
CO₂-NEUTRALE PROZESSWÄRMEERZEUGUNG

Kick-off zur Veranstaltungsreihe im Rahmen der Veröffentlichung der UBA-Studie

27. September 2023 (online)



Foto: NLMK Group

Agenda der heutigen Veranstaltung

Moderation: Christian Schwotzer

- 09:00 – 09:10 Uhr: Begrüßung (C. Schwotzer)
- 09:10 – 09:25 Uhr: Einordnung der Studie und Zielsetzung der Veranstaltung inkl. Umfrage (C. Schwotzer)
- 09:25 – 09:40 Uhr: Ergebnisse Teil I: Schlussfolgerungen und 11 Kernelemente der Studie (T. Fleiter)
- 09:40 – 10:10 Uhr: Ergebnisse Teil II: Vertiefung Technik inkl. Diskussion (C. Schwotzer)
- 10:10 – 10:40 Uhr: Ergebnisse Teil III: Vertiefung Wirtschaftlichkeit und Diffusion inkl. Diskussion (T. Fleiter)

- *10:40 – 10:50 Uhr: Pause*

- 10:50 – 11:00 Uhr: Vorstellung der Methodik der Veranstaltungsreihe (C. Schwotzer)
- 11:00 – 11:50 Uhr: Gemeinsame Diskussion der Methodik und des weiteren Vorgehens (F. Kaiser, C. Schwotzer)
- 11:50 – 12:00 Uhr: Zusammenfassung (C. Schwotzer, T. Fleiter)

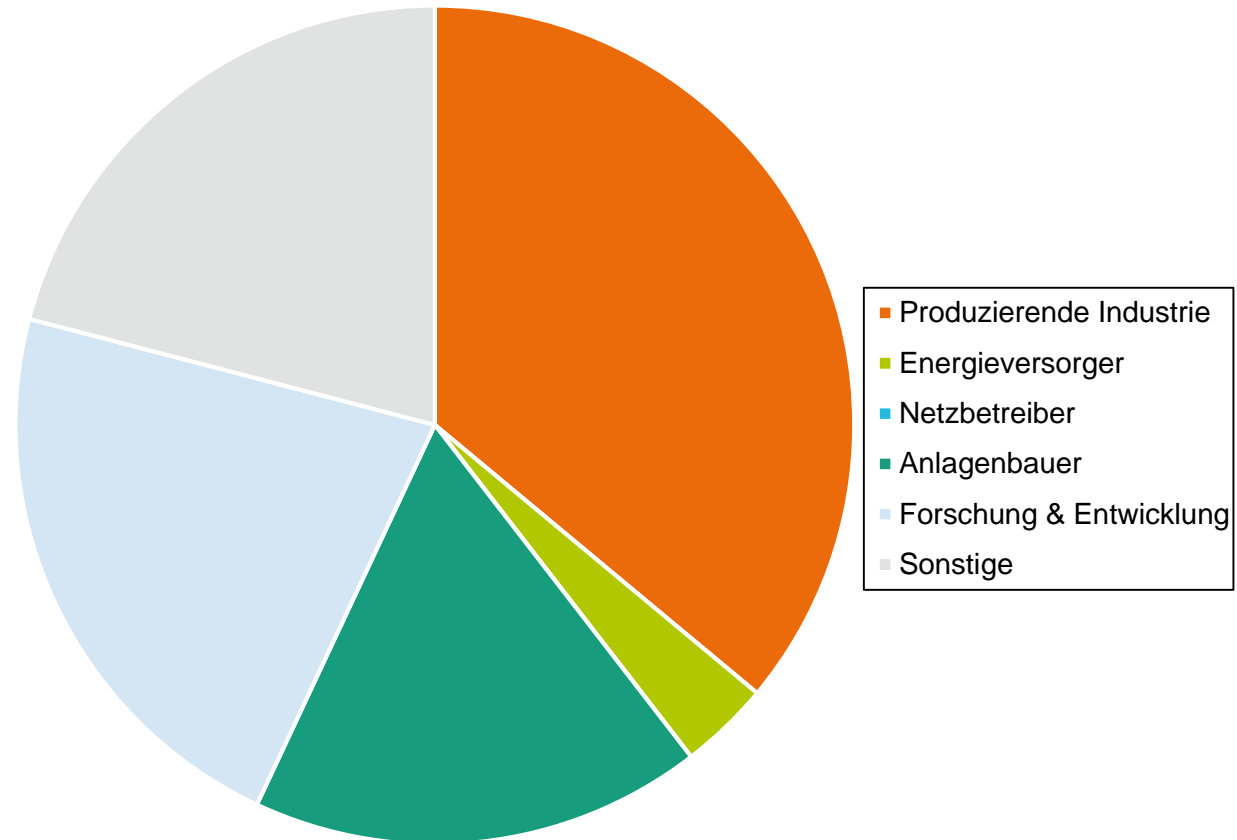
Umfrage zum Teilnehmerkreis

siehe auch Link im Chat

Ergebnisse der Umfrage

Frage 1: Zu welcher Branche gehört ihre Einrichtung?

Zu welcher Branche gehört ihre Einrichtung?



Frage 1: Zu welcher Branche gehört ihre Einrichtung?

Sonstige:

Medien

Technologieentwickler

Projektträger

Öffentlicher Dienst, Behörde, Landesagentur

Industrieverband

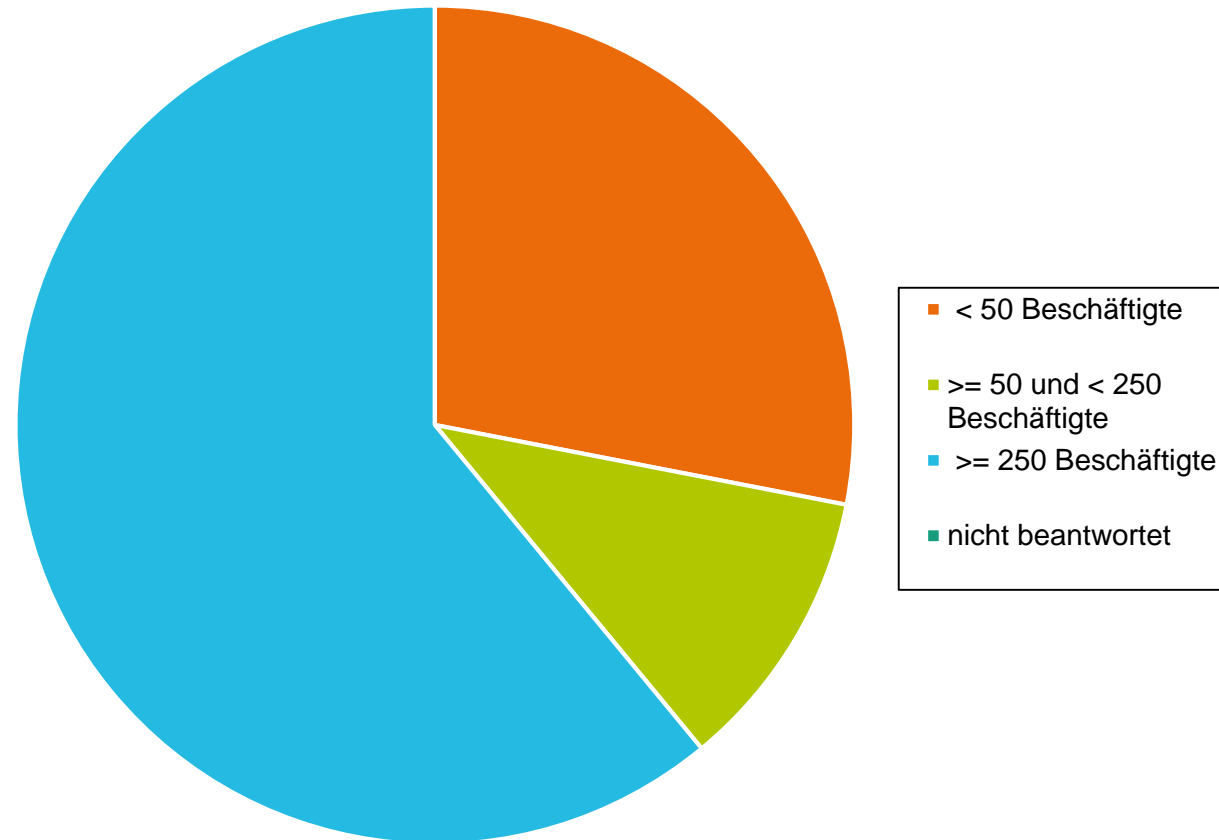
Selbstständiger Ingenieurdienstleister

Hersteller von Mess & Regletechnik

...

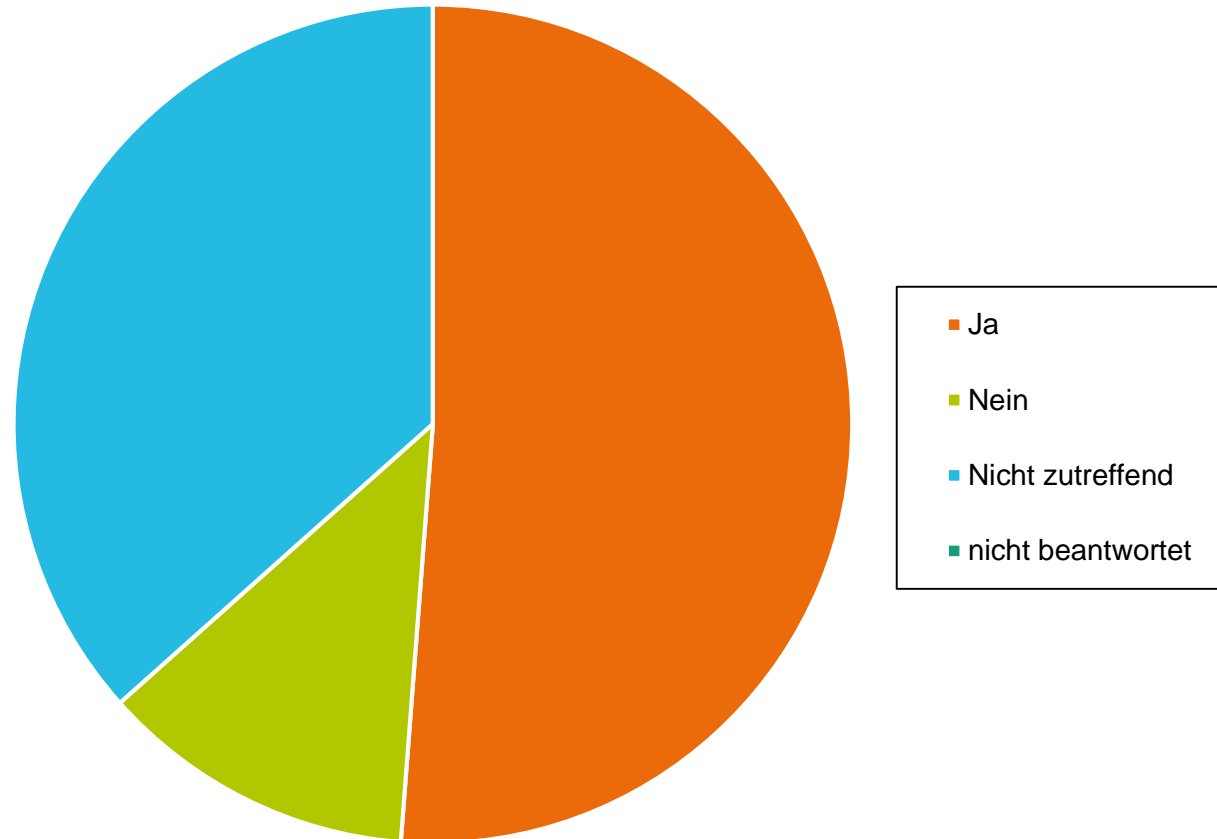
Frage 2: Wie viele Beschäftigte hat das Unternehmen, für welches Sie heute hier sind?

Wie viele Beschäftigte hat ihr Unternehmen?



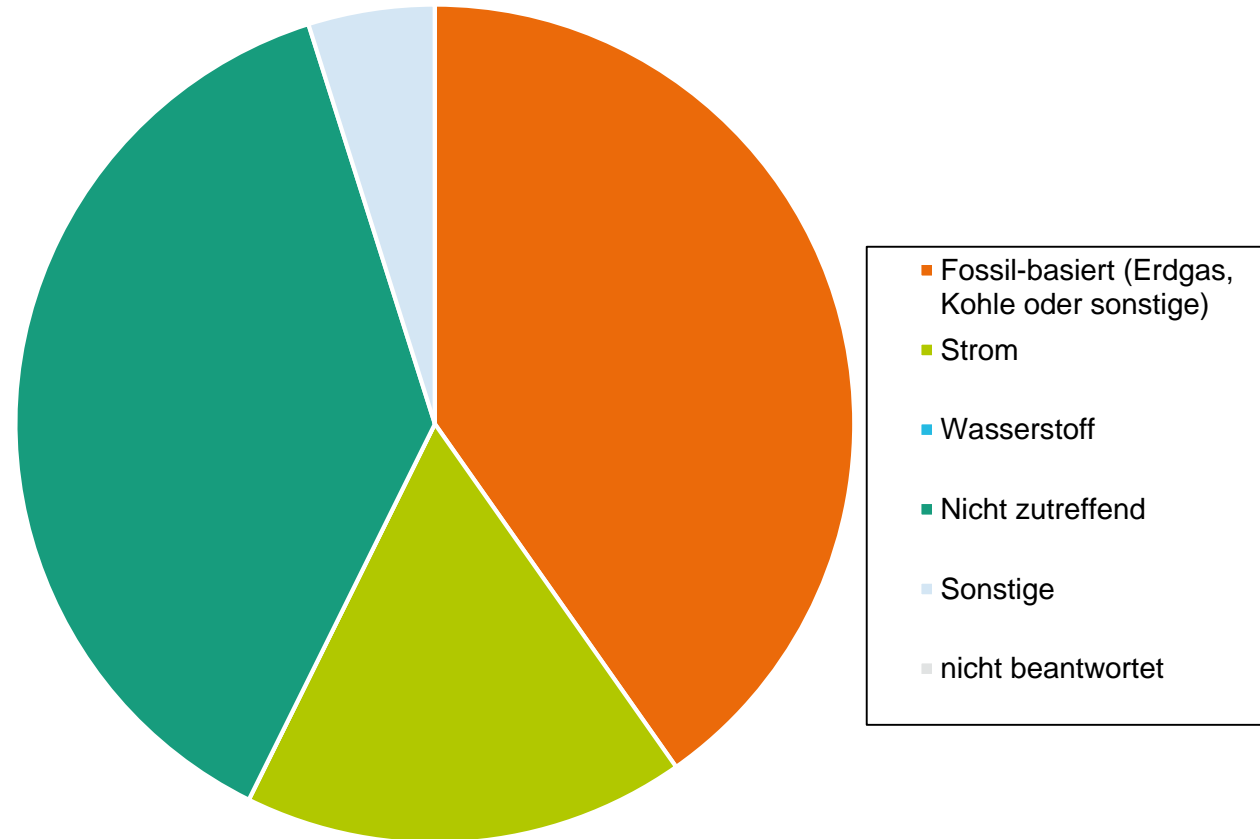
Frage 3: Gibt es in ihrem Unternehmen bereits eine Dekarbonisierungsstrategie (sofern zutreffend)?

Gibt es bei Ihnen bereits eine Dekarbonisierungsstrategie?



Frage 4: Welchen Energieträger setzen Sie im Anlagenpark ihres Unternehmens überwiegend ein (sofern zutreffend)?

Welchen Energieträger setzen Sie überwiegend ein ?



Frage 4: Welchen Energieträger setzen Sie im Anlagenpark ihres Unternehmens überwiegend ein (sofern zutreffend)?

Sonstige:

Abhängig vom "Kundenwunsch"

Nachhaltige Biomasse

....

Einordnung der Studie und Zielsetzung der Veranstaltung

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

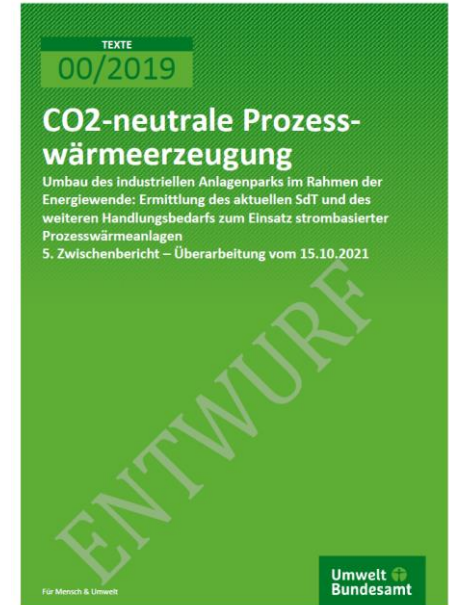


Dr. Christian Schwotzer, Felix Kaiser, Carsten Gondorf,
Justin Hauch, Jan Hof, Lukas Sankowski, Moritz Langhorst

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)

Transformationsstrategie für den Industriesektor - Wo steht die Diskussion aktuell?

CO2-neutrale Industrie - Stand der Diskussion:

- Für die CO2-neutrale Industrieproduktion sind Strom und Wasserstoff zukünftig zentral
- Die Umstellung auf erneuerbares Methan wären wenig Änderungen am Anlagenbestand der Industrie notwendig, aber Kosten und Energieverluste dieser Strategie sind vermutlich höher als bei Strom und Wasserstoff. Verfügbarkeit ist ungewiss
- Kreislaufwirtschaft, Energie- und Materialeffizienz und CCUS werden wichtige Beiträge leisten, es sind dennoch sehr große Mengen CO₂-neutrale Energien nötig
- **In der Prozesswärmeerzeugung gibt es große Wissenslücken, da viele Studien nur die größten Prozesse anschauen**

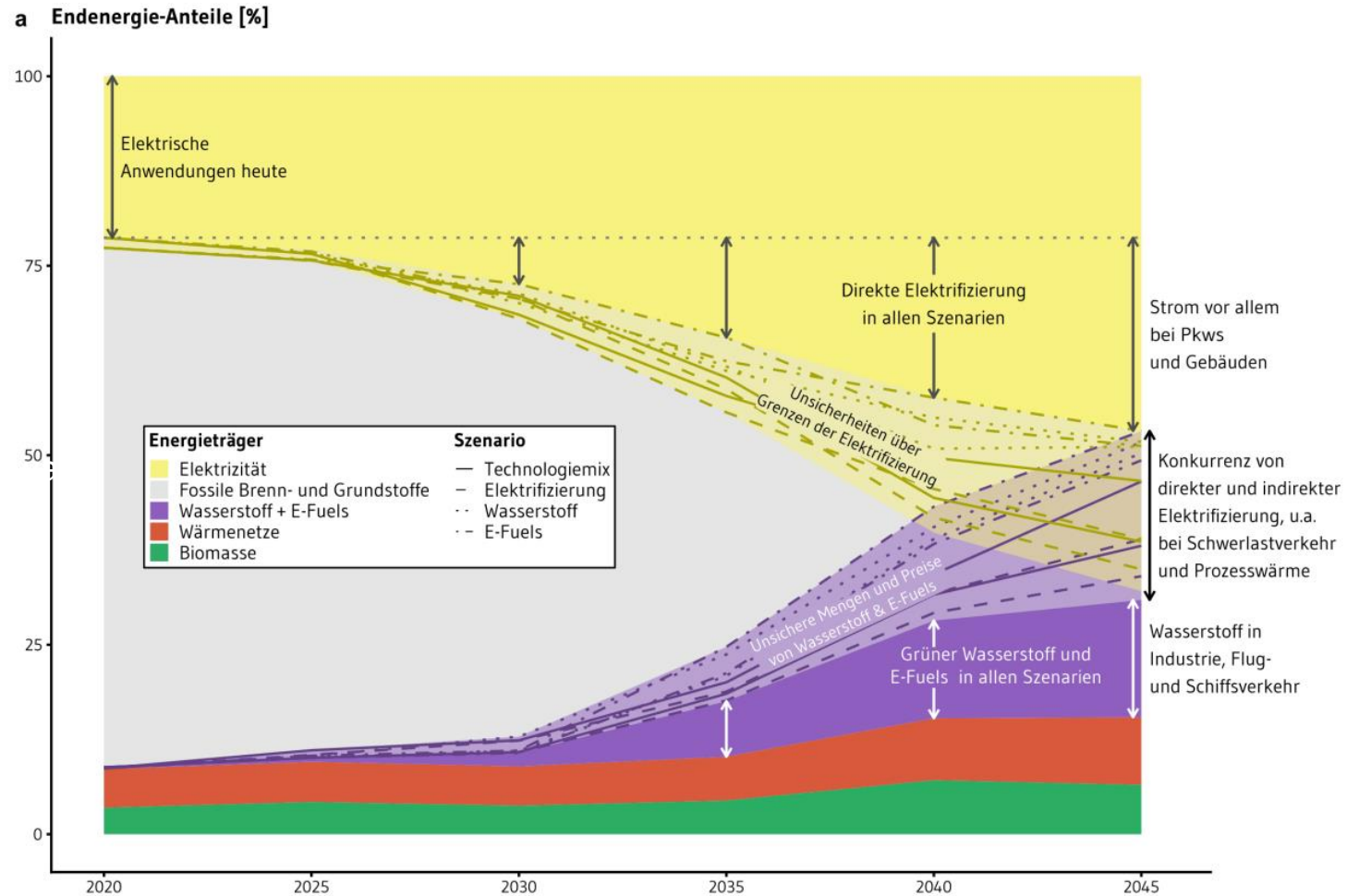
■ Wasserstoff für die CO2-neutrale Prozesswärme?

- Agora Industriewende (2021 & 2022):

Grüne Moleküle benötigt?	Industrie 
No-regret	<ul style="list-style-type: none">· Reaktionsmittel (Stahl aus Direktreduktion)· Stoffliche Nutzung (Ammoniak, Chemikalien)
Umstritten	<ul style="list-style-type: none">· Hochtemperatur-Wärme
Nicht empfehlenswert	<ul style="list-style-type: none">· Niedertemperatur-Wärme

Kaum untersucht
Stark Abhängig von Branche und Prozess
Kleine klare Strategie
Große Unsicherheiten für Unternehmen

Transformationsstrategie für den Industriesektor - Zukunft von Wasserstoff ebenfalls nicht eindeutig definiert.

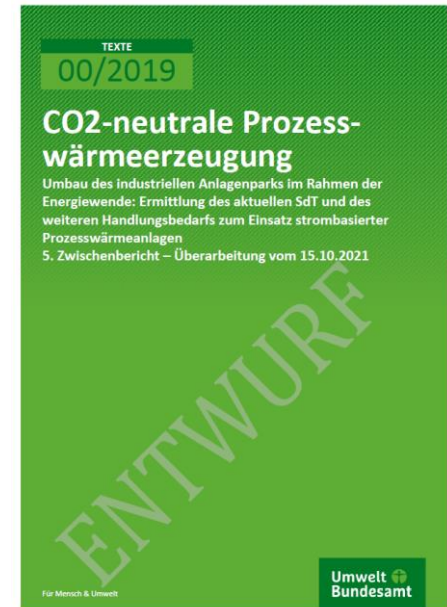


Falko Ueckerdt et al. (2021): *Durchstarten trotz Unsicherheiten: Eckpunkte einer anpassungsfähigen Wasserstoffstrategie. Wie die Politik Wasserstoffpfade hin zur Klimaneutralität 2045 finden kann. Ariadne-Kurzdossier.*

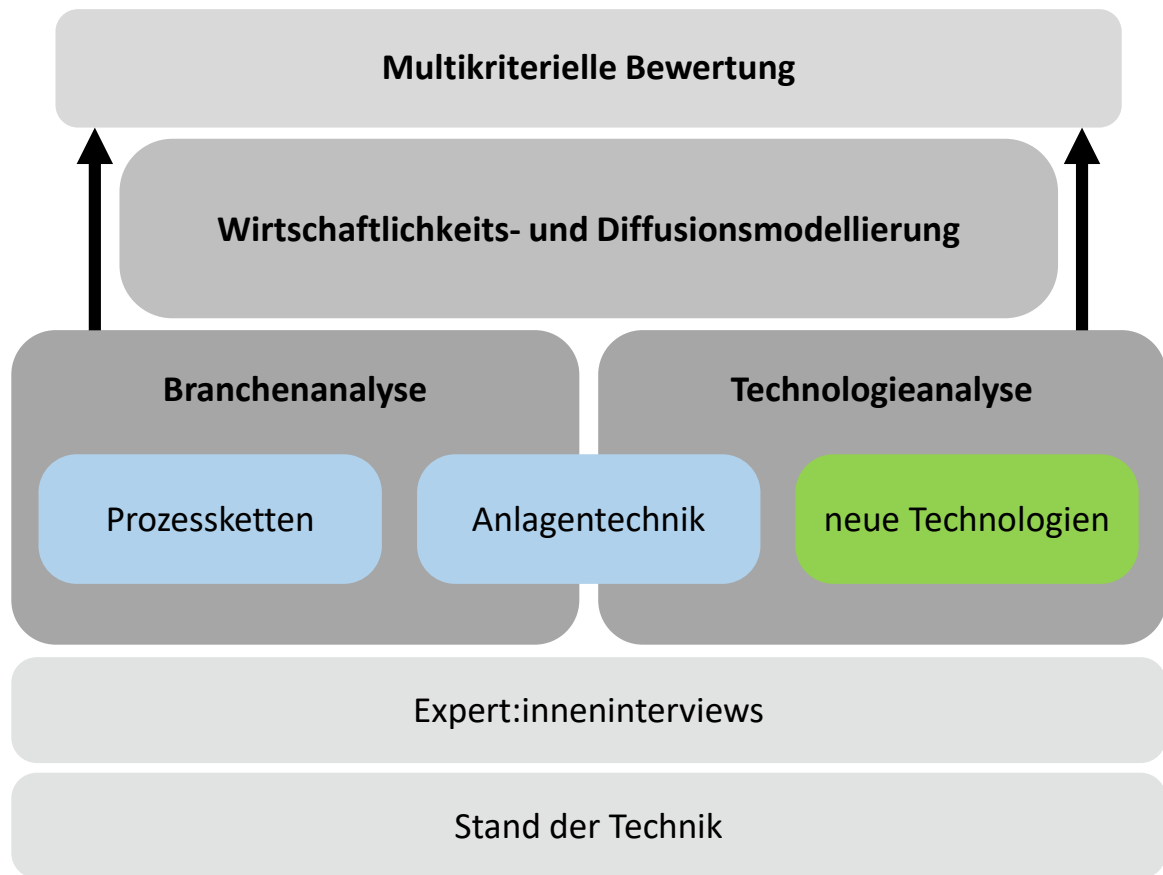
Zielsetzung der Studie

Hauptstudie (in Kürze veröffentlicht):

- Wissenslücke zur Rolle von H₂/Strom in der CO₂-neutralen Prozesswärme verkleinern
- Umstellung auf eine CO₂-neutral Prozesswärmeerzeugung bis 2050 anhand ausgewählter Branchen/Techniken untersuchen, mit den Schwerpunkten
 - Stand der Technik und F&E Bedarf
 - Wirtschaftlichkeit
 - Ganzheitlicher Vergleich: Technisch, wirtschaftlich, ökologisch
 - Gesamtbild und Elemente einer Strategie zur Transformation der Prozesswärmeerzeugung
- Hohe Übertragbarkeit und Gültigkeit der Schlussfolgerungen ermöglichen durch: Sehr breite und tiefe Betrachtung durch Auswahl von > 20 Anwendungen aus allen relevanten Branchen



Die arbeiten münden in 11 Thesen als Elemente einer Transformationsstrategie



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

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

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

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

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

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

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

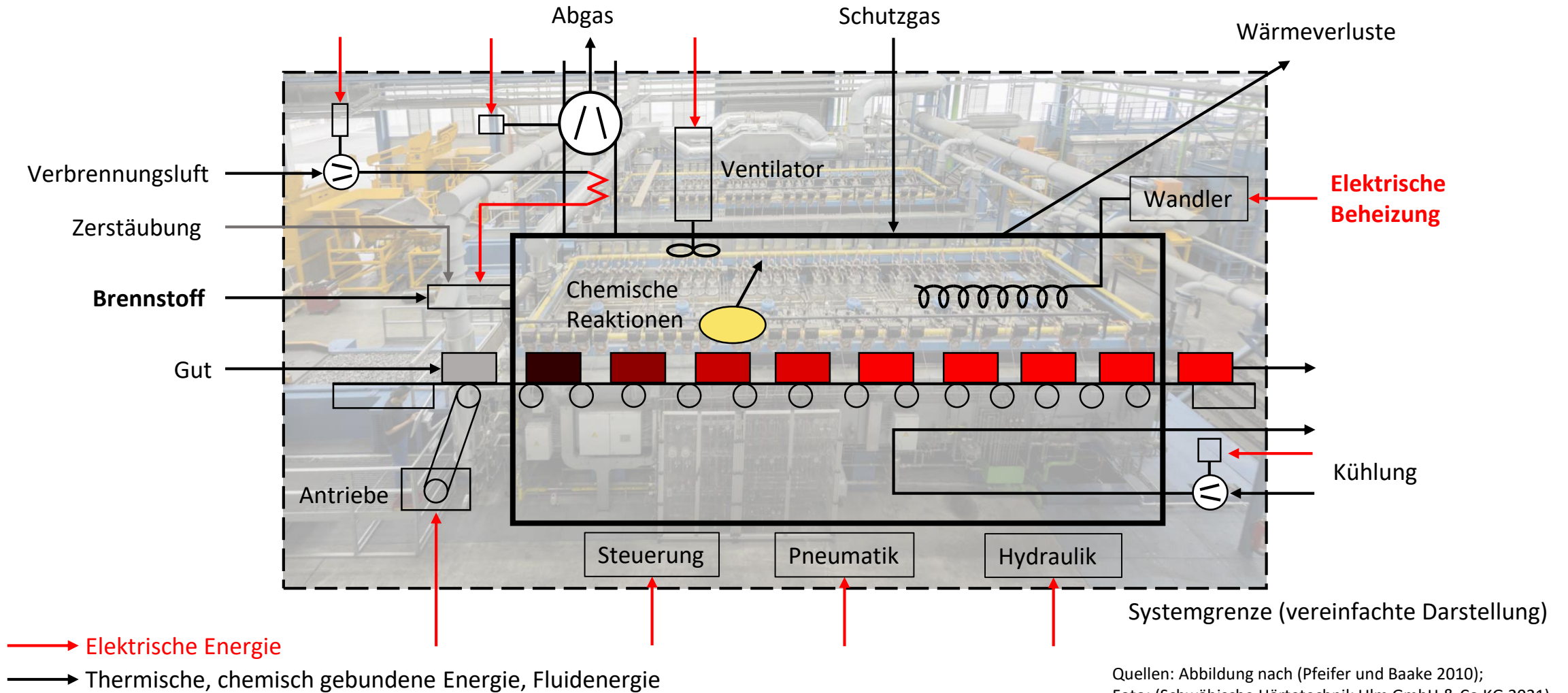
These 8: Die Umstellung auf CO₂-neutrale Techniken ist mit deutlich höheren **Energiekosten** verbunden.

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

These 10: **Hybride Anlagenkonzepte** können den Einstieg in die CO₂-neutrale Prozesswärme ermöglichen.

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

Besondere Herausforderung der Betrachtungen: Thermoprozessanlagen sind komplexe technische Systeme

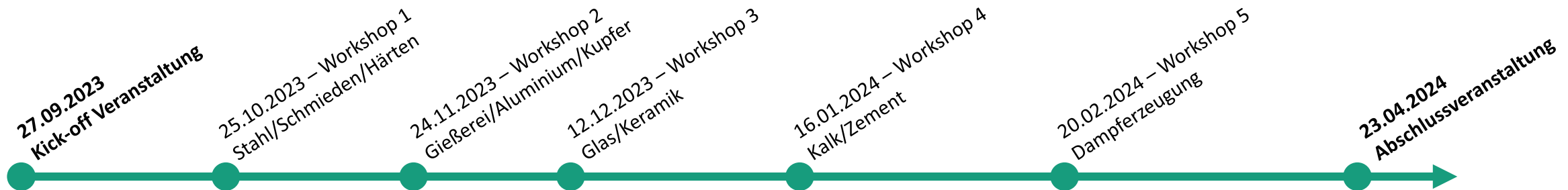


Quellen: Abbildung nach (Pfeifer und Baake 2010);
Foto: (Schwäbische Härtetechnik Ulm GmbH & Co KG 2021)

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

- 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.

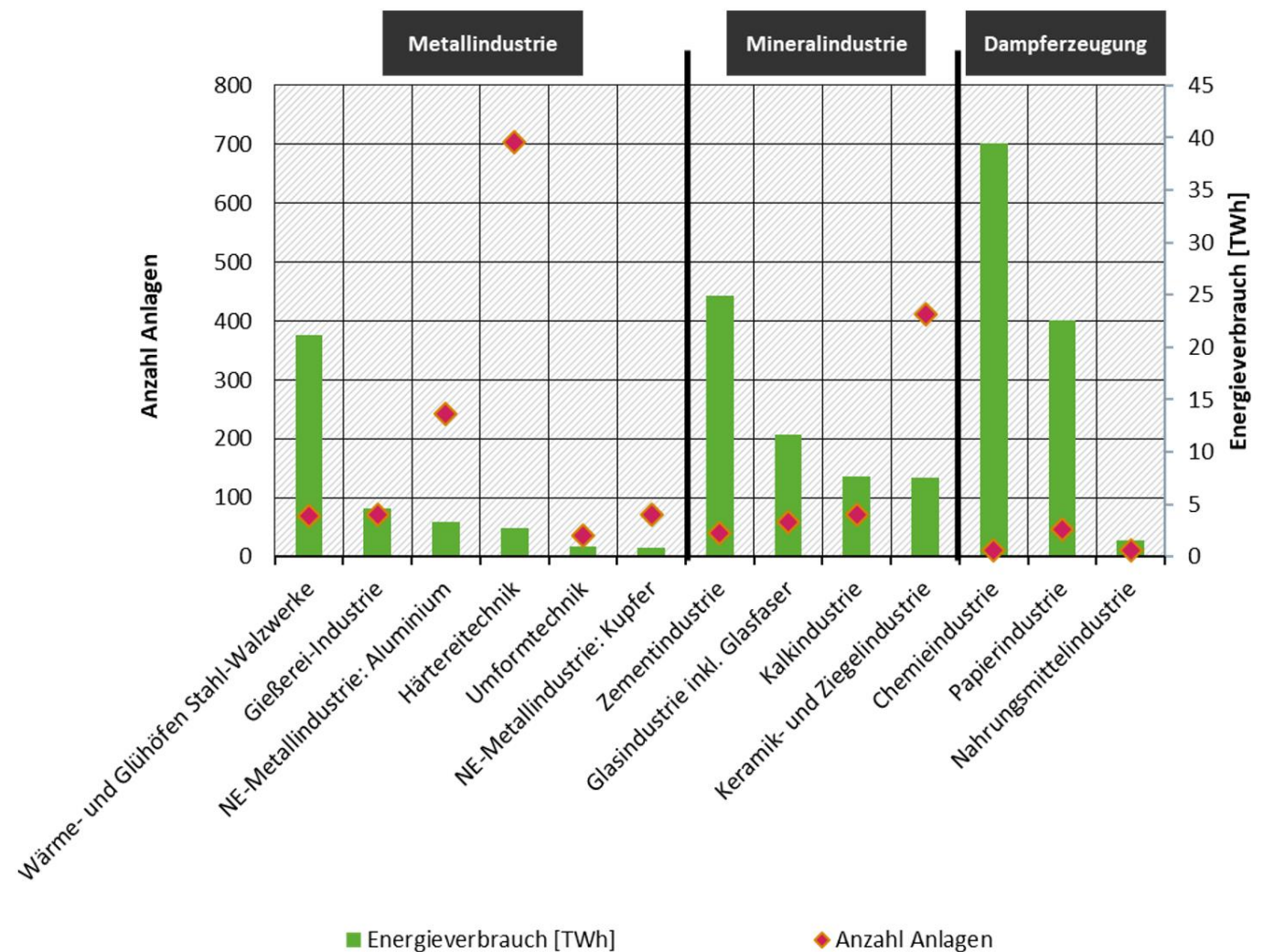
es finden keine Terminverschiebungen statt



Ergebnisse Teil I: Schlussfolgerungen der Studie als 11 Elemente einer Transformationsstrategie

Betrachtungsrahmen der Studie: Anzahl Anlagen und Energieverbrauch je Branche

- Die betrachteten Anwendungen lassen sich auf diese Anzahl Anlagen im Bestand der 13 Branchen hochrechnen
- Insgesamt fallen etwa 1300 Anlagen in den Untersuchungsrahmen der Studie
- Die betrachteten Anwendungen haben eine hohe Relevanz und decken mit etwa 140 TWh ca. 32 % des Brennstoffbedarfs der gesamten Industrie im Jahr 2018 ab
- Stark unterschiedliche Bedeutung und Struktur in den einzelnen Branchen
- Techniken außerhalb des Untersuchungsrahmens sind nicht aufgeführt, weshalb die vollständigen Branchenwerte höher liegen.



Die untersuchten Anwendungen zeigen eine hohe Abdeckung und Übertragbarkeit

Sektor	Branche	Anteil am Energieverbrauch
Metalle	Wärme- und Glühöfen Stahl	97 %
	Gießerei-Industrie	97 - 98 %
	NE-Metallindustrie Aluminium	97 %
	NE-Metallindustrie Kupfer	76 - 81 %
	Umformtechnik	96 %
	Härtereitechnik	81 - 93 %
Mineralien	Glasindustrie (inkl. Glasfaser)	77 - 80 %
	Kalkindustrie	73 - 78 %
	Zementindustrie	> 99 %
	Keramik und Ziegelindustrie	89 %
Dampf	Nahrungsmittel (nur Milchpulver)	4%
	Papier	71%
	Chemische Industrie	46%

- In den untersuchten Branchen decken die ausgewählten Anwendungen 46-99% des Energieverbrauchs ab (Ausnahme Nahrungsmittel)
- Nicht betrachtet wurden ausgewählte Primärprozesse:
 - Rohstahlherstellung über Hochofen oder Elektrolichtbogenofen
 - Herstellung von Primäraluminium (Elektrolyse)
 - Öfen in der Grundstoffchemie
- Abgesehen von diesen Prozessen gibt es eine hohe Übertragbarkeit der Ergebnisse auf die gesamte Industrie

Kernergebnisse bieten Orientierung in der Transformation: 11 Thesen zur Transformation der Prozesswärme

Technik

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

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

These 3: Eine Elektrifizierung verlangt einen **umfassenderen Umbau** des Anlagenparks als der Einsatz von Wasserstoff oder synthetischem Methan.

These 4: Bei Elektrifizierung und Wasserstoffeinsatz sind Forschung, **Entwicklung und Demonstration** notwendig.

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.

Markt und
Wirtschaft

Zentrale Elemente einer Transformationsstrategie

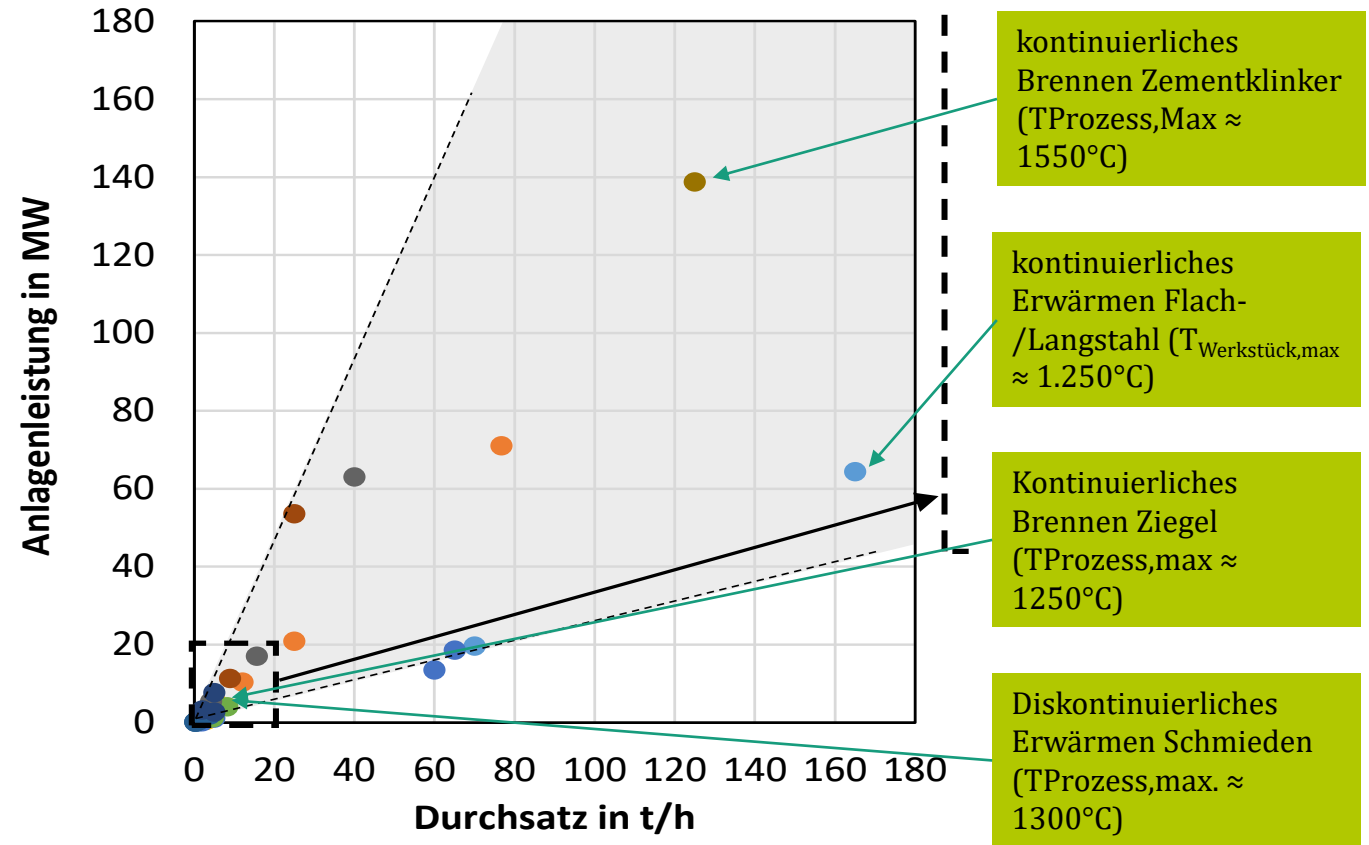
Technik

1. Eine Gesamtstrategie muss unter Berücksichtigung der **branchenspezifischen Charakteristika der Produktionsprozesse** entwickelt werden.
2. Die Transformationsstrategie sollte an einer klaren **Zielvorgabe zur CO₂-neutralen Industrieproduktion** bis zum Jahr 2045 ausgerichtet werden.
3. Transformationsstrategie mit einer **Modernisierung des Anlagenparks** verbinden.
4. **Technologische Entwicklung und Markteinführung** über Pilot- und Demoanlagen fördern.
5. **Elektrifizierung** priorisieren ggü. PtG.
6. **Wasserstoff fokussieren wo vorteilhaft** ggü. Elektrifizierung.
7. **Investitionsförderung** ist ein Baustein der Transformationsstrategie, aber **nicht ausreichend**.
8. **Marktrahmen reformieren**, um wirtschaftlichen Betrieb von CO₂-neutraler Techniken zu ermöglichen (ETS, CCfDs, Energiesteuern- und Abgaben).
9. Marktrahmen **frühzeitig** anpassen um stranded assets zu vermeiden und Investitionen zu ermöglichen.
10. Förderung von **hybriden Anlagenkonzepten** als Strategie für flexible und resiliente Industrieproduktion.
11. **Ganzheitliche Transformation** hin zu einer sauberen und nachhaltigen Industrieproduktion kommunizieren.

Markt und
Wirtschaft

(1) Der Anlagenpark der Industrieöfen ist heterogen

- Hohe Bandbreite:
 - **Anlagendurchsatz** <1-160 tProdukt/h
 - **Anlagenleistung** <0,1-17 MW
 - **Energiebedarf** <0,1-2,2 MWh/tProdukt
 - **Prozesstemperatur** <100-1600°C
 - **Betriebsweise** kontinuierlich / diskontinuierlich
 - Grad der **Integration** in den Prozess
 - ...



-> Eine Gesamtstrategie muss unter Berücksichtigung der branchenspezifischen Charakteristika der Produktionsprozesse entwickelt werden.

(2) Die Umstellung auf eine THG-neutrale Prozesswärmeerzeugung ist bis 2045 technisch realisierbar

■ Technische Machbarkeit:

- Für alle betrachteten Anwendungen sind CO₂-neutrale Alternativtechniken in der Entwicklung – mit unterschiedlichem Technologiereifegrad
- Herausforderung ist Hochskalierung auf industrielles Niveau

■ Zeitliche Umsetzung

- Lange Lebensdauern und Modernisierungszyklen der Anlagen verlangen im Zeitraum 2030-2045 auch vorgezogene Anlagenaustausch

-> Die Transformationsstrategie sollte an einer klaren Zielvorgabe zur CO₂-neutralen Industrieproduktion bis zum Jahr 2045 ausgerichtet werden.

	Technologiereifegrad - Technology Readiness Level (TRL)		
	Strom	Wasserstoff	EE-Methan
Metallindustrie	9 (17 Anwendungen)	<4 bis <5	9 (gasbeheizte Anwendungen) <8 (Kupolofen)
Mineralische Industrie	<2 bis <4 9 (Kleinanlagen Glas)	<2 bis <5	9 (gasbeheizte Anwendungen) <4 (Schachtofen)
Dampf- erzeugung	9 (Elektrodenkessel) 5-8 (HT-Wärmepumpen)	9	9 (gasbeheizte Anwendungen)

Ergebnisse Teil II: Vertiefung Technik

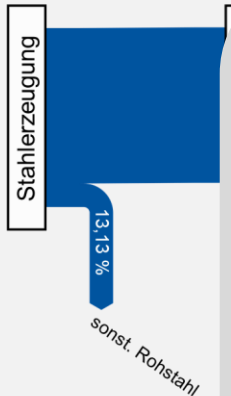
Branchen im Fokus der Studie

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	

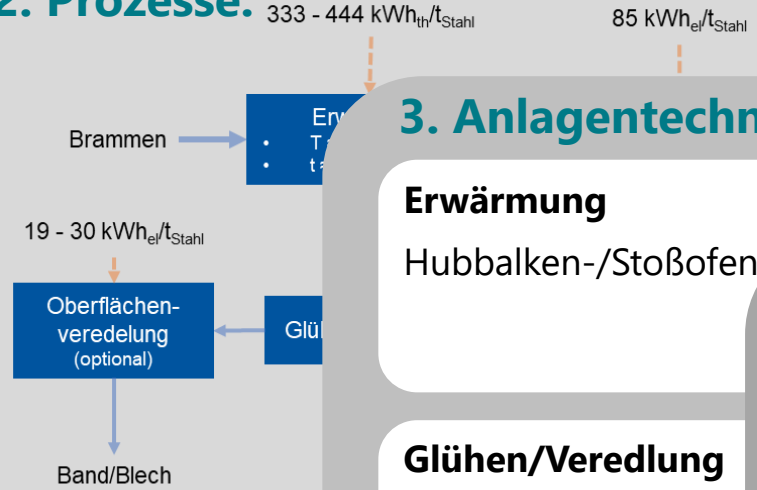
4-schrittiger Lösungsansatz der Branchen- und Technologieanalyse zur Identifizierung der für die Studie relevanten Anlagentechnik

1. Produkte:

Rohstahlerzeugung in 2016: 42,88 Mrd. kWh



2. Prozesse:

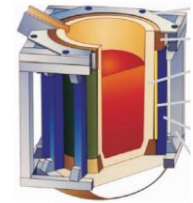


3. Anlagentechnik (Stand der Technik):

- 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, ...

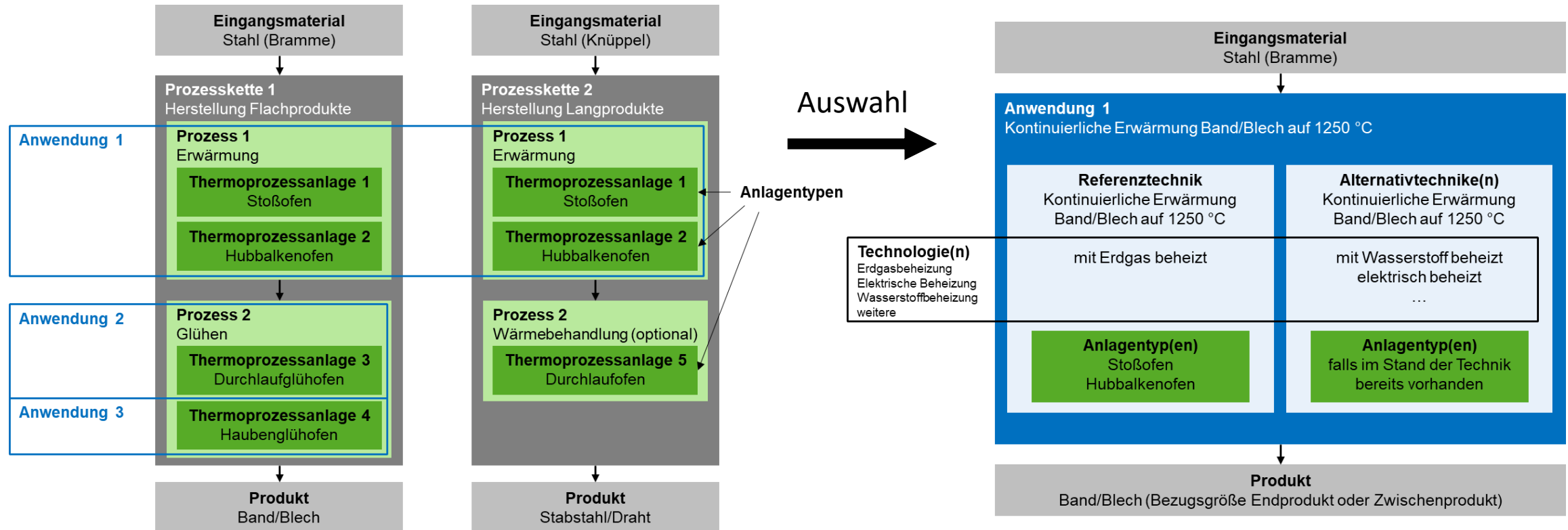


Es stehen im Rahmen der **Technologieanalyse** insbesondere PtH und PtG als **Alternativtechnologien** im Fokus

Betrachtete Technologien:

- konventionell
 - **Erdgas**
 - Kuppelgase
 - **Kohle**
 - **Koks**
 - Öl
 - **Reststoffe**
- Power-to-Heat
 - **Direkte Verfahren**
 - **induktiv**
 - **konduktiv**
 - **dielektrisch (Mikrowelle)**
 - **Indirekte Verfahren**
 - **Widerstandserwärmung**
 - **Lichtbogen**
 - **Plasma**
- **Hybride Verfahren**
- Wärmepumpen
- PtG/PtL
 - **Wasserstoff**
 - Synthesegase
 - Ammoniak
 - **Biogene Energieträger**
 - **fest**
 - **gasförmig**
 - **flüssig**

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



Vorgehen - Analyse der Prozessketten und Produkte: Exemplarische Prozesskette für die Glasherstellung (vereinfacht)

Rohstoffe, Recyclingglas

Gemengebereitung

Schmelzen^[1]

- U-Flammenwanne regenerativ (Behälterglas)
- Querbrennerwanne regenerativ (Flachglas, Behälterglas)
- Querbrennerwanne rekuperativ (Glasfaser), Kupolofen (Steinwolle)

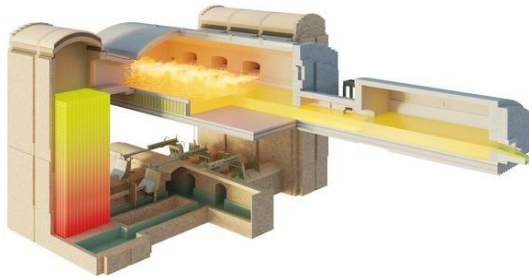
Formgebung

Entspannen

Verpacken

Flachglas, Behälterglas, Spezialglas,
Glasfaser, Steinwolle

Bsp. U-Flammenwanne mit
regenerativer Luftvorwärmung



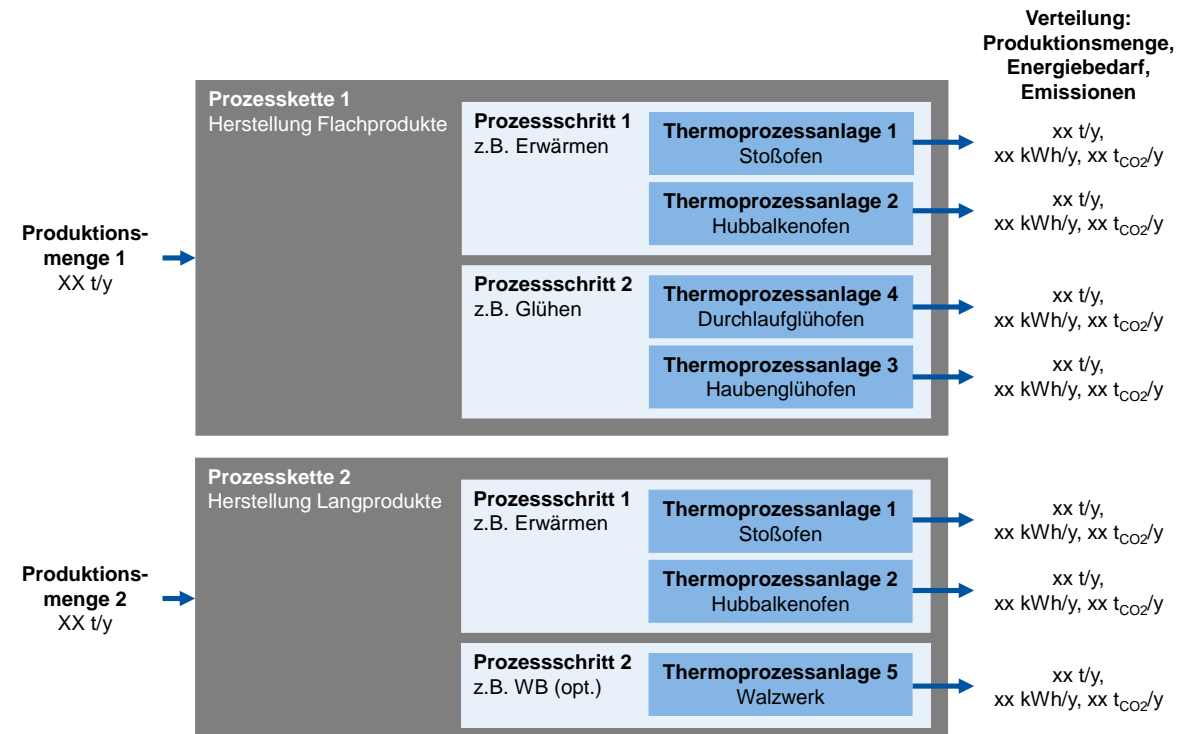
Quelle: (Horn Glass Industries AG 2020)

th. = thermisch; el. = elektrisch

Quellen: eigene Darstellung nach Fleiter, T.; Schlomann, B.; Eichhammer, W. (Hrsg.): Energieverbrauch und CO₂-Emissionen industrieller Prozesstechnologien - Einsparpotenziale, Hemmnisse und Instrumente, Stuttgart, Fraunhofer-Verlag, 2013.

Die **Auswahl der Anwendungen** und Referenztechniken erfolgt anhand von Energieverbrauch und CO₂-Emissionen und Relevanz

- 1. Impact auf das Potential zur CO₂-Reduktion
 - jährliche Produktionsmenge, Energieträger, Verteilung im Anlagenpark
- 2. Relevanz für die Branche
 - Anzahl Anlagen, technische Notwendigkeit
- Datenbasis
 - nationaler und internationaler Stand der Technik
 - Expert:inneninterviews



Auswahl der Anwendungen und Referenztechniken anhand von Energieverbrauch und CO₂-Emissionen (hier Bsp. Glasindustrie)

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

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

1) Es wird die Produktionsmenge von geschmolzenem Glas angegeben. Sie wird auf Grundlage der verkaufsfähigen Menge Glas abgeschätzt, die etwa 90 % der geschmolzenen Tonnage entspricht.

2) Die prozessbedingten CO₂-Emissionen betragen in der Behälterglasindustrie 81 kg CO₂/t_{Glas} (ca.25 % der gesamten CO₂-Emissionen) und in der Flachglasindustrie 187 kg CO₂/t_{Glas} (ca. 30 % der gesamten CO₂-Emissionen)

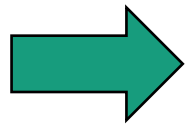
3) Es wird nur der Hauptenergieträger betrachtet. Für die Berechnung der CO₂-Emissionen führt das zu einer geringeren Bewertung der energiebedingten CO₂-Emissionen für erdgasbeheizte Anlagen, da der Anteil der elektrischen Energie durch eine EZH nicht berücksichtigt wird. Gleichzeitig bedeutet es, dass die durch die Verbrennung von Erdgas verursachten CO₂-Emissionen geringfügig kleiner ausfallen.

Quellen: (Bundesverband Glasindustrie e. V. 2020), (Expert:inneninterview 2020y), (Gitzhofer 2007; Umweltbundesamt (UBA) 2020; VDI 2578)

Im Fokus stehen fossil beheizten Anlagentypen mit dem Ziel einer breiten **Branchenabdeckung** durch die betrachteten Anlagentypen

Abschätzung zum Anteil der im Rahmen der Studie betrachteten Anwendungen am jährlichen Energieverbrauch und den energiebedingten CO₂-Emissionen der fossil beheizten Anlagentypen in Deutschland

Branche	jährlicher Energieverbrauch	CO ₂ -Emissionen (energiebedingt)
Wärme- und Glühöfen Stahl	97 %	97 %
Gießerei-Industrie	97 - 98 %	98 %
NE-Metallindustrie Aluminium	97 %	97 %
NE-Metallindustrie Kupfer	76 - 81 %	76 - 81 %
Umformtechnik	96 %	96 %
Härtereitechnik	81 - 93 %	71 - 89 %
Glasindustrie (inkl. Glasfaser)	77 - 80 %	73 - 77 %
Kalkindustrie	73 - 78 %	71 - 75 %
Zementindustrie	> 99 %	> 99 %
Keramik und Ziegelindustrie	89 %	89 %



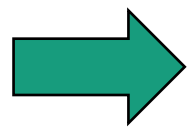
Anteil der betrachteten Anlagentypen an Energieverbrauch und CO₂-Emissionen > **70 %** je Branche

Vorgehen - Definition von Anwendung, Referenz- und Alternativtechnik zur weiteren Betrachtung (hier Bsp. Glasindustrie)

U-Flammenwanne mit regenerativer Luftvorwärmung



Quelle: (Horn Glass Industries AG 2020)



Definition von **31 Referenztechniken als Technikbeispiele** zur weiteren ökonomischen Betrachtung

Anwendung	
Definition	Kontinuierlicher Schmelzofen Behälterglas mit Erdgasbeheizung
Anwendung	Kontinuierliches Schmelzen Behälterglas ($\dot{m} < 500 \text{ t/d}$, $T_{\text{Prozess}} \approx 1.550 \text{ °C}$)
Thermoprozessanlage(n)	U-Flammenwanne regenerativ

Technik und Technologie	
Referenztechnik	<i>Kontinuierlicher Schmelzofen Behälterglas mit Erdgasbeheizung</i>
Alternative Beheizungstechnologie(n)	Elektrische Widerstandsbeheizung (100 % Strom) Wasserstoffbeheizung (100 % H ₂) Hybride Beheizung ($\leq 80 \text{ % Strom}$, Rest Erdgas (EE-Methan)) Hybride Beheizung ($\leq 80 \text{ % Strom}$, H ₂)
Alternativtechnik(n)	Kontinuierlicher Schmelzofen Behälterglas mit elektr. Widerstandsbeheizung Kontinuierlicher Schmelzofen Behälterglas mit Wasserstoffbeheizung Konti. Schmelzofen Flachglas mit hybrider Beheizung (Strom/Erdgas) Konti. Schmelzofen Flachglas mit hybrider Beheizung (Strom/H ₂)

Zentraler Bestandteil der Branchen- und Technologieanalyse: **Erhebung von Kenndaten** (hier Bsp. kontinuierliches Schmelzen Behälterglas)

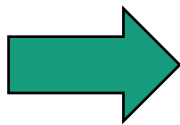
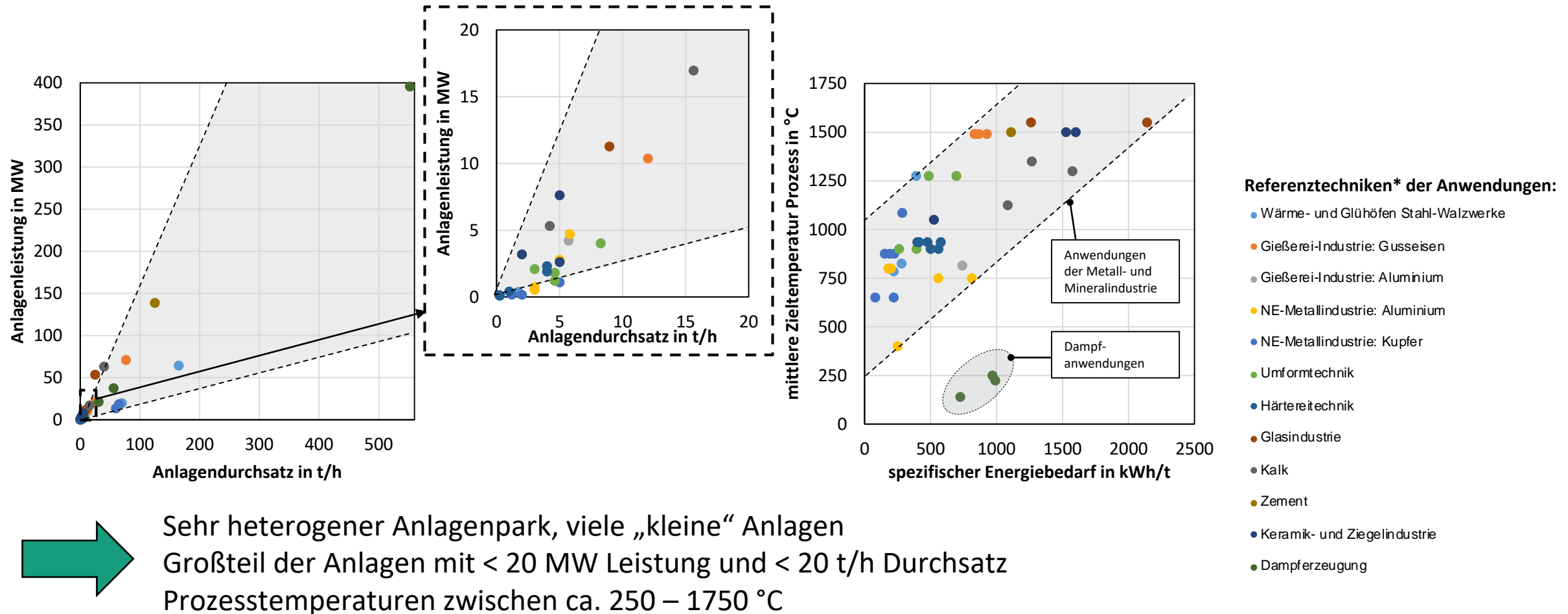
Technik	Referenztechnik	Alternativtechnik 1	Alternativtechnik 2	Alternativtechnik 3	Alternativtechnik 4	Einheit	Quellen
Beheizungstechnologie	Erdgasbeheizung (inkl. EZH) ^{a)}	Elektrifizierung ^{b)}	Wasserstoffbeheizung	Hybride Beheizung (Strom/Erdgas (EE-Methan))	Hybride Beheizung (Strom/- Wasserstoff)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

Annahmen, Legende und Quellen siehe Bericht

Abschluss der Branchen- und Technologieanalyse mit der Definition eines **Zwischenergebnisses je Branche** (hier Bsp. Glasindustrie)

	Betrachtete Anwendungen und Thermoprozessanlagen	
	Kontinuierliches Schmelzen Behälterglas ($\dot{m} < 500 \text{ t/d}$, $T_{\text{Prozess}} \approx 1550 \text{ °C}$) U-Flammenwanne Regenerativ	Kontinuierliches Schmelzen Flachglas ($\dot{m} > 500 \text{ t/d}$, $T_{\text{Prozess}} \approx 1600 \text{ °C}$) Querbrennerwanne Regenerativ
Technisches Gesamtpotential für den Anlagenpark in Deutschland	Stand der Technik: ca. 47 Anlagen, Durchsatz: 8 – 9 t/h Erdgasbeheizung 100 % (inkl. EZH) (bis zu 10 % Stromanteil) prozessbedingte Emissionen: 81 kg CO ₂ /t _{Glas} (20 - 28 %) Alternativtechnologien: (Teil-)Elektrifizierung, Wasserstoffbeheizung	Stand der Technik: ca. 12 Anlagen, Durchsatz: 22 – 25 t/h Erdgasbeheizung 100 % (inkl. EZH) (bis zu 5 % Stromanteil) prozessbedingte Emissionen: 187 kg CO ₂ /t _{Glas} (30 - 38 %) Alternativtechnologien: (Teil-)Elektrifizierung, Wasserstoffbeheizung
F&E-Bedarf	Elektrifizierung (widerstandsbeheizt): TRL = 9 (Stand der Technik für Anlagen bis 100 t/d) TRL < 4 für Anlagen 100 - 300 t/d Labor-, Demonstrations-, und Betriebserfahrung zur Erprobung neuer Wannenkonzepte und Vergrößerung der Kapazitäten notwendig Teilelektrifizierung: (Stromanteil 60 - 80 %, Rest Erdgas): TRL < 7 Prototyp in Einsatzumgebung erprobt, weitere Entwicklung im Demonstrations- (Upscaling) und industriellen Maßstab notwendig Wasserstoffbeheizung: TRL < 4, Labor-, Demonstrations-, und Betriebserfahrung notwendig, Beimischung von H ₂ technisch realisierbar, Nutzung von reinem H ₂ zu überprüfen Für die hybriden Beheizungstechnologien ist das niedriger TRL maßgeblich.	Elektrifizierung (widerstandsbeheizt): TRL < 3 (Anlagen > 500 t/d) Funktionstüchtigkeit für die notwendigen Tagestonnagen bisher nicht gegeben, grundlegende Technologieentwicklung notwendig Teilelektrifizierung: (Stromanteil 60 - 80 %): TRL < 4 Funktionstüchtigkeit für die notwendigen Tagestonnagen in der Theorie nachgewiesen, Erprobung im Demonstrations- und industriellen Maßstab notwendig Wasserstoffbeheizung: TRL < 4, Labor-, Demonstrations-, und Betriebserfahrung notwendig, Beimischung von H ₂ technisch realisierbar, Nutzung von reinem H ₂ zu überprüfen Für die hybriden Beheizungstechnologien ist das niedriger TRL maßgeblich.
Endenergiebedarf Summe für alle Anlagen der betrachteten Anwendung (ohne Berücksichtigung des Energiebedarfs von Vorketten für die Energieerzeugung)	Gesamtenergiebedarf aktuell: ca. 4.240 GWh/a Erdgas und EZH, Produktionsmenge ca. 3.370 Tsd. t/a zukünftig (100%): H ₂ : keine Veränderung erwartet Elektrisch: Verringerung um ca. 40 % bei Vollelektrifizierung Potential zur Flexibilisierung: < 1 % d. Gesamtenergiebedarfs	Gesamtenergiebedarf aktuell: ca. 5.230 GWh/a Erdgas und EZH, Produktionsmenge ca. 2.440 Tsd. t/a zukünftig (100%): H ₂ : keine Veränderung erwartet Elektrisch: Verringerung um ca. 40 % bei Vollelektrifizierung Potential zur Flexibilisierung: nicht quantifizierbar
Abwärmeentstehung Mittelwerte für Einzelanlagen (exemplarisch)	Erdgasbeheizung: > 10 m ³ _{Abgas} /m ³ _{Erdgas} je nach Luftzahl, T ≈ 400 – 800 °C (Teil-)Elektrifizierung: leichte Verringerung erwartet Wasserstoffbeheizung: keine Veränderung erwartet	Erdgasbeheizung: > 10 m ³ _{Abgas} /m ³ _{Erdgas} je nach Luftzahl, T ≈ 400 – 800 °C (Teil-)Elektrifizierung: leichte Verringerung erwartet Wasserstoffbeheizung: keine Veränderung erwartet

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.

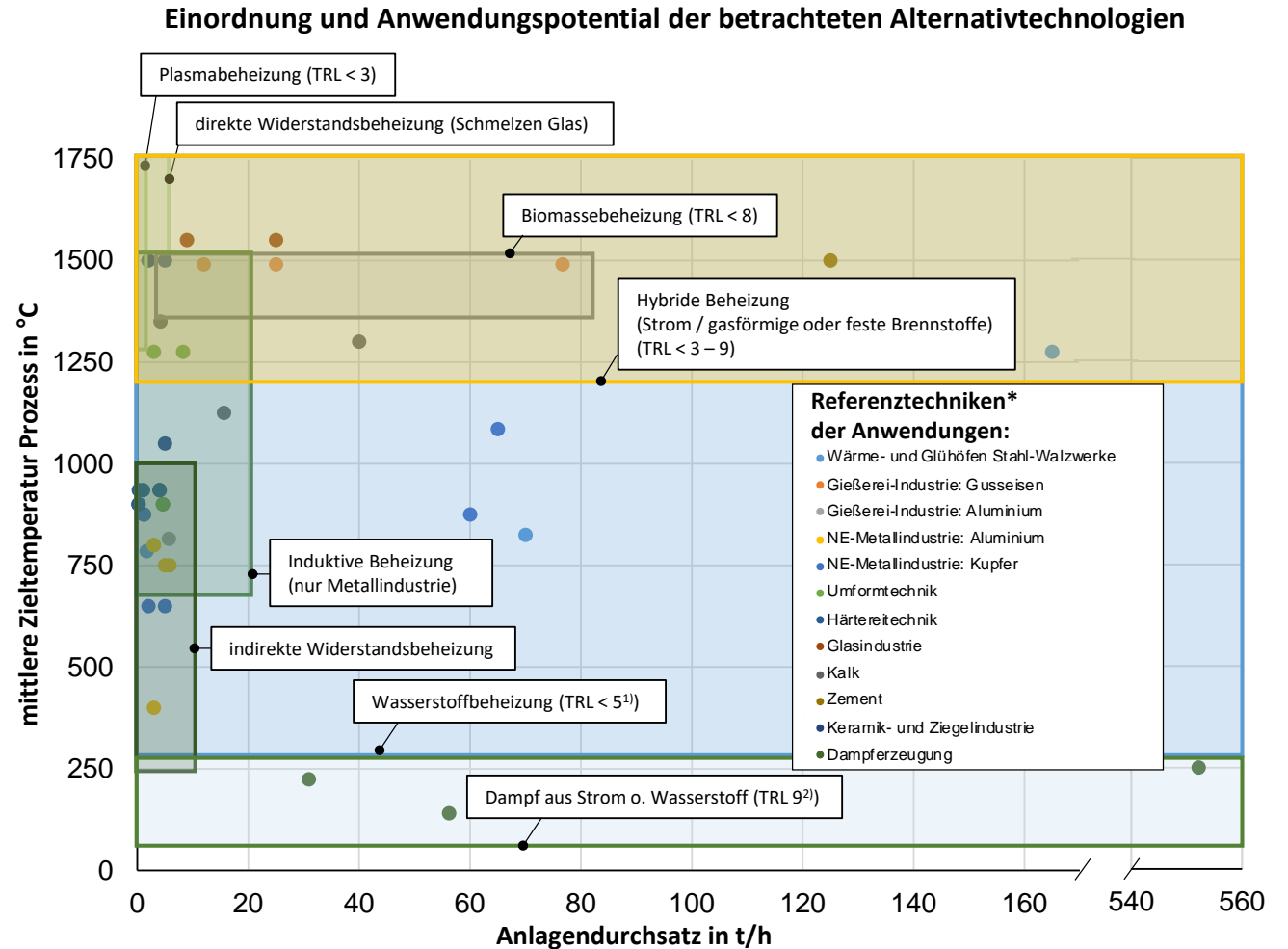
„n.b.“: Anwendung wurde nicht betrachtet. Das TRL der Technologiekombination wird gleich oder geringer als das der Technologie mit jeweils geringeren TRL eingeschätzt.

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	< 4	< 4	4/9 ¹⁾	< 3	< 3	< 3	< 3	< 3	< 2	< 2	< 2	9 ⁷⁾	
	Wasserstoffbeheizung	< 4	< 5	< 5	< 5	< 4	< 5	< 4	< 5	< 4	< 4	< 4	< 4	< 5	< 5	< 4	< 2	9	
	Biomassebeheizung	n.v.	n.v.	n.v.	< 8 ²⁾	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	< 6 ²⁾	n.b.	n.v.	n.v.	n.v.	< 4 ²⁾	9 ⁸⁾
	Erdgas-/EE-Methanbeheizung	(9)	(9)	(9)	< 8 ³⁾	(9)	(9)	(9)	(9)	(9)	(9)	(9)	< 4	n.b.	(9)	(9)	(9)	n.v.	n.v.
	hybride Beheizung (Strom/Erdgas (EE-Methan))	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	< 7 ⁴⁾	< 4 ⁴⁾	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	9	< 3 ⁵⁾	n.v.	n.v.
	hybride Beheizung (Strom/Wasserstoff)	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	< 4 ⁴⁾	< 4 ⁴⁾	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	< 5	< 3 ⁵⁾	n.b.	n.v.
	Hybride Beheizung (Brennstoffmix/Strom)	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	< 5 ⁶⁾	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
	Hybride Beheizung (Biomasse/H ₂ /Strom)	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	< 4 ⁶⁾	n.v.	n.v.	n.v.	n.b.	n.v.

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

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



Zwischenfazit

- Technisches Potential für den Einsatz elektrischer Konzepte als auch Wasserstoff hoch.
- Für viele Anwendungen existieren nach dem SdT elektrische Anlagen mit einer hohen Energieeffizienz.
- Die Elektrifizierung ist aber insbesondere für Prozesse mit hohen Temperaturen und Energiedichten eine Herausforderung.
- Wasserstoff stellt eine Option für viele konventionell gasbeheizte Anlagen und Prozesse dar.
- Hybride Systeme können Lücken schließen.
- Neue Technologien verändern das Gesamtsystem (bspw. Abwärmenutzung).

Ergebnisse Teil III: Vertiefung Wirtschaftlichkeit und Diffusion

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

- CO₂-neutrale Techniken haben im Vergleich zum Neubau der Referenz nur **geringfügig höhere Investitionen**
- Die **Mehrinvestitionen ggü. Modernisierung** der Referenz liegen in der Größenordnung von **15-25 Mrd. Euro**
- Bei Wasserstoff können die Investitionen niedriger liegen, da häufig eine Modernisierung/Nachrüstung möglich ist
- Der Investitionsbedarf unterscheidet sich deutlich zwischen den Branchen

-> Investitionsförderung ist ein Baustein der Transformationsstrategie, aber nicht ausreichend.

Investitionsbedarf für eine vollständige Umstellung der untersuchten Anwendungen (ohne Infrastruktur wie z.B. Netzanschluss)

Branche	Gesamtinvestition [MEUR]			
	Modernisierung Referenz	Neubau Referenz	Neubau Elektrifizierung	Neubau Wasserstoff
Dampfersorgung Chemieparcs	871	1,341	3,048	344
Gießerei-Industrie	103	483	248	518
Glasindustrie inkl. Glasfaser	885	1,327	1,062	1,327
Härtereitechnik	103	1,736	1,546	1,736
Kalkindustrie	195	610	610	610
Keramik- und Ziegelindustrie	1,791	3,570	3,570	3,570
Milchpulverherstellung	56	86	205	17
NE-Metallindustrie: Aluminium	43	286	264	177
NE-Metallindustrie: Kupfer	148	392	410	392
Papierherstellung (Trockenpartie)	747	1,150	1,777	1,181
Umformtechnik	15	59	56	61
Wärme- und Glühöfen Stahl-Walzwerke	1,399	12,463	10,638	12,463
Zementindustrie	1,942	3,110	9,108	3,110
SUMME	8,297	26,611	32,541	25,504

These 8: Die Umstellung auf CO₂-neutrale Techniken ist mit deutlich höheren Energiekosten verbunden

- Unter den genannten Annahmen (siehe rechts) liegen die **jährlichen Energie- und CO₂-Kosten** der Strom- oder Wasserstofftechniken im Mittel um den Faktor 2-3 höher als im Status-Quo
- Ein CO₂-Preis von 75 Euro/t CO₂ genügt nicht, um Wasserstoff oder Strom konkurrenzfähig zu machen
- Laufende Kosten hängen stark von den Energiepreisannahmen ab!

-> Marktrahmen reformieren, um wirtschaftlichen Betrieb von CO₂-neutraler Techniken zu ermöglichen (ETS, CCfDs, Energiesteuern- und Abgaben).

Jährliche Energie- und CO₂-Kosten bei vollständiger Umstellung der betrachteten Anwendungen

(CO₂: 75 €/t, Strom: 90€/MWh, Erdgas: 40€/MWh, H₂: 126 €/MWh)

Branche	Gesamtenergiekosten [MEUR]		
	Referenz	Elektrifizierung	Wasserstoff
Dampfversorgung Chemieparks	6,096	6,025	13,330
Gießerei-Industrie	361	537	971
Glasindustrie inkl. Glasfaser	1,603	1,889	4,500
Härtereitechnik	325	551	914
Kalkindustrie	888	1,745	2,493
Keramik- und Ziegelindustrie	941	1,758	2,643
Milchpulverherstellung	248	215	508
NE-Metallindustrie: Aluminium	382	565	1,072
NE-Metallindustrie: Kupfer	63	111	177
Papierherstellung (Trockenpartie)	3,579	5,220	9,892
Umformtechnik	61	98	170
Wärme- und Glühöfen Stahl-Walzwerke	2,890	5,243	8,116
Zementindustrie	4,377	9,472	12,302
SUMME	21,814	33,431	57,087

Die Lebensdauer von Anlagen schließt Gelegenheitsfenster (schnell)

#	Application	Lifetime	End of life	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050	2055	2060	2065	2070	2075
1	Milk powder production	20	2040	Green	Green	Green	Yellow	Orange							
2	Paper drying	20	2040	Green	Green	Green	Yellow	Orange							
3	Steam supply chemical park	20	2040	Green	Green	Green	Yellow	Orange							
4	Continuous heating flat/long steel	35	2055	Green	Green	Green	Yellow	Orange	Red	Red	Black				
5	Continuous heat treatment flat steel	35	2055	Green	Green	Green	Yellow	Orange	Red	Red	Black				
6	Discontinuous heat treatment flat steel	35	2055	Green	Green	Green	Yellow	Orange	Red	Red	Black				
7	Continuous melting cast iron (low capacity)	43	2063	Green	Green	Green	Yellow	Orange	Red	Red	Black	Black			
8	Continuous melting cast iron (medium capacity)	50	2070	Green	Green	Green	Yellow	Orange	Red	Red	Black	Black	Black		
9	Continuous melting cast iron (high capacity)	47	2067	Green	Green	Green	Yellow	Orange	Red	Red	Black	Black	Black		
10	Continuous melting aluminum	30	2050	Green	Green	Green	Yellow	Orange	Red	Red	Black				
11	Discontinuous melting/holding semi-finished casting aluminum	30	2050	Green	Green	Green	Yellow	Orange	Red	Red	Black				
12	Continuous homogenizing/heating aluminum strip/profiles	35	2055	Green	Green	Green	Yellow	Orange	Red	Red	Black				
13	Discontinuous homogenizing/heating aluminum strip/profiles	30	2050	Green	Green	Green	Yellow	Orange	Red	Red	Black				
14	Continuous heat treatment aluminum strip	30	2050	Green	Green	Green	Yellow	Orange	Red	Red	Black				
15	Continuous melting copper continuous cast wire rod	50	2070	Green	Green	Green	Yellow	Orange	Red	Red	Black	Black	Black		
16	Continuous heating semi-finished copper products for hot forming (low capacity)	20	2040	Green	Green	Green	Yellow	Orange							
17	Continuous heating copper semi-finished product for hot forming (high capacity)	48	2068	Green	Green	Green	Yellow	Orange	Red	Red	Black	Black	Black		
18	Discontinuous heat treatment copper semi-finished product (low capacity)	35	2055	Green	Green	Green	Yellow	Orange	Red	Red	Black	Black	Black		
19	Discontinuous heat treatment copper semi-finished product (high capacity)	35	2055	Green	Green	Green	Yellow	Orange	Red	Red	Black	Black	Black		
20	Continuous heating of forged components	30	2050	Green	Green	Green	Yellow	Orange	Red	Red	Black				
21	Discontinuous heating of forged components	30	2050	Green	Green	Green	Yellow	Orange	Red	Red	Black				
22	Continuous heating of steel sheet blanks	30	2050	Green	Green	Green	Yellow	Orange	Red	Red	Black				
23	Continuous carburizing (service provider)	13	2033	Green	Green	Green	Yellow								
24	Continuous carburizing (company store)	13	2033	Green	Green	Green	Yellow								
25	Discontinuous carburizing	13	2033	Green	Green	Green	Yellow								
26	Continuous melting container glass	15	2035	Green	Green	Green	Yellow								
27	Continuous melting flat glass	15	2035	Green	Green	Green	Yellow								
28	Continuous burning bricks	30	2050	Green	Green	Green	Yellow	Orange	Red	Red	Black				
29	Continuous burning refractory bricks	30	2050	Green	Green	Green	Yellow	Orange	Red	Red	Black				
30	Discontinuous burning refractory bricks	30	2050	Green	Green	Green	Yellow	Orange	Red	Red	Black				
31	Continuous burning (low reactivity)	60	2080	Green	Green	Green	Yellow	Orange	Red	Red	Black	Black	Black		
32	Continuous burning (medium/high reactivity)	45	2065	Green	Green	Green	Yellow	Orange	Red	Red	Black	Black	Black		
33	Continuous burning (high throughput)	50	2070	Green	Green	Green	Yellow	Orange	Red	Red	Black	Black	Black		
34	Continuous burning cement clinker	60	2080	Green	Green	Green	Yellow	Orange	Red	Red	Black	Black	Black	Black	

In 2020 ersetzte Anlagen werden nach 2045 zumeist noch betriebsbereit sein

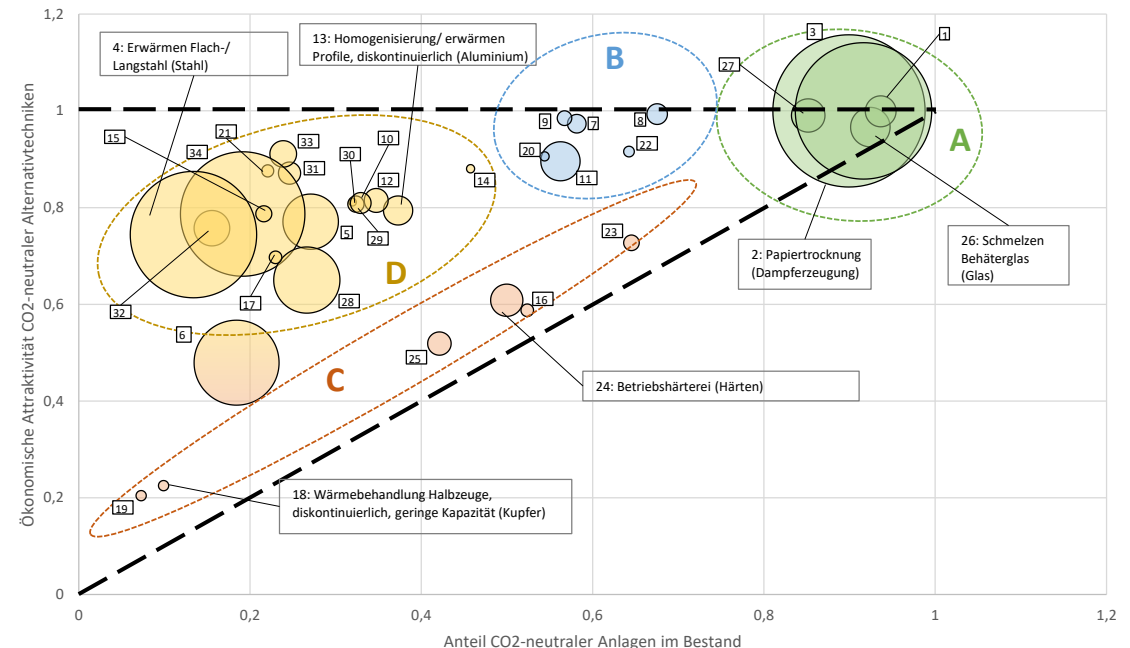
- Das betraf 92% der Anwendungen (nach Kapazität, ohne Dampf).
- Glas, Härtereien, einige Dampftechnologien sehen kürzere Lebensdauern

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

- **Lange Lebensdauern** und **Modernisierungszyklen** vieler Anwendungen verlangsamen den Transformationsprozess
- Heutige Rahmenbedingungen erlauben noch **keinen wirtschaftlichen Betrieb** CO₂-neutraler Anlagen
- Dadurch entsteht die Gefahr von **stranded investments**, wenn Anlagen vor dem eigentlichen Ende der Lebensdauer abgeschaltet werden müssen

-> **Marktrahmen frühzeitig anpassen um stranded assets zu vermeiden und Investitionen zu ermöglichen.**

Die **Diffusionsdynamiken** unterscheiden sich deutlich nach Anwendungen:



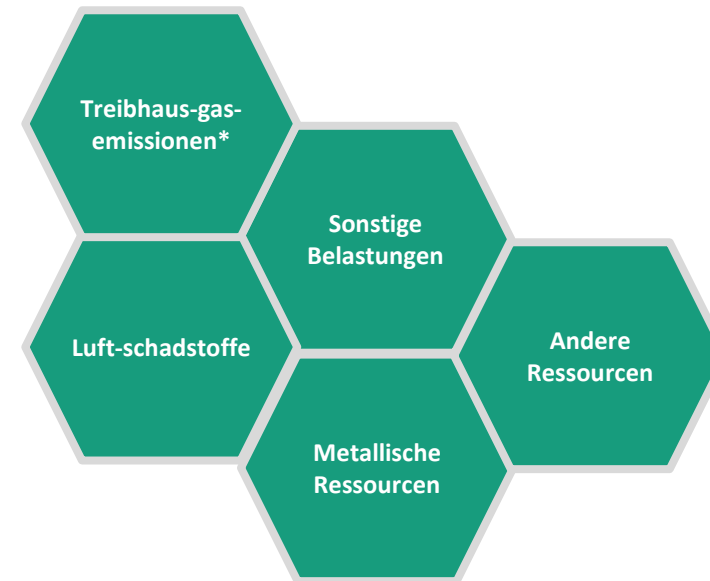
These 10: Hybride Anlagenkonzepte können den Einstieg in die CO₂-neutrale Prozesswärme ermöglichen

- **Hybride Konzepte** (Strom, H₂, Gas) als Schlüssel zu einer gelingenden Industrietransformation:
 - Einstieg in die Transformation durch Minderung von Unsicherheiten
 - Hohe Flexibilitätspotenziale in den Energiemärkten
 - Industrieproduktion wird resilienter ggü. Energiepreisschocks
- Beispiele Hybride Anlagenkonzepte:
 - Bestehende KWK mit Elektrodenkessel ergänzen
 - Dampfkessel mit Mehrfachbrenner
 - Neuinvestition in zusätzlichen elektrischen Ofen bei Erdgas-Bestand
 - Bestehende Öfen modernisieren auf Erdgas+H₂ Brenner
 - Teilelektrifizierung (z.B. Vorkalzinerung beim Klinkerbrennen)

-> Förderung von hybriden Anlagenkonzepten als Strategie für flexible und resiliente Industrieproduktion.

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

- Elektrifizierung **mindert Freisetzung von Luftschadstoffen** erheblich
- Berücksichtigte Aspekte der **Dimension Ökologie:**
- Durch den Einsatz der Alternativtechniken gegenüber den Referenztechniken werden langfristig infolge der Minderung von Luftschadstoffen/CO₂-Emissionen **Umweltkosten in einer Größenordnung von mehreren Mrd. Euro / Jahr vermieden**
- Die untersuchten Techniken weisen keine besonders kritischen Aspekte wie z.B. Bedarf an **seltenen Ressourcen** oder **sonstige Belastungen** auf



Ökologie

-> Ganzheitliche Transformation hin zu einer sauberen und nachhaltigen Industrieproduktion kommunizieren.

Methodik der Veranstaltungsreihe

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

Diskussion der Methodik

Leitfragen für die Diskussion

- Hier soll das Konzept der Veranstaltung mit dem Publikum abgestimmt werden und ggf. angepasst werden.
- Zentrale Fragen:
 - Was sind Ihre Vorstellungen/Erwartungen und Wünsche an die Veranstaltungsreihe?
 - Welche Themen/Rubriken sollen in die Methodik der Workshops mit aufgenommen werden?
 - Sonstige Anregungen.

Diskussion der Methodik am miro board

siehe auch Link im Chat

Ergebnisse

Welche Wünsche haben Sie für die Veranstaltung?

- Ich wünsche mir Anregungen für die Umstellung unserer Erzeugnisse... Welche technischen Lösungen gibt es? Wo bekommt man Unterstützung? Wie rechnet sich das wirtschaftlich... als Investition und die Anwendungsphase?
- 16
- Ansätze zur Findung der fehlenden Wasserstoffmengen für die mögliche Umstellung
- Lösungen zur Umstellung von erdgasbetriebenen Durchlaufglühöfen auf Strom oder Wasserstoff (Anlagentechnologie)
- Abgasnachbehandlung - derzeit/in Zukunft? Thermisch, Biologisch?
- konkrete Beispiele elektroprozesstechnischer Umrüstungen, betriebswirtschaftliche Szenarien einbeziehen, Eintrag und Austausch mit Verbänden, beispielhafte H2-Pilotprojekte benennen, THG Vergleich D-EU-USA global (Zielerreichung), in der Diskussion auch Infrastruktur-Themen einbeziehen, Energieeffizienz und Digitalisierung im Rahmen der Modernisierung
- Hanno Bock | industrydecarbonization.com
- Eventuell schon erste Erkenntnisse darüber, welche Technologien aktuell attraktiv wirken, sich jedoch langfristig nicht durchsetzen werden.
- 4
- Technologie-Offenheit: welche Heizungs-Konzepte (Alternativen) machen für welche Anwendungen Sinn
- 1
- Netzwerkplanung mit einbeziehen
- 1
- Bei der Elektrifizierung sollte der aktuelle Stand der Technik berücksichtigt werden (Stichwort TRL)
- Weiterhin Transparenz der Annahmen in der Studie
- Nützbarkeit vorhandener Rohrleitungssysteme und Armaturen bei Umstellung auf H2
- 5
- Blick über Deutschland hinaus insbesondere hinsichtlich Energiekosten: D --> EU --> global
- 1
- Vorteile der eigenen Energiebereitstellung Solarthermie, PV?
- 1
- Umrüstung bestehender Anlagen
- 1
- Aktueller Stand der Technik bei Hybrid Methoden (Wasserstoff-Erdgas)
- Aktueller Stand der Technik bei 100% Wasserstoff fahren bei der Industrie Ofen wie z.B. Hauben Anlagen.
- Notwendigkeit der Anpassungen vorhandener Medienleitungen, sowohl städtischer Infrastruktur wie auch Infrastruktur bei den Firmen aufgrund des Medienwechsel von Erdgas auf Wasserstoff
- 4
- 1
- Modifikation/Umrüsten Bestandsanlage aufgrund Emissionsgrenzwertproblemen (BREF/BAT) und die Erreichung CO2 Neutralität durch alternativen Glühkonzepten. Wo liegt der ideale Punkt der Wirtschaftlichkeit (Invest, Betriebskosten, ...)
- Policy brief sollte im Einklang mit bereits bestehenden Branchen-Roadmaps in line sein
- Diskussion der Frage wie die Optionen CCS, H2, Elektrifizierung zueinander stehen und ob es einen falschen Fokus bei bestehender öffentlicher Diskussion und Förderung (viel CCS, viel H2, wenig Elektrifizierung) gibt
- 1

Welche Themen sollen in die Methodik der Workshops mit aufgenommen werden?

- Wärmespeicher
- Diskussion der Potenziale und Anwendungsmöglichkeiten nachhaltiger Biomasse in CO2 neutraler Prozesswärme
- Prognose der Preisentwicklungen für Strom und Wasserstoff
- 5
- ... und Emissionszertifikate
- ... und politische Emissions- und speziell Erdgasersparvorgaben
- Begrenzte Verfügbarkeit von Wasserstoff (und Biomasse) und der Umgang damit
- Berücksichtigung der Notwendigkeit leitungsbezogener Wasserstoff zur Umstellung von Glühöfen
- 1
- detaillierte Vorstellung alternativer Heizungskonzepte zwecks Beurteilung, ob/wie diese für verschiedene Anlagen anwendbar wären.
- 5
- Probleme der Abgasmesstechnik bei Oxyfuel H2-aufgreifen (nicht trivial)
- 2
- Flexibilisierung in Produktionsmengen und Stromabnahme, lokale Erzeugung von Strom
- Einfluss von Einsatz H2 auf die FF Zustellung
- 3
- Welchen Einfluss hat H2 auf das zu erwärmende Produkt? (H2 Diffusion bzw. Versprödung)
- 2
- Energiebereitstellung
- 7
- Potential durch Einsatz von Speichertechnologien
- 1
- für den Übergang Fokussierung von hybriden Technologien/Energien für die NE-Metallindustrie, speziell für das Recycling von kontaminierten Schrotten.
- Identifizierung von Engpässen während des Transformationsprozesses
- 1
- Ermittlung des Rohstoffbedarfs für die Transformation
- Stichwort: Förderung

Haben Sie sonstige Anregungen?

- physikalische Effizienz unabhängig vom Preis energieträger betrachten
- 1
- Plug&Play-Variante zum Ersetzen von Gasbrennern durch elektrische Plasmabrenner als Option (Entwicklung der TU Bergakademie Freiberg)
- 7
- Diskussion der bevorzugten Alternativen, falls es mehrere Heizungs-Lösungsmöglichkeiten gibt, insbesondere was Verfügbarkeit und Betriebskosten betrifft.
- 1
- Umstellung der Prozessroute erfordert ggf. eine erneute Zerlegung der hergestellten Produkte => Kosten für Anlagebetreiber berücksichtigen
- 1
- Prozesstechnik und Produktqualität
- Christian Schwotz
- Kooperation mit den Branchenverbänden
- 1
- Projektionen der Investitions- und Betriebskosten sollten detaillierter berechnet werden als gezeigt
- Risiken der zukünftig benötigten 24/7 Grünstromverfügbarkeit (auch bei Dunkelflauten), bei einer 100% Elektrifizierung. Herkunftsnachweise "einfach nachzukaufen" wird zukünftig schwieriger, da die Nachfrage deutlich steigen wird.
- 2
- Ergebnisse aus Netzwerken mit einbeziehen
- 1
- Welche Cross Media Effekte sind häufig bei Umstellung von Brenntechniken zu beobachten?
- 3
- Herkunftsnachweise sind sehr problematisch wegen Doppelzahlungen
- Erstellung eines Beratungsleitfadens für die Betreiber zur Realisierung der Transformation
- 4

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

