlich günstiger
- CO₂-Preise können Energieträger-Kostendifferenz nicht ausgleichen
- Insbesondere hohe Strompreise sorgen für die Differenz
- Zusätzliche Investitionen für Anlagenumbau sind vorhanden

- Elektrifizierung in 2050 günstiger als fossile Technik – aber nur knapp und spät!
- Dafür sorgen hohe CO₂- und niedrige Strompreise
- Prozessbedingte Emissionen „verwischen“ den Kostenvorteil etwas
- Hohe Investitionen erschweren den Wechsel
- Ungewisse Effizienzvorteile

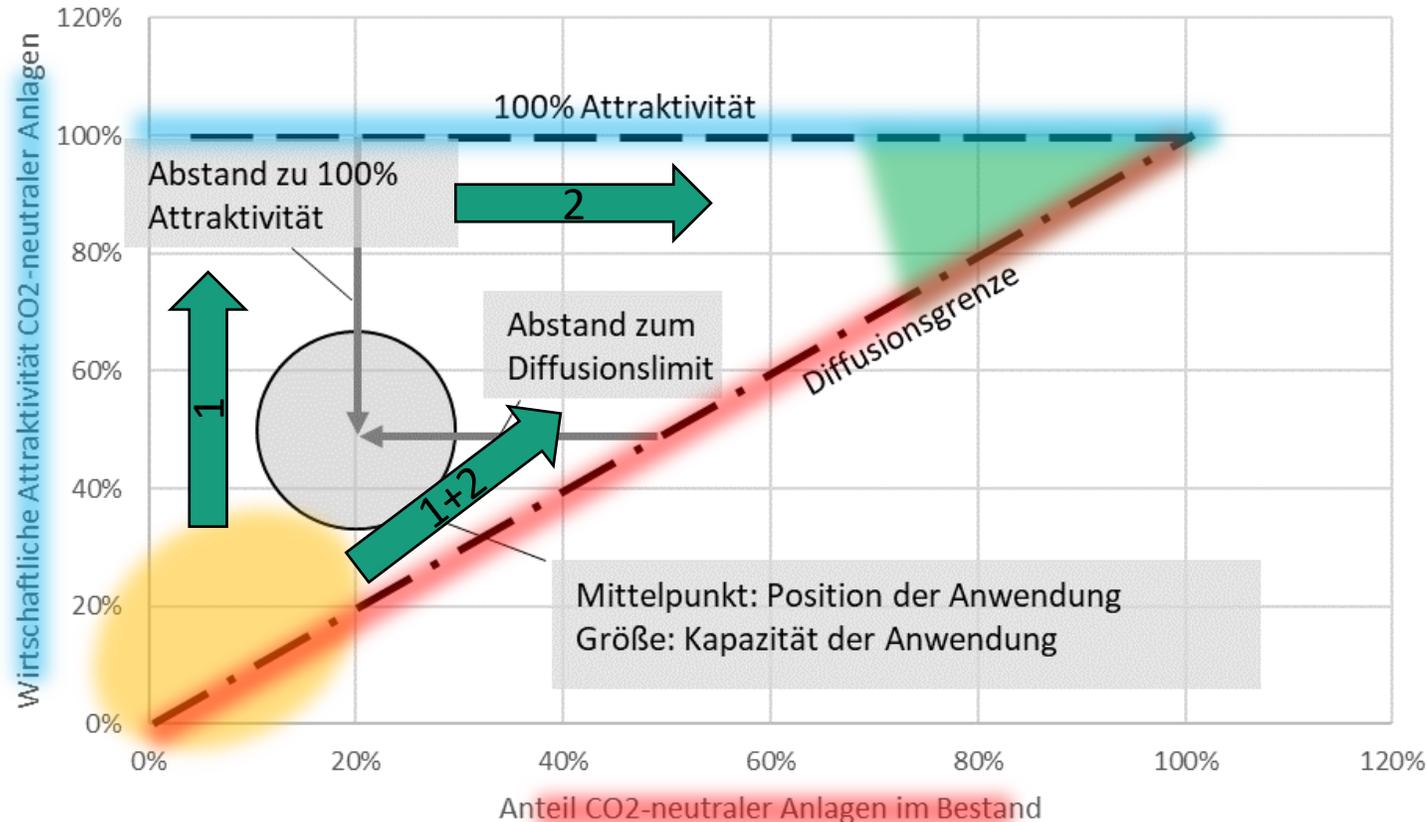
Dimension 2: Modernisierungszyklen bestimmen die Austauschrate der Anlagen

#	Anwendung	Lebensdauer	Lebensende bei Invest 2020	Lebensende bei Invest														
				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)	13	2033															
24	Kontinuierliches Aufkohlen und Austenitisieren (Betriebshärtereien)	13	2033															
25	Diskontinuierliches Aufkohlen und Austenitisieren	13	2033															
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 sind bis 2032 noch denkbar (sehr geringe Lebensdauer)
- Für ältere Anlagen ist von 2 Modernisierungszyklen auszugehen
- Ähnliche Gegebenheiten nur noch bei Glaswannen zu beobachten.
- Handlungsdruck (aus dieser Richtung) dadurch geringer.
- Aber: Umgebende Infrastruktur sollte in Planung einbezogen werden (Stromanschlussleistung!)
- Daher:
 - Planungen beginnen
 - Über Alternativtechniken informieren
 - „Tragödie des Allgemeinguts“¹ vermeiden

1: https://de.wikipedia.org/wiki/Tragik_der_Allmende

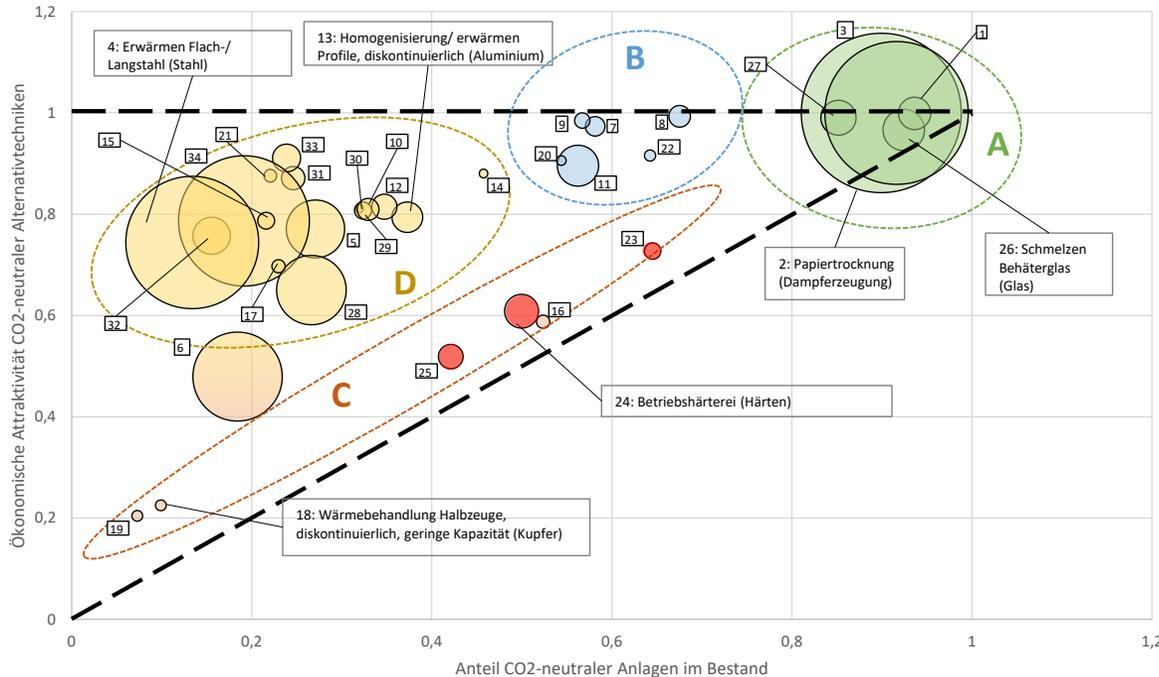
Erläuterung Diffusionsabbildung



■ 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 50-60€/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

miro board

https://miro.com/app/board/uXjVMhEwswg=?share_link_id=593142151734

siehe auch Link im Chat

Pause – 10 Minuten

Gemeinsame Diskussion und interaktives Arbeiten

Ergebnisse Stahl (Auszug)

	Elektrifizierung	Wasserstoff	Hybrid
Kont. Erwärmen Flach-/Langstahl	<p>F&E-Bedarf</p> <ul style="list-style-type: none"> Zunderbildung und -beschaffenheit bei Ofenatmosphäre "Luft" Einfluss Ofenatmosphäre auf Produktqualität (ggf. Beeinträchtigung Ofenatmosphäre) Abkühlung von Zunder im Ofen Wirtschaftliche Fraktionierung und Materialverteilung <p>Hindernisse</p> <ul style="list-style-type: none"> Verfügbarkeit auch in der Hochspannung/Übertragungsnetzen per eingesetzter Induktoren auch für Umspannwerke (Blügelprozesse) Zu geringe Energiedichte Hohe Kosten für Elektroenergie 	<p>F&E-Bedarf</p> <ul style="list-style-type: none"> Zunderbildung und -beschaffenheit bei hohen Wasserdampfgehalt in der Ofenatmosphäre <p>Hindernisse</p> <ul style="list-style-type: none"> unklare Verfügbarkeit (Zeitraumen, evtl. nur Gemische Erdgas/H₂) Vorbehalte hinsichtlich eines negativen Einflusses auf das Wärmegut Geringere Effizienz im Vergleich zu el. Lösung <p>Umbauumfang beim Wechsel von Erdgas nach Wasserstoff</p>	<p>F&E-Bedarf</p> <p>Hindernisse</p> <ul style="list-style-type: none"> z.T. doppelte Infrastruktur (Strom, Brenngas) erforderlich Wirkungsgradverluste der einzelnen Heiztechnologien durch Teillastfahrweise im Hybridbetrieb
Kont. Wärmebehandlung Flachstahl			
Diskont. Wärmebehandlung Flachstahl	<p>Etablierte Technologie</p> <ul style="list-style-type: none"> bereits hundertfach im Einsatz <p>Beispiel</p> <p>Hindernisse</p> <ul style="list-style-type: none"> Verfügbarkeit auch in der Hochspannung/Übertragungsnetzen per eingesetzter Induktoren auch für Umspannwerke (Blügelprozesse) 	<p>F&E-Bedarf</p> <ul style="list-style-type: none"> erste Pilotanlagen gibt es bereits <p>Hindernisse</p> <ul style="list-style-type: none"> Verfügbarkeit und Kosten, bisher nicht wirtschaftlich im Vergleich zu EE und Erdgas wahrscheinlich aus wirtschaftlicher Sicht nicht zukunftsfähiger durch Effizienzverluste (höher 30%) im Vergleich zum Strom 	<p>F&E-Bedarf</p> <p>Hindernisse</p> <ul style="list-style-type: none"> nicht relevant nicht relevant
	Notwendige Rahmenbedingungen	Notwendige Rahmenbedingungen	Notwendige Rahmenbedingungen
	<p>Politisch</p> <ul style="list-style-type: none"> Netzausbau <p>Wirtschaftlich</p> <ul style="list-style-type: none"> Förderung Opex Differenz zu Erdgas plus CO₂ Differenzierte Betrachtung 	<p>Politisch</p> <p>Wirtschaftlich</p>	<p>Politisch</p> <p>Wirtschaftlich</p>
	Notwendige Partner	Notwendige Partner	Notwendige Partner
	<ul style="list-style-type: none"> In Deutschland: bisher hohe EE-Kosten im Vergleich zu Erdgas und deshalb nicht wirtschaftlich Mittelspannungsversorgung und Verfügbarkeit 		

Ergebnisse Härtereitechnik (Auszug)

	Elektrifizierung	Wasserstoff	Hybrid																														
Kont. Aufkohlen und Austenitisieren (Lohnhärt.) 	<table border="1"> <tr> <th>F&E-Bedarf</th> <th>Hindernisse</th> </tr> <tr> <td> <ul style="list-style-type: none"> Entwicklung Isolationswerkstoffe Reduzierung Verluste: z.B. optimales Verhältnis Heizleistung zu Abstrahlfläche Strahlrohr </td> <td> <ul style="list-style-type: none"> keine bekannten Umsetzungen (Umbau Gas auf E-Heizungen) Infrastruktur, Versorgung bei hoher Auslastung (Transformatorleistung, maschinen etc.) hinreichend CO2 nur bei höherem Anteil Grünstrom sinnvoll </td> </tr> </table>	F&E-Bedarf	Hindernisse	<ul style="list-style-type: none"> Entwicklung Isolationswerkstoffe Reduzierung Verluste: z.B. optimales Verhältnis Heizleistung zu Abstrahlfläche Strahlrohr 	<ul style="list-style-type: none"> keine bekannten Umsetzungen (Umbau Gas auf E-Heizungen) Infrastruktur, Versorgung bei hoher Auslastung (Transformatorleistung, maschinen etc.) hinreichend CO2 nur bei höherem Anteil Grünstrom sinnvoll 	<table border="1"> <tr> <th>F&E-Bedarf</th> <th>Hindernisse</th> </tr> <tr> <td> <ul style="list-style-type: none"> Thema Wasserstoffversprödung: in wie weit ist das Gas-Leitungssystem davon betroffen? Einfluss Mischungsverhältnis in einem Gemisch aus Erdgas und Wasserstoff auf Brenntechnologie? </td> <td> <ul style="list-style-type: none"> Verfügbarkeit ab wann? </td> </tr> </table>	F&E-Bedarf	Hindernisse	<ul style="list-style-type: none"> Thema Wasserstoffversprödung: in wie weit ist das Gas-Leitungssystem davon betroffen? Einfluss Mischungsverhältnis in einem Gemisch aus Erdgas und Wasserstoff auf Brenntechnologie? 	<ul style="list-style-type: none"> Verfügbarkeit ab wann? 	<table border="1"> <tr> <th>F&E-Bedarf</th> <th>Hindernisse</th> </tr> <tr> <td></td> <td> <ul style="list-style-type: none"> Hoher technischer Aufwand in Bezug auf Anlagentechnik sowie Infrastruktur. </td> </tr> </table>	F&E-Bedarf	Hindernisse		<ul style="list-style-type: none"> Hoher technischer Aufwand in Bezug auf Anlagentechnik sowie Infrastruktur. 																		
F&E-Bedarf	Hindernisse																																
<ul style="list-style-type: none"> Entwicklung Isolationswerkstoffe Reduzierung Verluste: z.B. optimales Verhältnis Heizleistung zu Abstrahlfläche Strahlrohr 	<ul style="list-style-type: none"> keine bekannten Umsetzungen (Umbau Gas auf E-Heizungen) Infrastruktur, Versorgung bei hoher Auslastung (Transformatorleistung, maschinen etc.) hinreichend CO2 nur bei höherem Anteil Grünstrom sinnvoll 																																
F&E-Bedarf	Hindernisse																																
<ul style="list-style-type: none"> Thema Wasserstoffversprödung: in wie weit ist das Gas-Leitungssystem davon betroffen? Einfluss Mischungsverhältnis in einem Gemisch aus Erdgas und Wasserstoff auf Brenntechnologie? 	<ul style="list-style-type: none"> Verfügbarkeit ab wann? 																																
F&E-Bedarf	Hindernisse																																
	<ul style="list-style-type: none"> Hoher technischer Aufwand in Bezug auf Anlagentechnik sowie Infrastruktur. 																																
Kont. Aufkohlen und Austenitisieren (Betriebshärt.) 	<table border="1"> <tr> <th>Beispiel</th> <th>Beispiel</th> </tr> <tr> <td></td> <td></td> </tr> </table>	Beispiel	Beispiel			<table border="1"> <tr> <th></th> <th></th> </tr> <tr> <td></td> <td></td> </tr> </table>					<table border="1"> <tr> <th></th> <th></th> </tr> <tr> <td></td> <td></td> </tr> </table>																						
Beispiel	Beispiel																																
	<table border="1"> <tr> <th colspan="2">Notwendige Rahmenbedingungen</th> </tr> <tr> <th>Politisch</th> <th>Wirtschaftlich</th> </tr> <tr> <td> <ul style="list-style-type: none"> aktuelle Diskussion Industriestrompreise </td> <td> <ul style="list-style-type: none"> Sicherstellung der Versorgungssicherheit </td> </tr> <tr> <th colspan="2">Notwendige Partner</th> </tr> <tr> <td colspan="2">  </td> </tr> </table>	Notwendige Rahmenbedingungen		Politisch	Wirtschaftlich	<ul style="list-style-type: none"> aktuelle Diskussion Industriestrompreise 	<ul style="list-style-type: none"> Sicherstellung der Versorgungssicherheit 	Notwendige Partner				<table border="1"> <tr> <th colspan="2">Notwendige Rahmenbedingungen</th> </tr> <tr> <th>Politisch</th> <th>Wirtschaftlich</th> </tr> <tr> <td></td> <td> <ul style="list-style-type: none"> Sicherstellung der Versorgungssicherheit </td> </tr> <tr> <th colspan="2">Notwendige Partner</th> </tr> <tr> <td colspan="2">  </td> </tr> </table>	Notwendige Rahmenbedingungen		Politisch	Wirtschaftlich		<ul style="list-style-type: none"> Sicherstellung der Versorgungssicherheit 	Notwendige Partner				<table border="1"> <tr> <th colspan="2">Notwendige Rahmenbedingungen</th> </tr> <tr> <th>Politisch</th> <th>Wirtschaftlich</th> </tr> <tr> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <th colspan="2">Notwendige Partner</th> </tr> <tr> <td colspan="2">  </td> </tr> </table>	Notwendige Rahmenbedingungen		Politisch	Wirtschaftlich			Notwendige Partner			
Notwendige Rahmenbedingungen																																	
Politisch	Wirtschaftlich																																
<ul style="list-style-type: none"> aktuelle Diskussion Industriestrompreise 	<ul style="list-style-type: none"> Sicherstellung der Versorgungssicherheit 																																
Notwendige Partner																																	
																																	
Notwendige Rahmenbedingungen																																	
Politisch	Wirtschaftlich																																
	<ul style="list-style-type: none"> Sicherstellung der Versorgungssicherheit 																																
Notwendige Partner																																	
																																	
Notwendige Rahmenbedingungen																																	
Politisch	Wirtschaftlich																																
Notwendige Partner																																	
																																	

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
<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

