



IOB
Institut für
Industriefenbau
und Wärmetechnik

RWTHAACHEN
UNIVERSITY

 **Fraunhofer**
ISI

Fraunhofer-Institut für System- und
Innovationsforschung ISI

23.04.2024, ENIQ, Berlin

„CO₂-neutrale Prozesswärme“ Ergebnisse und Empfehlungen der Studie

01

Ergebnisse des Forschungsprojektes

Hintergrund

Auftraggeberin:



Projektstart: April 2019

Veröffentlichung: Dezember 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 uns 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.

Hintergrund

Grundlage: UBA-Projekt ermöglicht tiefgehende techno-ökonomische Analyse der verschiedenen Branchen:

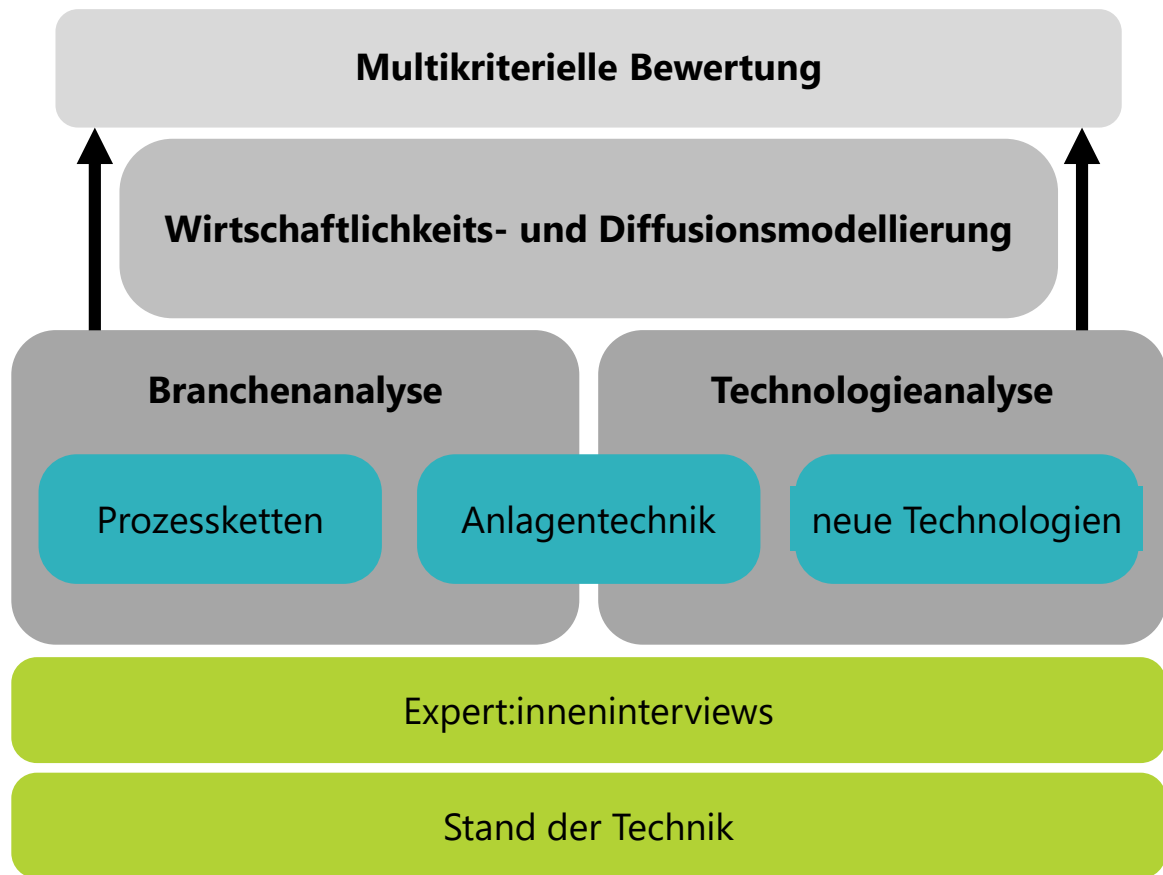
- 13 Industrien, 26 Prozessketten, 30 Produkte betrachtet
- ca. 120 Expert:inneninterviews geführt
- 34 Anwendungen untersucht



Gesamtbericht 739 Seiten (inkl. Anhang)

[Link zur Studie](#)

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.

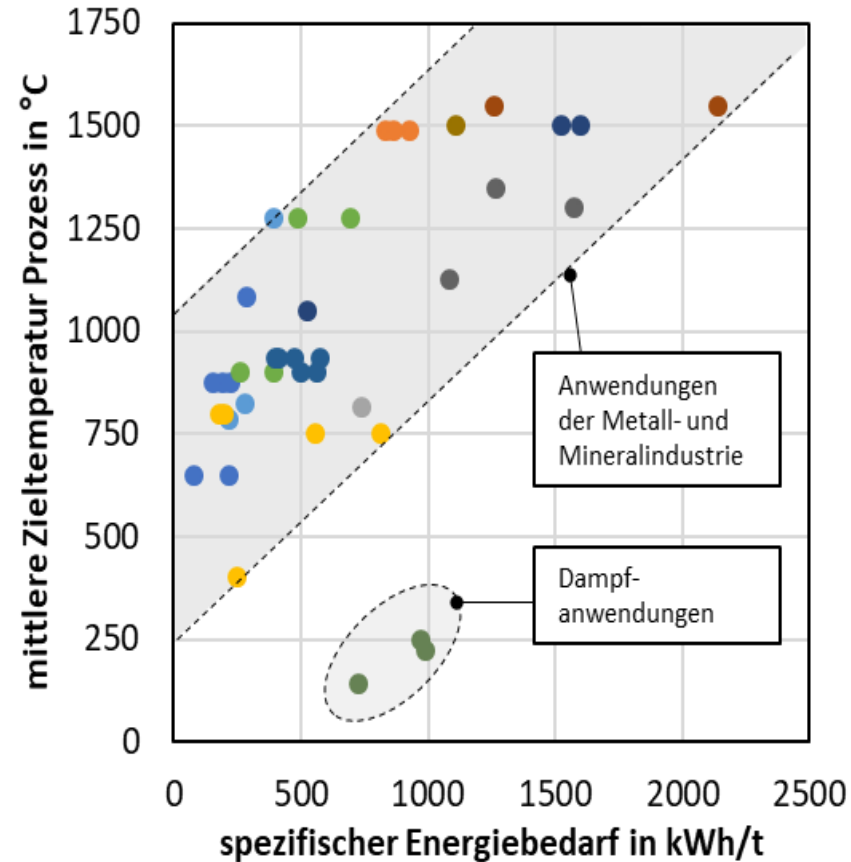
These 10: **Hybride Anlagenkonzepte** können den Einstieg in die CO₂-neutrale Prozesswärme ermöglichen.

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

These 1: Der Anlagenpark der Industrieöfen ist heterogen

Hohe Bandbreite der Anwendungen:

- **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



Betrachtete Referenztechniken:

- Wärme- und Glühöfen Stahl-Walzwerke
- Gießerei-Industrie: Gusseisen
- Gießerei-Industrie: Aluminium
- NE-Metallindustrie: Aluminium
- NE-Metallindustrie: Kupfer
- Umformtechnik
- Härtereitechnik
- Glasindustrie
- Kalk
- Zement
- Keramik- und Ziegelindustrie
- Dampferzeugung

Quelle: Fleiter et al. 2023

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

Für alle betrachteten Anwendungen sind CO2-neutrale Alternativtechniken in der Entwicklung – mit unterschiedlichem Technologiereifegrad

Herausforderungen:

- Hochskalierung auf industrielles Niveau
- Elektrifizierung: In der Metallindustrie schon weitgehend etabliert; in der Mineralindustrie noch nicht als Pilotanlagen verfügbar
- Wasserstoff: Formal niedrige Technologiereife, da geringe Verfügbarkeit in der Vergangenheit; viel Aktivität und schneller Fortschritt erwartet; in gasbeheizten Anlagen geringe technische Hürden

	Technologiereifegrad - Technology Readiness Level (TRL)	
	Strom	Wasserstoff
Metallindustrie	9 (17 Anwendungen)	<4 bis <5
	<2 bis <4 (5 Anwendungen)	
Mineralische Industrie	<2 bis <4	<2 bis <5
	9 (Kleinanlagen Glas)	
Dampferzeugung	9 (Elektrodenkessel)	9
	5-8 (HT-Wärmepumpen)	

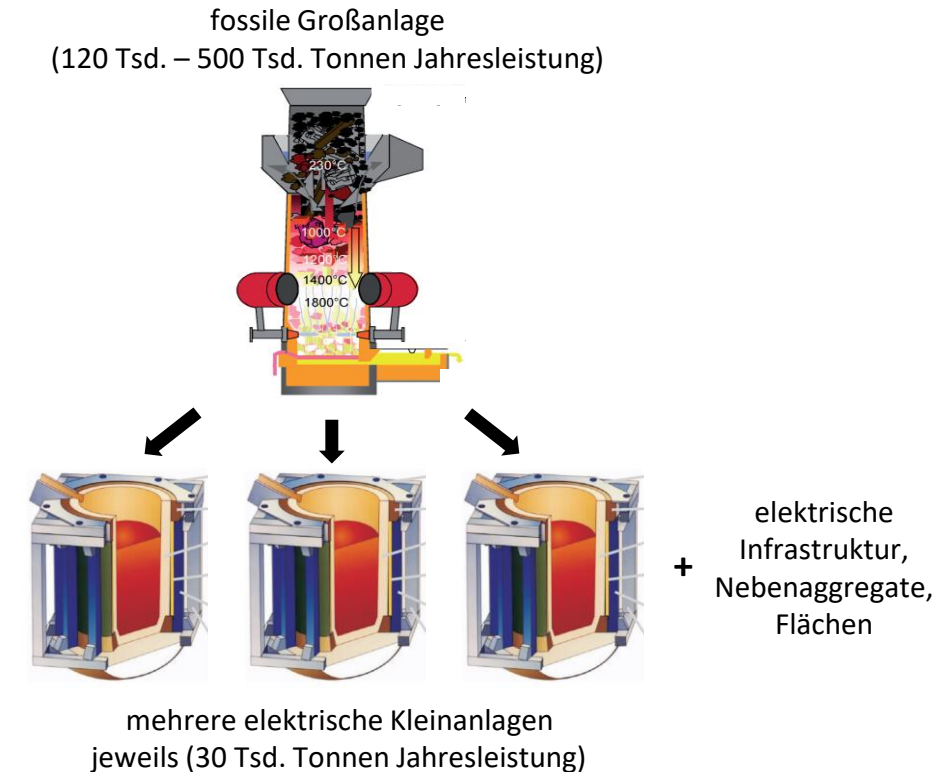
Quelle: FORECAST Modell / Fraunhofer ISI

These 4: Eine Elektrifizierung verlangt einen umfassenderen Umbau des Anlagenparks als der Einsatz von H₂ oder PtG

Beim Einsatz von **Strom** ist in vielen Fällen ein Neubau des Anlagen nötig

Beim Einsatz von **Wasserstoff** genügen häufig Modernisierungen bestehender Anlagen, z.B. durch den Austausch des Brenners (Wenn die Referenztechnik gasbefeuert ist)

Ausnahmen: Techniken, die heute bereits elektrifiziert sind, oder die heute Festbrennstoffe nutzen



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

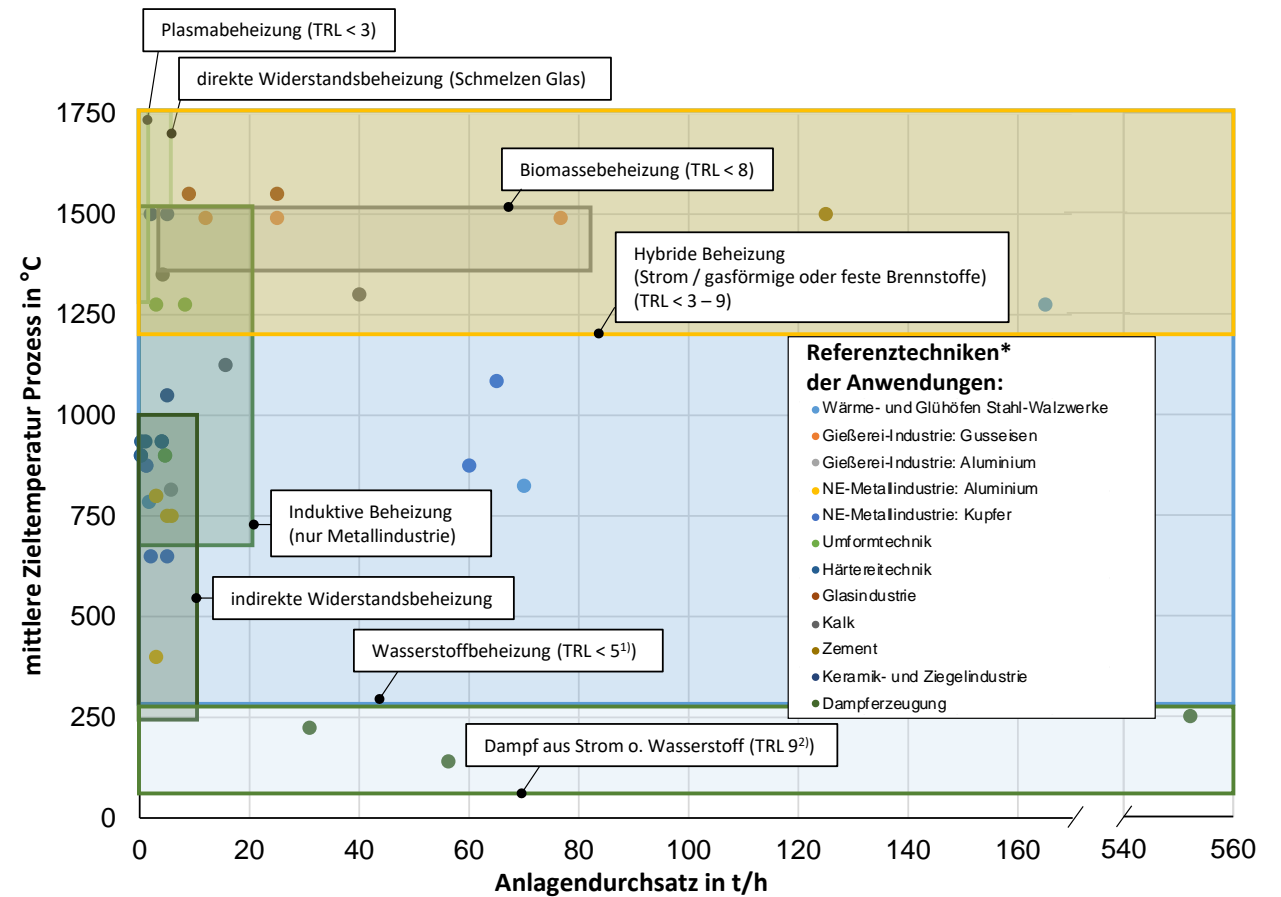
Elektrische Beheizungstechnologien gehören insbesondere in Anwendungen der Metallindustrie zum Stand der Technik. Grenzen elektrischer Beheizungstechnologien liegen vor allem in der Leistungsdichte und Anwendungstemperatur.

Der Einsatz von **Wasserstoff** ist grundsätzlich für alle gasbeheizten Anwendung denkbar. Einzelne Komponenten (bspw. Brenner) besitzen ein hohes TRL. Das Gesamtsystem muss erprobt werden.

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.

Einordnung und Anwendungspotential der betrachteten Alternativtechnologien



07

Wie wirtschaftlich sind klimaneutrale Techniken?

Wie wirtschaftlich sind klimaneutrale Techniken?

Energie- und CO₂-Kosten dominieren die Kosten der Wärmeerzeugung - teilweise mit Anteilen von deutlich mehr als 80 Prozent.

- **Energiekosten sind entscheidend für die Wirtschaftlichkeit.**
- Anschaffungskosten der Anlagen haben eine vergleichsweise geringere Bedeutung.

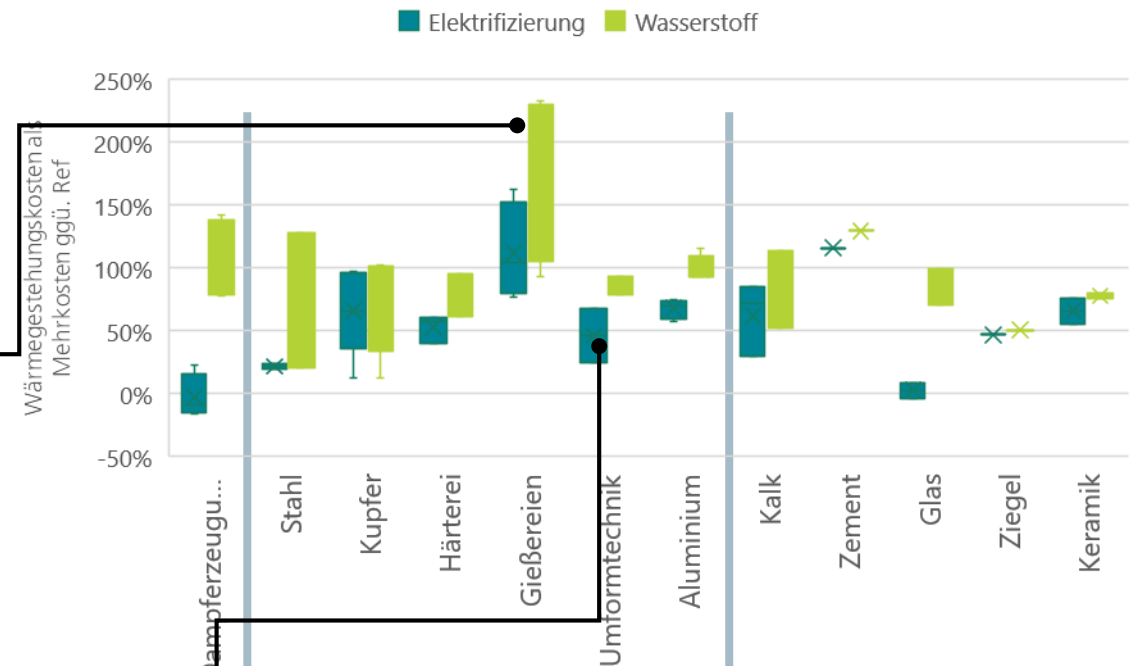
Bei Annahme heutiger Strom und Erdgaspreise und einem CO₂-Preis von 122 Euro/t CO₂ ist eine **Elektrifizierung für die meisten Anwendungen nicht wirtschaftlich.**

Daraus folgen Politikempfehlungen:

- Investitionsförderung alleine ist nicht ausreichend.
- Verfügbarkeit von klimaneutralem Strom und Wasserstoff zu wettbewerbsfähigen Preisen ist entscheidend.
- Hybride flexible Systeme ermöglichen schrittweisen Markteinstieg mit verringerten Risiko.

Wärmegestehungskosten (Mehrkosten ggü. fossiler Referenz)

(Strom 13-19 €/ct/kWh Wasserstoff: 18-27 €/ct/kWh; Erdgas 6-8,5 €/ct/kWh; CO₂ 122€/tCO₂)



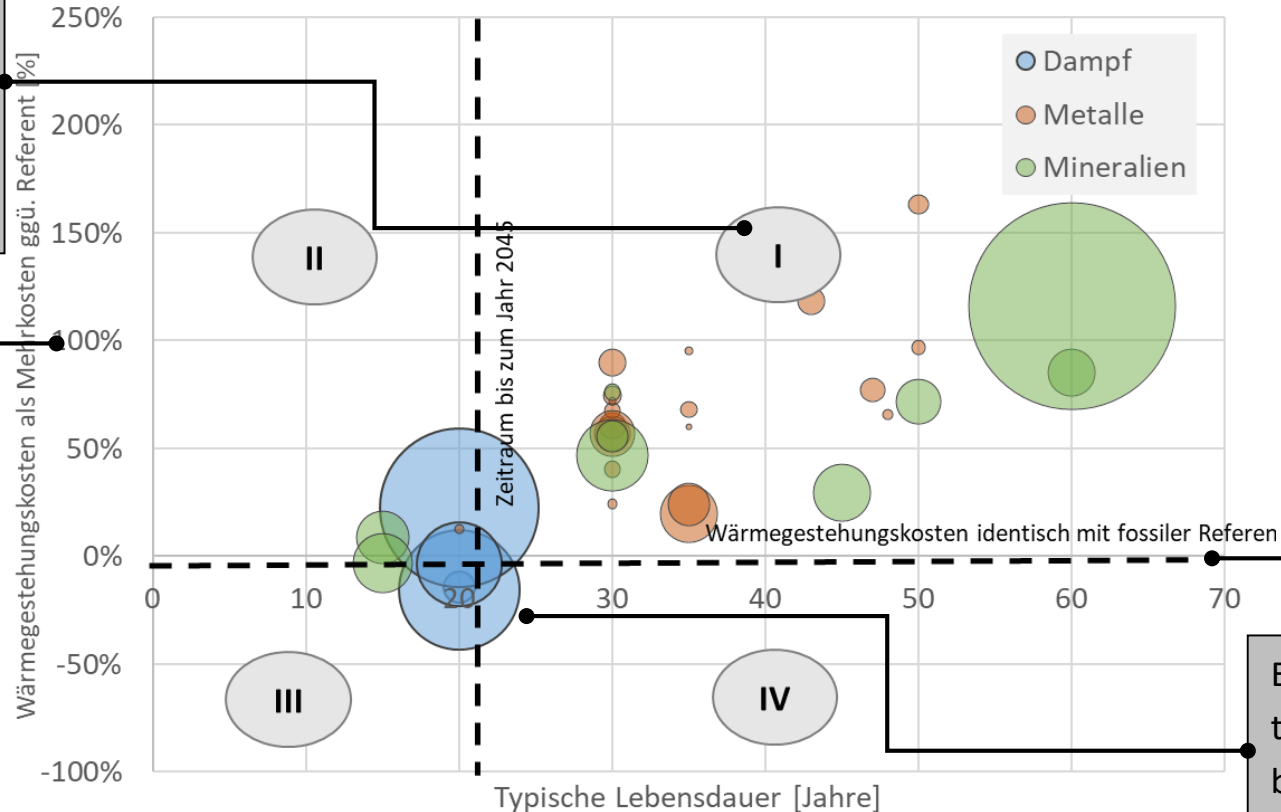
Direkte Elektrifizierung im Allgemeinen günstiger als Wasserstoff – das ist aber vor allem auf Annahmen zu Energieträgerpreisen zurückzuführen und damit unsicher.

Quelle: Fleiter et al. 2023

Wo liegen die größten Gefahren für fossile Lock-ins?

Elektrifizierung: Wirtschaftlichkeit über Lebensdauer

(Strom 13-19 €/kWh Wasserstoff: 18-27 €/kWh; Erdgas 6-8,5 €/kWh; CO₂ 122€/tCO₂)



Besonders hoch ist die Gefahr fossiler lock-ins bei Anlagen, die zusätzlich zur langen Lebensdauer derzeit noch **keine wirtschaftlich verfügbare Option** für die Elektrifizierung haben.

Die meisten Anwendungen sind unter Referenzbedingungen nicht wirtschaftlich.

Hohe **Lebensdauer** von industriellen Anlagen, im Mittel 30 Jahre.

Einige Anwendungen erfahren theoretisch zwei Austauschzyklen bis 2020. Die meisten nur einen oder gar keinen mehr.

06

Ergebnisse der Branchenworkshops

Ziele der Workshopreihe: Kommunikation der Ergebnisse und Erarbeitung von Herausforderungen und Möglichkeiten 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 Empfehlungen zur Umsetzung (**branchenspezifische Workshops**)

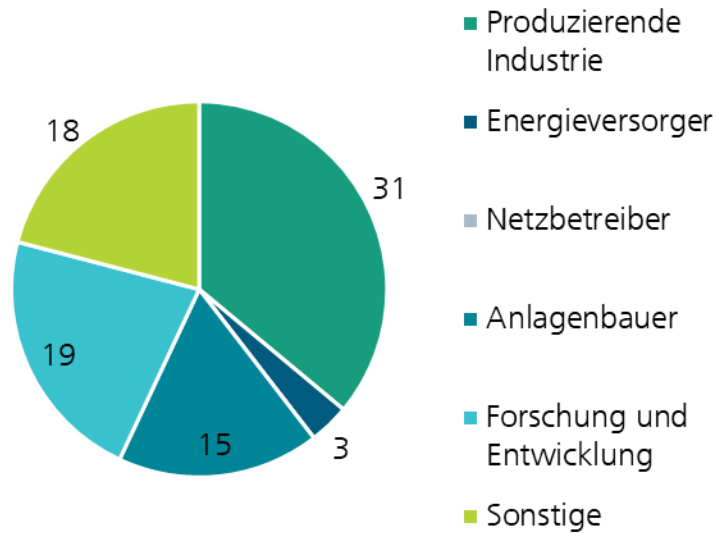
Vertiefte, branchenspezifische Vorstellung der Ergebnisse.

Gemeinsames Arbeiten an Herausforderungen und Möglichkeiten zur Umsetzung einer CO₂-neutralen Prozesswärmeerzeugung in der Industrie.

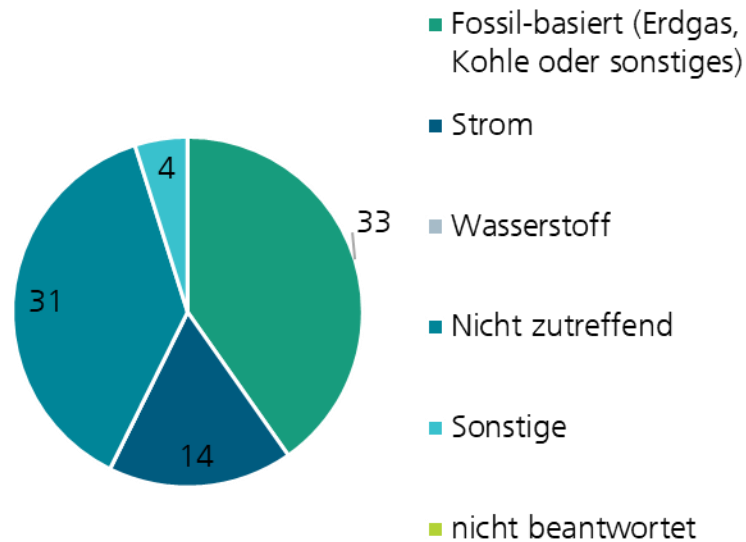


Teilnehmer der Workshops: Industrie und fossile Anlagentechnik mit Dekarbonisierungsstrategie dominiert

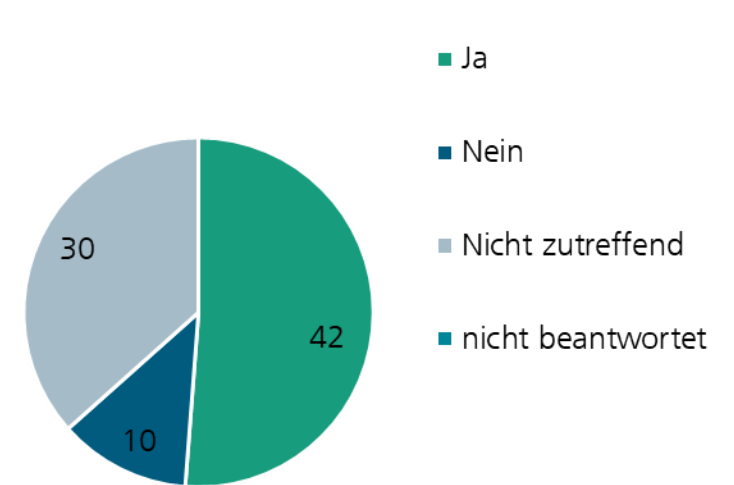
Zu welcher Branche gehört ihre Einrichtung?



Welchen Energieträger setzen Sie überwiegend ein?



Gibt es bei Ihnen bereits eine Dekarbonisierungsstrategie?



In den Diagrammen dargestellt ist die Anzahl der Antworten.

Zentrale Herausforderungen für die Umsetzung aus den Workshops zusammengefasst

Ein zentrale Erkenntnis der Veranstaltungsreihe ist, dass nicht alle Unternehmen Kenntnis über die vollständigen **technischen Möglichkeiten** und das Potential CO₂-neutraler Alternativtechnologien besitzen. Voraussetzung ist **Hochskalierung auf industrielles Niveau** und Erfahrung mit dem Anlagenbetrieb

Im Bereich **Infrastruktur** wurde über alle Branchen hinweg eine nicht ausreichende Infrastruktur festgestellt. Dies betrifft sowohl die Versorgung mit grünem Wasserstoff als auch die Versorgung mit grünem Strom.

Da die **Energiekosten** einen wesentlichen Teil der Betriebskosten ausmachen, ist deren Preisentwicklung für Kostenberechnungen ein entscheidender Faktor. Die Preisentwicklung des grünen Wasserstoffs und des Stroms stellen eine Unsicherheit dar, die Investitionsentscheidungen beeinflussen.

Eine weitere branchenübergreifende Herausforderung ist die **Verfügbarkeit von CO₂-neutralen Energiequellen**. Es ist fraglich, ob zukünftig genügend grüner Strom verfügbar ist, um die steigende Nachfrage in der Industrie zu decken. Mit noch größerer Unsicherheit ist die Verfügbarkeit von grünem Wasserstoff behaftet.



11

Ansatzpunkte

Handlungsempfehlungen

- Hochskalierung und Demonstration ermöglichen um Betriebserfahrung zu sammeln
- Zugänglichkeit der Ergebnisse von FuE-Projekten als „Leuchttürme“.
- Klimaschutzverträge sollten schnell umgesetzt und erprobt werden.
- Der flexible Betrieb von hybriden Anlagen sollte durch die Netzentgelte angereizt werden (und nicht verhindert werden)
- Langfristige Planungssicherheit für die Energieversorgung der Industrie sicherstellen.
- Wettbewerbsfähige Strompreise für die Prozesswärme ermöglichen.
- Internationale Wettbewerbsfähigkeit gewährleisten. Anreize zur Dekarbonisierung im Kontext der internationalen Wettbewerbs setzen.

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Kontakt:

Tobias Fleiter

Tobias.Fleiter@isi.fraunhofer.de

Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI

Breslauer Straße 48

76139 Karlsruhe

www.isi.fraunhofer.de