

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

5. Workshop zur Veranstaltungsreihe im Rahmen der Veröffentlichung der UBA-Studie  
20. Februar 2024 (online), Dampferzeugung

**Herzlich willkommen!**



© Shutterstock

# 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 – 09:45 Uhr: Ergebnisse: Dampferzeugung (L. Neusel, M. Rehfeldt)
- 09:45 – 09:55 Uhr: Einführung in die Methodik des gemeinsamen, interaktiven Arbeitens (L. Neusel)
- *09:55 – 10:05 Uhr: 10 Minuten Pause*
- 10:05 – 11:05 Uhr: Gemeinsame Diskussion und interaktives Arbeiten
- 11:05 – 11:30 Uhr: Zusammenfassung

# Einordnung in Energiesystemstudien

---

## Forschungsrahmen dieser Studie

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

## Ein Blick darüber hinaus

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

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

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

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

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

---

# Kurzvorstellung Studie und des Workshopkonzeptes

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

---

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.*

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

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

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



Gesamtbericht 739 Seiten (inkl. Anhang)

# Zielsetzung der Studie

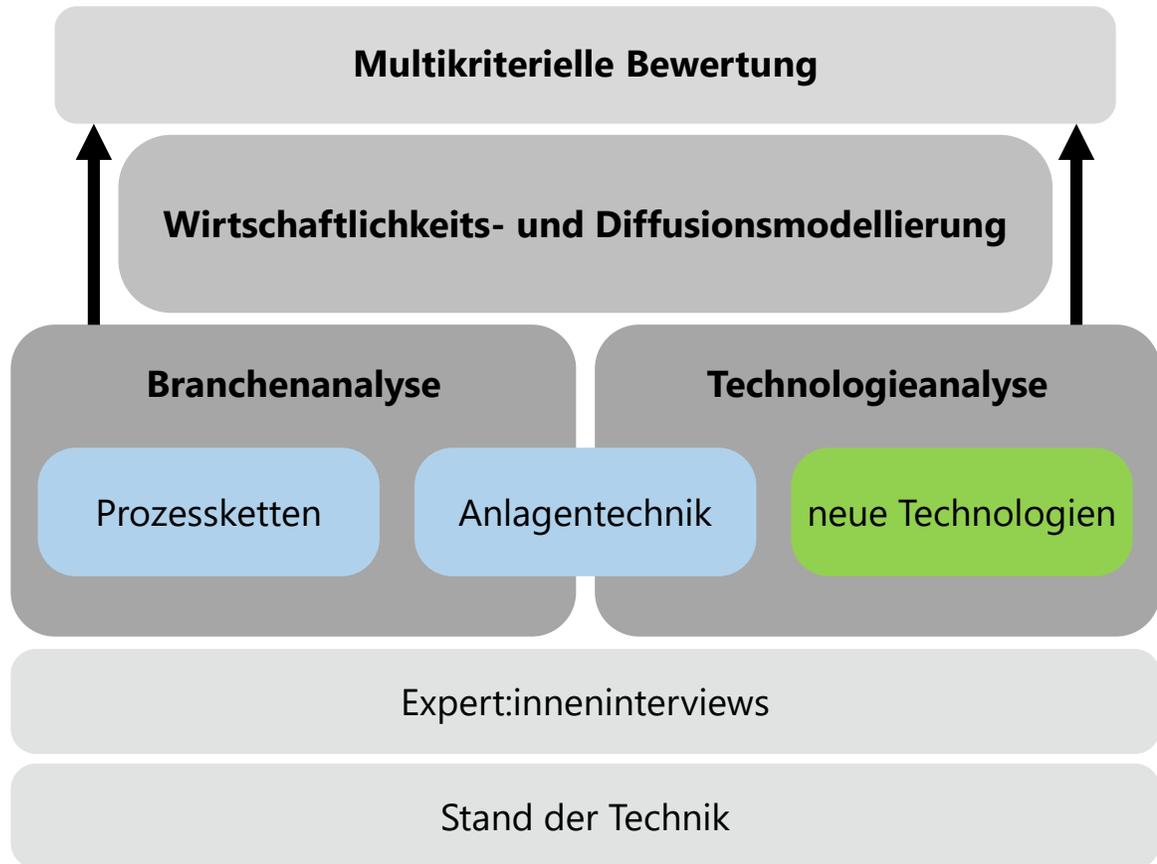
Link zur Studie: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/co2-neutrale-prozesswaermeerzeugung>

## Hauptstudie:

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



# Die arbeiten münden in 11 Thesen als Elemente einer **Transformationsstrategie**



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

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

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

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

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

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

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

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

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

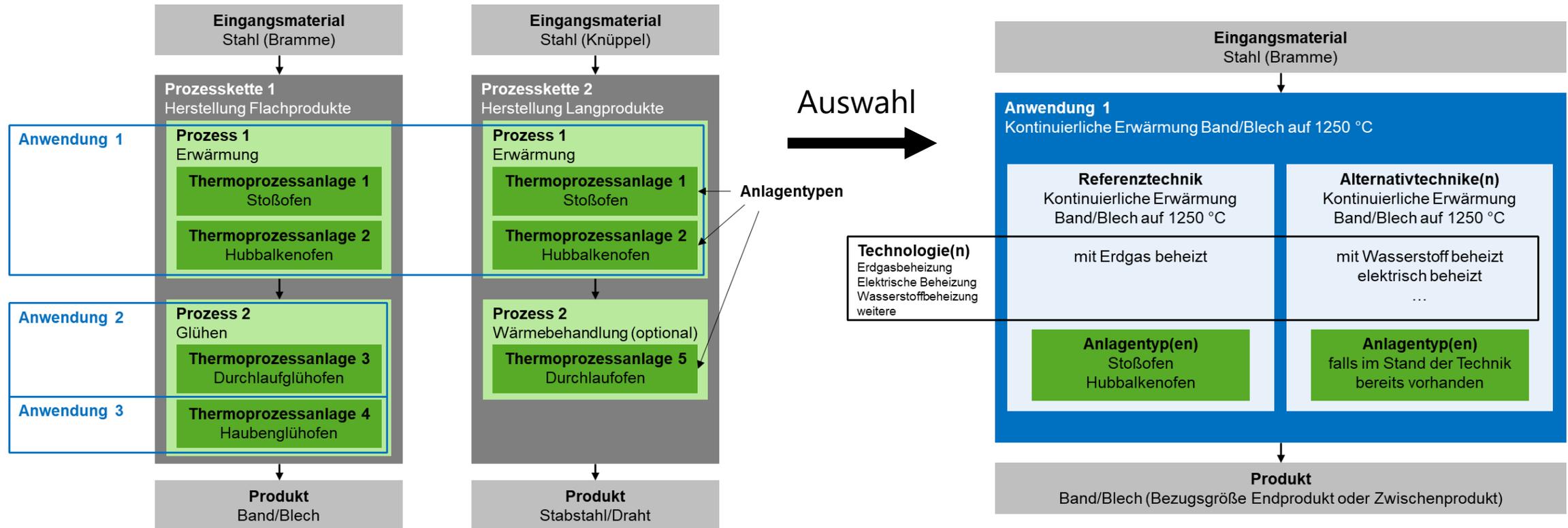
**These 10:** **Hybride Anlagenkonzepte** können den Einstieg in die CO<sub>2</sub>-neutrale Prozesswärme ermöglichen.

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

# Branchen im Fokus der Studie

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

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



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

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

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

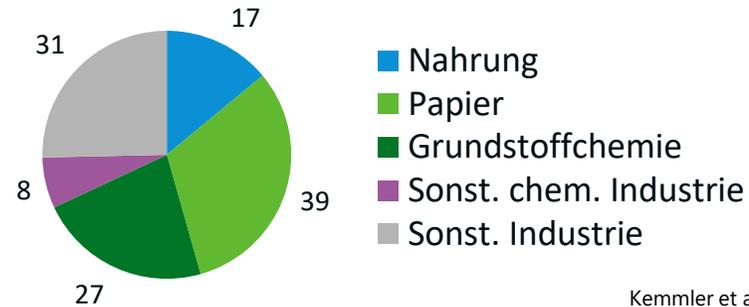


---

# Ergebnisse: Dampferzeugung

# Kurzbeschreibung Dampferzeugung und Fokus der Studie

Endenergieverbrauch für Wärmeerzeugung  
im Bereich 100-500 °C in TWh (2013)



Kemmler et al. 2017

## Referenztechnik

- Erdgasbasiert (Kessel & KWK-Anlage)

Dampf-  
erzeugung

## Alternativtechnik

- Strombasiert
  - Power-to-heat
  - Power-to-gas

# Drei Bausteine bei der Branchenanalyse zur Dampferzeugung

## Dampfnutzung in verschiedenen Branchen

Beispiele für Dampfnutzung in verschiedenen Sektoren (direkt und indirekt)	Papierherstellung	Chemie-industrie	Nahrungsmittel-industrie	Branchen der Nahrungsmittelindustrie				
				Zuckerherstellung	Milchverarbeitende Industrie	Fleischverarbeitung	Bierherstellung	Stärke und Stärkeerzeugnisse
Ver- und Eindampfen, Konzentrieren		X	X	X	X			X
Kochen, Sieden								
Pasteurisieren								
Sterilisieren								
Trocknen								
Fraktionierung, Destillieren								
Cracking								
Vermischung/Umwälzen								
Wasserstoffherzeugung								
Erwärmung von Prozesswasserspeichertank (Antrieb von Maschinen/drivers)								

## Repräsentative Anwendungen (z.B. Trocknung)

39 kWh <sub>th</sub> /t <sub>Milchpulver</sub>	159 kWh <sub>th</sub> /t <sub>Milchpulver</sub>	
18 kWh <sub>th</sub> /t <sub>Dampf</sub>	74 kWh <sub>th</sub> /t <sub>Dampf</sub>	
	44 kWh <sub>th</sub> /t <sub>Milchpulver</sub>	1702 kWh <sub>th</sub> /t <sub>Milchpulver</sub>
	21 kWh <sub>th</sub> /t <sub>Milchpulver</sub>	790 kWh <sub>th</sub> /t <sub>Milchpulver</sub>

### Milchbehandlung

- Pasteurisierung, Homogenisierung
- T ≈ 75 – 85 °C

Referenz

### Gasbefuerter Dampfkessel



### KWK-Anlage

Alternativ

### Strombasierte Verfahren & PtG (Wärmepumpe, Elektrodenkessel, H<sub>2</sub>)



# Austausch mit Expert:innen ergibt Alternativtechniken für 3 Dampf-Anwendungen

## Austausch

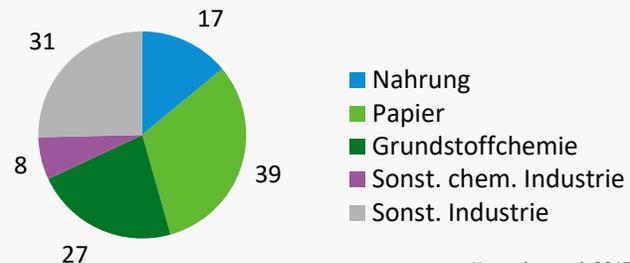
### 19 Expert:innen-interviews

- Technikhersteller
- Verbände
- Forschungs-institutionen

## Dampf-Anwendungen

- 1 Milchpulverherstellung**  
(Trocknung bis 240 °C)
- 2 Papiertrocknung**  
(Trocknung bis 140 °C)
- 3 Chemiapark-Dampfversorgung**  
(verschiedene Druckstufen ND/MD/HD)

Endenergieverbrauch für Wärmeerzeugung  
im Bereich 100-500 °C in TWh (2013)



Kemmler et al. 2017

## Alternativtechniken

PtH

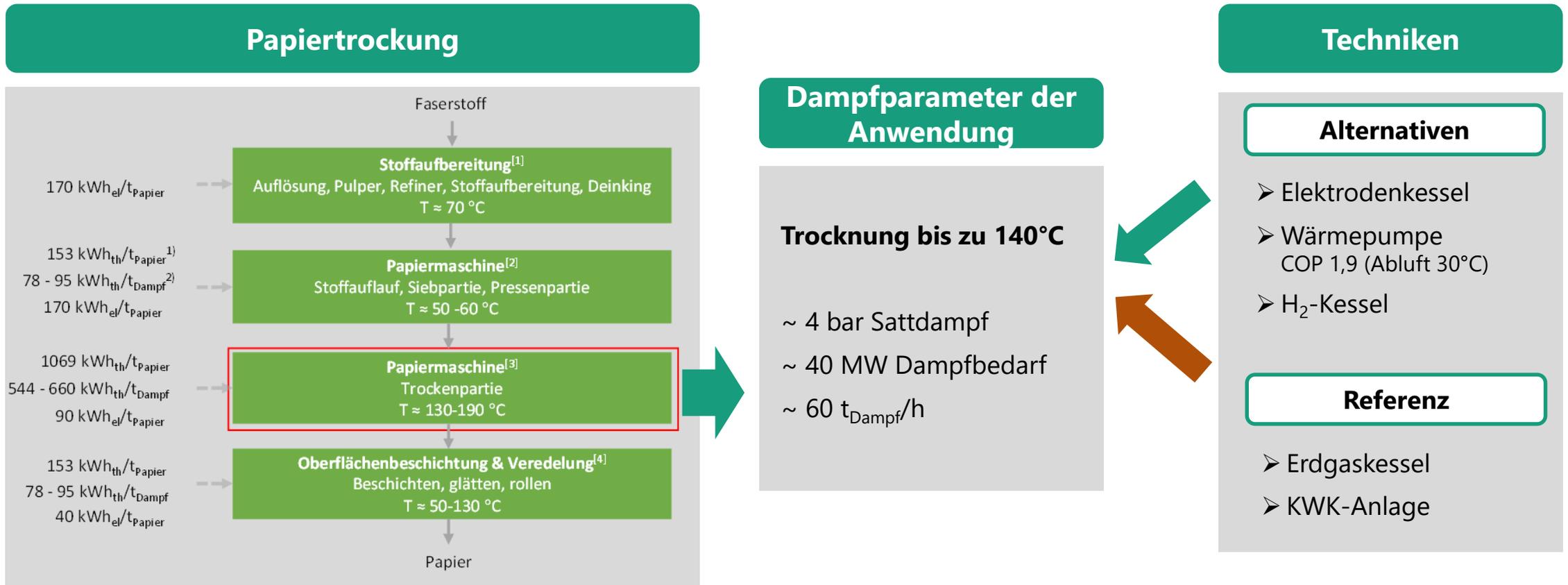
Elektrodenkessel

Hochtemperatur-  
wärmepumpe

PtG

Wasserstoffbefeuerter  
Dampfkessel

# Anwendung Papiertrocknung erfordert moderate Dampfparameter von Alternativtechniken



Detaillierte Legende: siehe Bericht

Quellen: Bühler et al. 2019, Gosh et al. 2011, Suhr et al. 2015, Treppe et al. 2012, Wilk et al. 2017; zusätzliche Expert:innen Interviews

# Kenndaten für wirtschaftliche Betrachtung am Beispiel Papiertrocknung

	Referenztechnik 1	Alternativtechnik 1	Alternativtechnik 2	Alternativtechnik 3	Alternativtechnik 4	Einheit
Technologie	Erdgasbefeuerung & Biomasse	Erdgasbefeuerung & Biomasse	Strombasiert & Biomasse	Strombasiert & Biomasse	Wasserstoffbefeuerung & Biomasse	
Technik	Erdgaskessel & Biomassekessel	KWK-Anlage mit Mehrfachfeuerung (Erdgas und Biomasse)	Elektrodenkessel & Biomassekessel	Wärmepumpensystem & Biomassekessel	Wasserstoffkessel & Biomassekessel	
Produkt	Papier	Papier	Papier	Papier	Papier	
Investition Neubau	26,5	59,0	27,3	40,9	27,2	EUR/t <sub>Kap.</sub>
Investition Modernisierung	17,2	38,3	17,7	32,5	17,3	EUR/t <sub>Kap.</sub>
Minimale Investition Neubau	22,9	52,3	23,7	32,7	23,6	EUR/t <sub>Kap.</sub>
Minimale Investition Modernisierung	14,9	34,0	15,4	25,4	15,0	EUR/t <sub>Kap.</sub>
TRL	9	9	9	7-8	9	-
Energieträger 1	Erdgas	Erdgas	Strom	Strom	EE-Wasserstoff	-
Energieträger 2	Biomasse	Biomasse	Biomasse	Biomasse	Biomasse	-
Energieträger 3	-	-	-	-	-	-
Spezifischer Energiebedarf 1	0,36	0,48	0,34	0,17	0,35	MWh/t <sub>Dampf</sub>
Spezifischer Energiebedarf 2	0,37	0,48	0,37	0,37	0,37	MWh/t <sub>Dampf</sub>
Spezifischer Energiebedarf 3	-	-	-	-	-	MWh/t <sub>Dampf</sub>
Minimaler spezifischer Energiebedarf	0,70	0,96	0,69	0,49	0,70	MWh/t <sub>Dampf</sub>
Prozessbedingte Emissionen	-	-	-	-	-	t <sub>CO2</sub> /t <sub>Dampf</sub>
Betriebs- und Wartungskosten	1,3	2,9	1,4	2,0	1,4	EUR/t <sub>Kap.</sub>
Abschreibungszeitraum	20	20	20	20	20	a
Modernisierungszyklus	20	20	20	20	20	a
Repräsentative Kapazität	470.000	470.000	470.000	470.000	470.000	t <sub>Jahresleistung Dampf</sub>
Auslastung	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	1
Anteil Bestand 2020	49%	49%	2 %	-	-	%
Verfügbar ab	2020	2020	2020	2025	2020	a
Verfügbar bis	2050	2050	2050	2050	2050	a
Stromerzeugung	-	0,20	-	-	-	MWh <sub>Strom</sub> /t <sub>Dampf</sub>

# Entwicklungsstand der Alternativtechniken variiert

Alternativtechniken		Entwicklungsstand			
		TRL	Marktreife	Endenergiebedarf	FuE bis 2050
PtH	Elektrodenkessel	TRL 9	Für großtechnischen Einsatz verfügbar: aber aktuell ein Nischenprodukt	 ~ -9%	Höhere Drücke (>90 bar)
	Hochtemperaturwärmepumpe	TRL 7-8 (bis 160°C) TRL 5-6 (bis 240°C)	Frühestens 2025/30 für den großtechnischen Einsatz: steigendes Marktangebot, geringe Dampfkapazitäten (1-2 t/h)	 ~ -43-63%	COP Anstieg Neue synthetische (niedriges GWP) & natürliche Kältemittel
PtG	Wasserstoffbefeuerter Dampfkessel	TRL 9	Für großtechnischen Einsatz verfügbar: H2-ready-Kessel mit vereinfachter Umstellung zu späterem Zeitpunkt	 ~ -5%	Neuartige Wasserstoffbrenner (v.a. für Vormischsysteme)

Quellen: Arpagaus et al. 2018, Bühler et. al. 2019, Agora Energiewende 2019, Danish Energy Agency and Energinet 2020, Gosse 2019, PARAT Halvorsen AS 2021, Schönfelder 2020, Wilk et al. 2019, Wemmers et al. 2017, Zühlsdorfer et al. 2019, Wolf et al. 2012/2016; zusätzliche Expert:inneninterviews

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

- **Heterogenes Gesamtbild des Technologiereifegrades** über die Technologien hinweg
- **Dampfkessel unter Einsatz von Strom und Wasserstoff** sind im industriellen Maßstab bereits am Markt **verfügbar**
- Umbau von bestehenden Systemen ggf. möglich
- **Hochtemperaturwärmepumpen** liegen je nach erforderlicher Dampftemperatur bei **niedrigerem TRL** im Bereich 5 bis 8, jedoch hohe Effizienzgewinne

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.

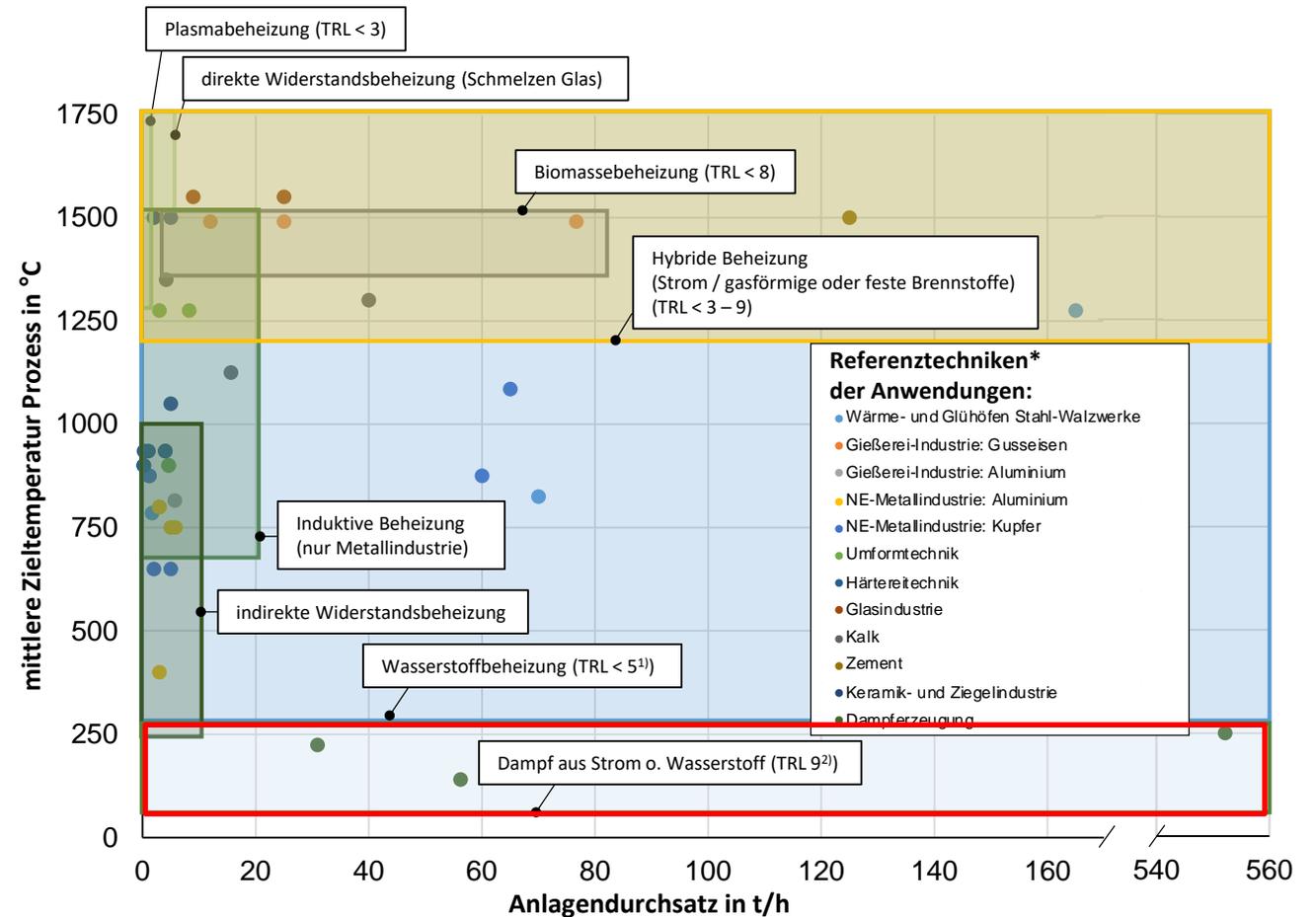
		Branche und Anwendung (zusammengefasst)																	
		Aluminium: Schmelzen, Erwärmen und Wärmebehandlung	Gießerei-Industrie: Schmelzen Al-Formguss	Kupfer: Schmelzen, Erwärmen und Wärmebehandlung	Gießerei-Industrie: Schmelzen Gusseisen	Härtereitechnik: Aufkohlen und Austenitisieren	Umformtechnik: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

Detaillierte Annahmen, Legende und Quellen siehe Bericht

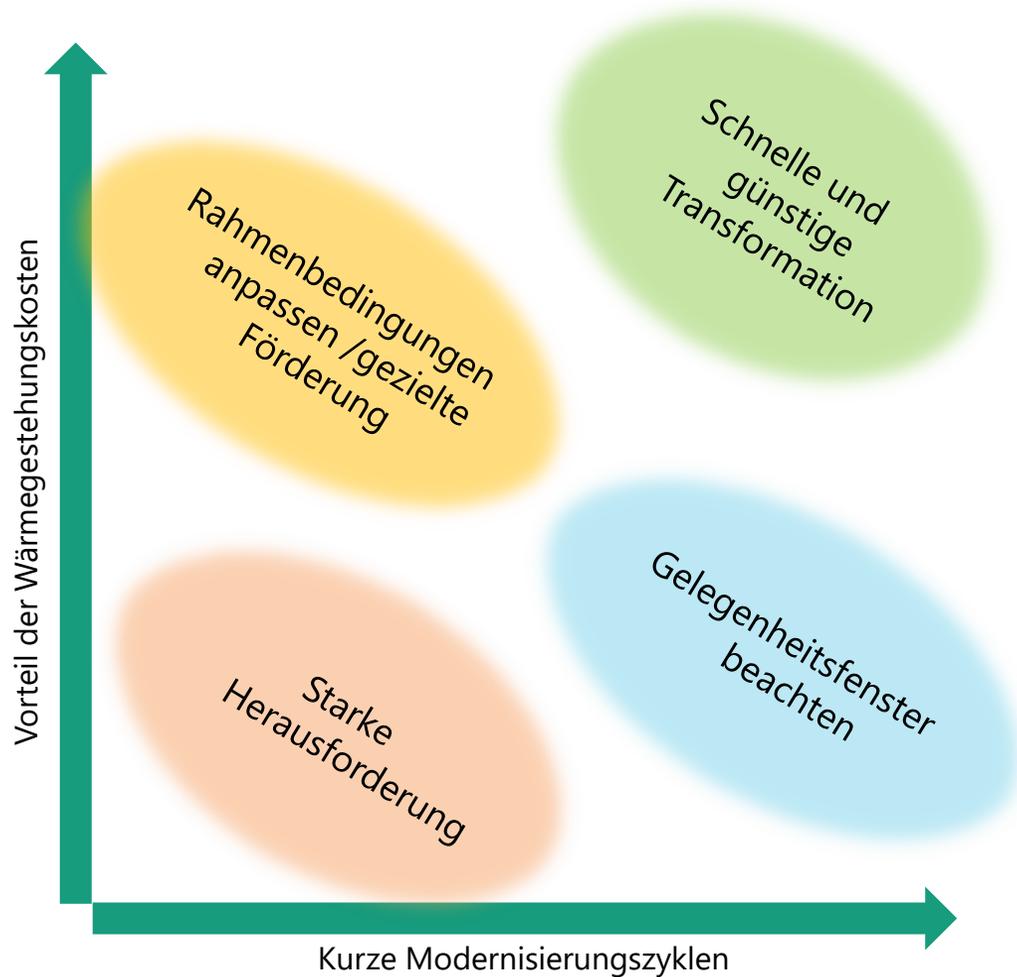
# These 6: Elektrifizierung ist bei vielen Anwendungen mit niedrigeren Temperaturen vorteilhaft – H<sub>2</sub> bei sehr hohen Energiedichten

- Der Standort DE ist durch einen sehr **heterogenen Anlagenpark** geprägt, wodurch sich die Anwendungsmöglichkeiten der Alternativtechnologien unterscheiden.
- Bei der Dampferzeugung sollte **Elektrifizierung priorisiert** werden, da Elektrodenkessel technisch ausgereift und Wärmepumpen mit hohen Effizienzgewinnen verbunden sind
- Der Einsatz von **wasserstoffbeheizten Kesseln** kann sinnvoll sein, wo Wärmepumpen nicht technisch einsetzbar sind und Wasserstoff absehbar verfügbar sein wird.
- Einsatz **hybrider Systeme** denkbar: Erhöhen Flexibilität und Resilienz, jedoch höherer Umsetzungsaufwand

Einordnung und Anwendungspotential der betrachteten Alternativtechnologien



# Wir untersuchen zwei Dimensionen der wirtschaftlichen Bewertung

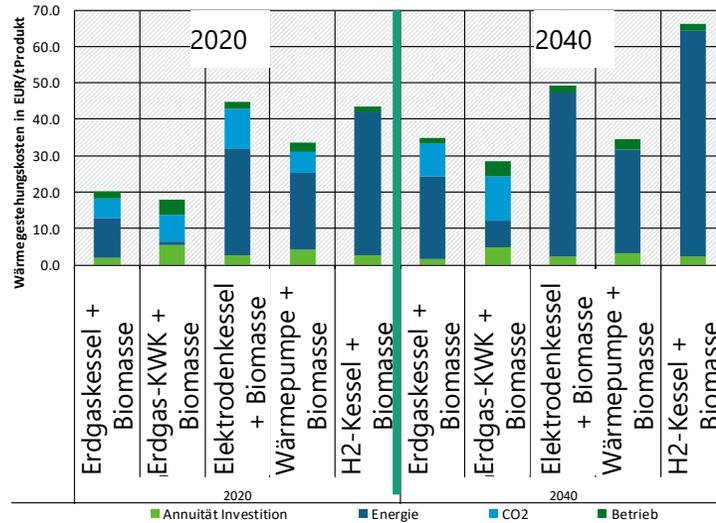


- Modernisierungszyklen
  - Orientieren sich an Abschreibungszeiträumen
  - Vorzeitiger Austausch von Anlagen ist eine Option (und in vielen Fällen notwendig)
- Wärmegestehungskosten
  - Investition, Energie, CO<sub>2</sub>, Betrieb und Wartung
  - Differenz zu Referenztechnologie ist maßgeblich

# Dimension 1: Wärmegestehungskosten bestimmen die Attraktivität der Techniken

## Papierindustrie

Papier Trocknung (inkl. Biomasse)



Eigene Berechnung Fraunhofer ISI

## Referenzfall (2040)

Gas: 38 €/MWh  
 Strom: 124 €/MWh  
 H2: 153 €/MWh  
 CO<sub>2</sub>: 125 €/t

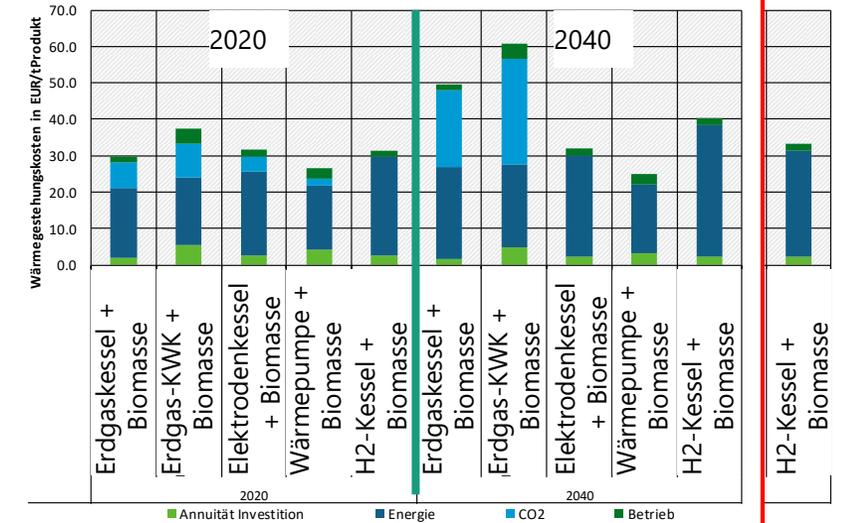
## Transformation (2040)

Gas: 44 €/MWh  
 Strom: 54 €/MWh  
 H2: 76 (54) €/MWh  
 CO<sub>2</sub>: 300€/t

Angenommene, nicht der aktuellen Realität entsprechende Rahmenbedingungen!

## Papierindustrie

Papier Trocknung (inkl. Biomasse)



Eigene Berechnung Fraunhofer ISI

Fraunhofer ISI

- Konventionelle Technik (Erdgas) ist auch bis 2050 im Referenzfall konkurrenzfähig.
- CO<sub>2</sub>-Preise können Energieträger-Kostendifferenz aber angleichen.
- Interne Biomassennutzung wirkt kostendämpfend auf alle Technologien.
- Interne Biomassennutzung erleichtert Integration von Wärmepumpensystem.
- KWK durch Stromerzeugung attraktiv (mit Energiekosten verrechnet).

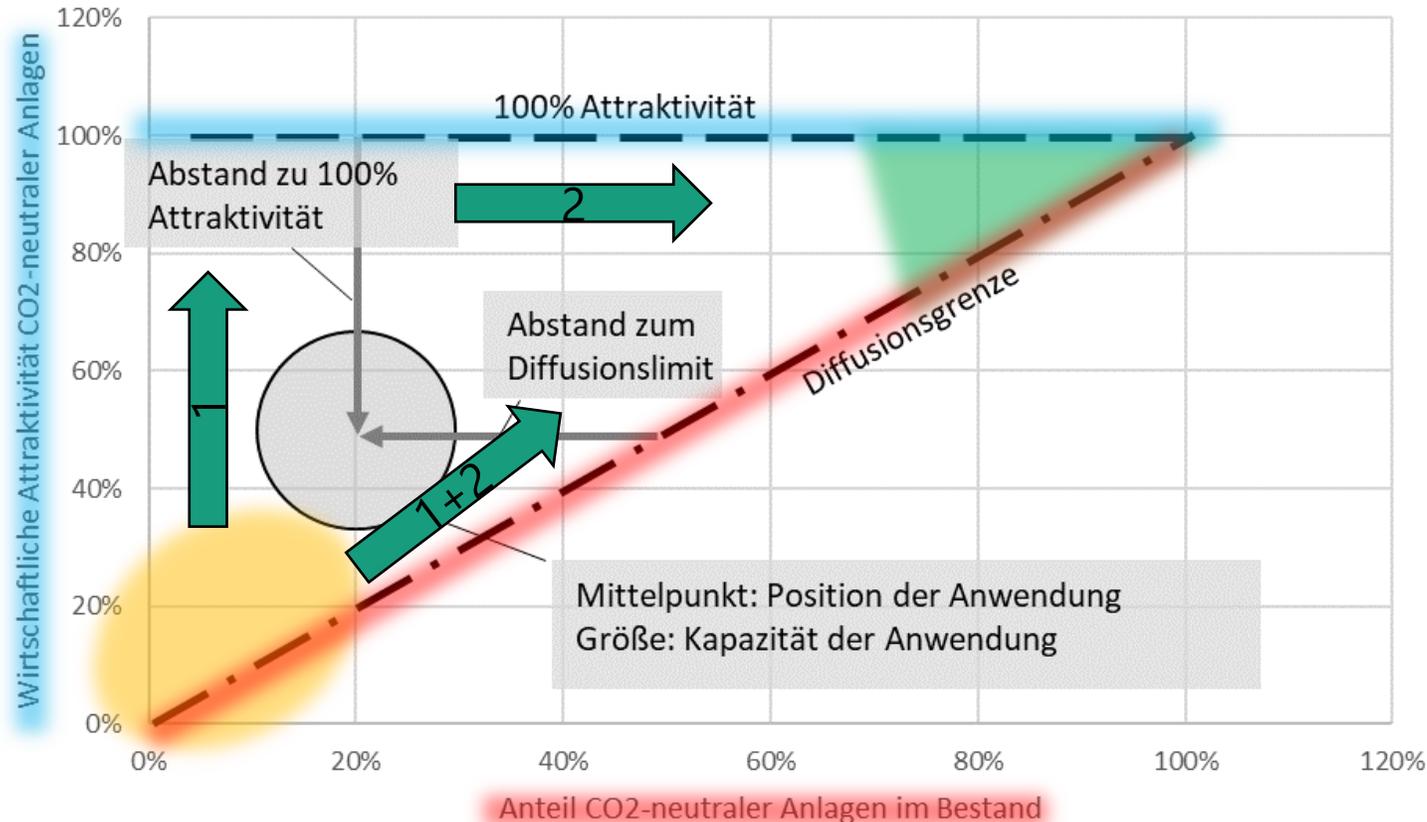
- Im Transformationsfall (hohe CO<sub>2</sub>-Preise!) wird die Referenztechnik unwirtschaftlich.
- Wärmepumpe + Biomassekessel ist wirtschaftlichste Option (verfügbar ab 2030).
- Wasserstoff ist teurer als direkte Elektrifizierung – auch wenn H2 zum Strombezugspreis angenommen wird.
- Geringerer Strompreis und hoher Erdgas/CO<sub>2</sub>-Preis macht KWK unwirtschaftlich.

# Dimension 2: Modernisierungszyklen bestimmen die Austauschrate der Anlagen

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

- Neue Investitionen in fossile Anlagen riskieren, nicht das Ende ihrer technischen Lebensdauer zu erreichen.
- Bestandsanlagen sehen meist noch ein Modernisierungszyklus.
- Es besteht Unsicherheit über Alter des Bestands – standortspezifisch zu betrachten.
- Empfehlung:
  - Standortspezifisch Verfügbarkeit von Dekarbonisierungsoptionen prüfen.
  - Elektrifizierung ernsthaft berücksichtigen.
  - An KWK-Standorten: Stromversorgung neu denken – falls starke Elektrifizierung Realität wird, könnte wirtschaftliche Grundlage für KWK-betrieb entfallen.

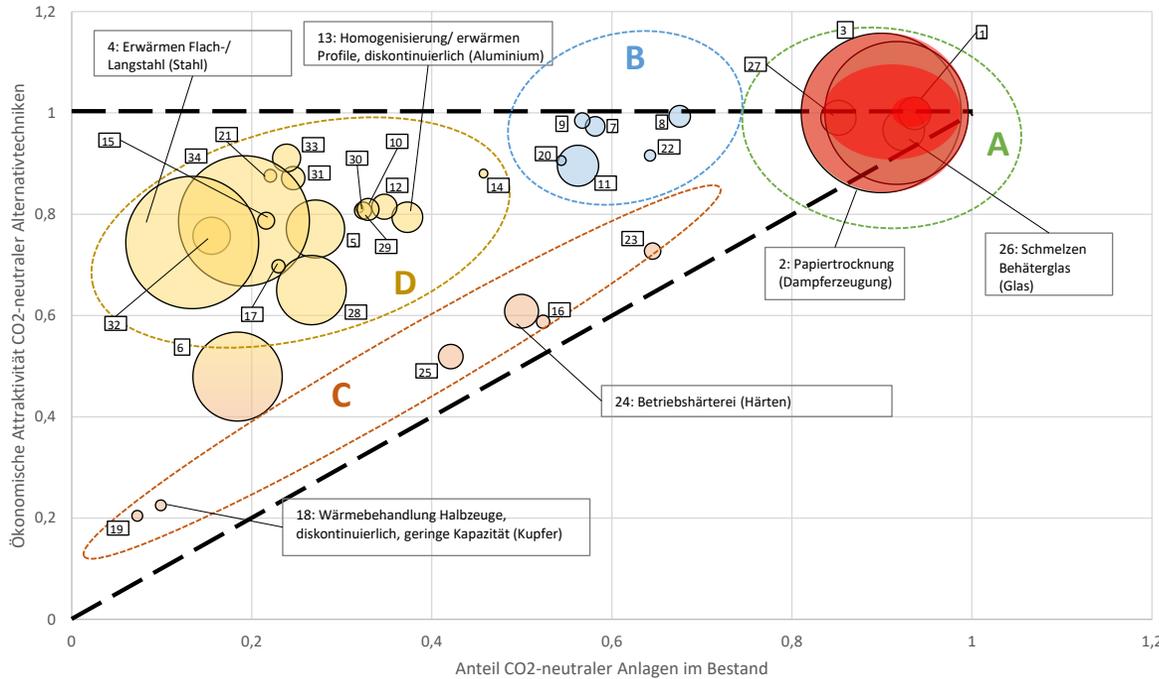
# Erläuterung Diffusionsabbildung



## ■ Kernbotschaften

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

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



## Transformationszenario, 2040

- 300€/t<sub>CO<sub>2</sub></sub>
- Strompreis 50-65€/MWh

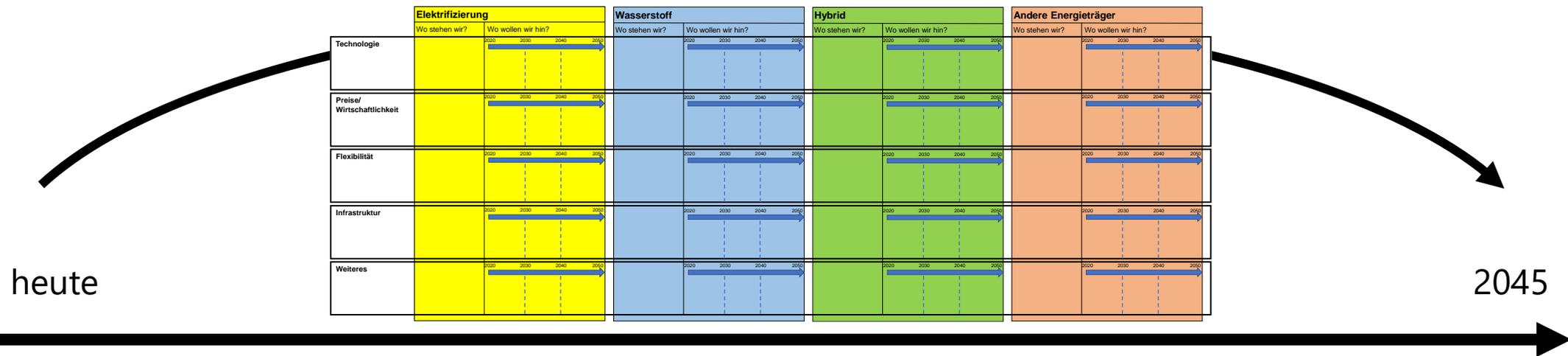
- A ("Advantaged": im Vorteil): Anwendungen, die früh wirtschaftlich attraktive CO<sub>2</sub>-neutrale Techniken zur Verfügung haben und durch geringe Anlagenlebensdauern vergleichsweise schnell wechseln können. Diese Anwendungen können dadurch im maximalen Reformpaket eine (beinahe) vollständige Dekarbonisierung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

---

# Methodik des Workshops

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

	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 Politisch      Wirtschaftlich		Notw. Rahmenbedingungen Politisch      Wirtschaftlich		Notw. Rahmenbedingungen Politisch      Wirtschaftlich		Notw. Rahmenbedingungen Politisch      Wirtschaftlich	
	Notwendige Partner		Notwendige Partner		Notwendige Partner		Notwendige Partner	



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

Elektrodenkessel		Hochtemperaturwärmepumpe		Wasserstoffbefeuerter Kessel		Hybrid		Sonstige	
F&E-Bedarf	Hindernisse								
Notwendige Rahmenbedingungen		Notwendige Rahmenbedingungen		Notwendige Rahmenbedingungen		Notwendige Rahmenbedingungen		Notwendige Rahmenbedingungen	
Politisch	Wirtschaftlich								
Notwendige Partner		Notwendige Partner		Notwendige Partner		Notwendige Partner		Notwendige Partner	

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

	Elektrodenkessel		Hochtemperaturwärmepumpe		Wasserstoffbefeuerter Kessel		Hybrid		Sonstige	
	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?	Wo stehen wir?	Wo wollen wir hin?
Technologie										
Preise/ Wirtschaftlichkeit										
Flexibilität										
Infrastruktur										
Weiteres										

---

miro board

<https://miro.com/app/board/uXjVNvQUIII=/>

*siehe auch Link im Chat*

---

Pause – 10 Minuten

---

# Gemeinsame Diskussion und interaktives Arbeiten

# Ergebnisse Miroboard Teil 1

Elektrodenkessel		Hochtemperaturwärmepumpe		Wasserstoffbefeuerter Kessel		Hybrid		Sonstige	
F&E-Bedarf	<b>Hindernisse</b> Infrastruktur Netzentgelte (speziell Spitzenlast bzw. Leistungspreis) Strompreis	F&E-Bedarf	<b>Erzeugungskapazität</b> Entwicklung ausreichend hoher Abwärmepotenziale (Temp. & Menge) Netzentgelte (speziell Spitzenlast bzw. Leistungspreis)	F&E-Bedarf	Lautstärke / Schallschließung der Kessel	Hindernisse	<b>H2 Energie Kosten</b> Verfügbarkeit von H2	F&E-Bedarf	Entwicklung von Systemlösungen / Standardisierung
<b>Notwendige Rahmenbedingungen</b>		<b>Notwendige Rahmenbedingungen</b>		<b>Notwendige Rahmenbedingungen</b>		<b>Notwendige Rahmenbedingungen</b>		<b>Notwendige Rahmenbedingungen</b>	
Politisch	Wirtschaftlich	Politisch	Wirtschaftlich	Politisch	Wirtschaftlich	Politisch	Wirtschaftlich	Politisch	Wirtschaftlich
Planbar hohe CO2-Preise	Niedriger Spread zwischen Strom- und Gaspreis	Planbar hohe CO2-Preise	Niedriger Spread zwischen Strom- und Gaspreis	Priorisierung von "sinnvollen" H2-Anwendungen (HT)	Konsumerspezifische Preise zu realisieren		Anreize für rentable Geschäftsmodelle	Abwärmennutzung (zur Dampferzeugung) sollte stärker honoriert/gefördert werden	
<b>Notwendige Partner</b>		<b>Notwendige Partner</b>		<b>Notwendige Partner</b>		<b>Notwendige Partner</b>		<b>Notwendige Partner</b>	
Politik Netzentgelte bzw. deren Festlegung	ÜNB	Politik Netzentgelte bzw. deren Festlegung	ÜNB	Politik		Flexibilitäts-Dienstleister	ÜNB		

# Ergebnisse Miroboard Teil 2

	Elektrodenkessel		Hochtemperaturwärmepumpe		Wasserstoffbefeuerter Kessel		Hybrid		Sonstige	
	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?	Wo stehen wir?	Wo wollen wir hin?
Technologie										
Preise/ Wirtschaftlichkeit										
Flexibilität										
Infrastruktur										
Weiteres										

---

Zusammenfassung und nächste Schritte...

# Vielen Dank für Ihre Teilnahme und Ihr Interesse!

Die folgenden Branchen wurden untersucht:

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

Auftraggeber



Forschungsstellen



**Ansprechpartner und Kontakt**

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

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



**Ansprechpartner und Kontakt**

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

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

