

---

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

---

7. Jahresveranstaltung der Initiative Energieeffizienz- und Klimaschutz-Netzwerke

Berlin, 21.09.2023

*Matthias Rehfeldt, Christian Schwotzer*

---



Foto: NLMK Group

# Agenda

---

- Begrüßung
- Ziel und Vorgehen heute
- Technik- und Branchenanalyse ~20`
- Studienüberblick und ausgewählter Wirtschaftlichkeitsaspekt ~20`
- Diskussion und Austausch ~45`



# Einleitung

---

- Wir stellen nur ausgewählte Thesen vor
- Zwei Teilbereiche:
  - Technik und Branchenanalyse
  - Wirtschaftlichkeits- und Diffusionsmodellierung

Unser Ziel heute ist vorrangig der Austausch mit und unter Ihnen!

Überlegen/notieren Sie sich gerne während der Impulsvorträge alle Fragen.



---

# TECHNISCHES POTENTIAL FÜR EINE CO<sub>2</sub>-NEUTRALE PROZESSWÄRMEERZEUGUNG IN DER INDUSTRIE

---

7. Jahresveranstaltung der Initiative Energieeffizienz- und Klimaschutz-Netzwerke  
Christian Schwotzer

---



Foto: NLMK Group

# 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



*Letzter Arbeitsstand:  
Umfang „Technik“ ca. 350 Seiten (zzgl. 100 Seiten Anhang)  
Gesamtbericht ca. 685 Seiten (inkl. Anhang)*


# Transformationsstrategie für den Industriesektor - Wo steht die Diskussion aktuell?

## Stand der Diskussion:

- Für die CO<sub>2</sub>-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.
- Kreislaufwirtschaft, Energie- und Materialeffizienz und CCUS werden wichtige Beiträge leisten, es sind dennoch sehr große Mengen CO<sub>2</sub>-neutrale Energien nötig
- In der Prozesswärmeerzeugung gibt es große Wissenslücken, da viele Studien nur die größten Prozesse anschauen

## ■ Wasserstoff für die CO<sub>2</sub>-neutrale Prozesswärme?

- Agora Industriegewende (2021 & 2022):

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

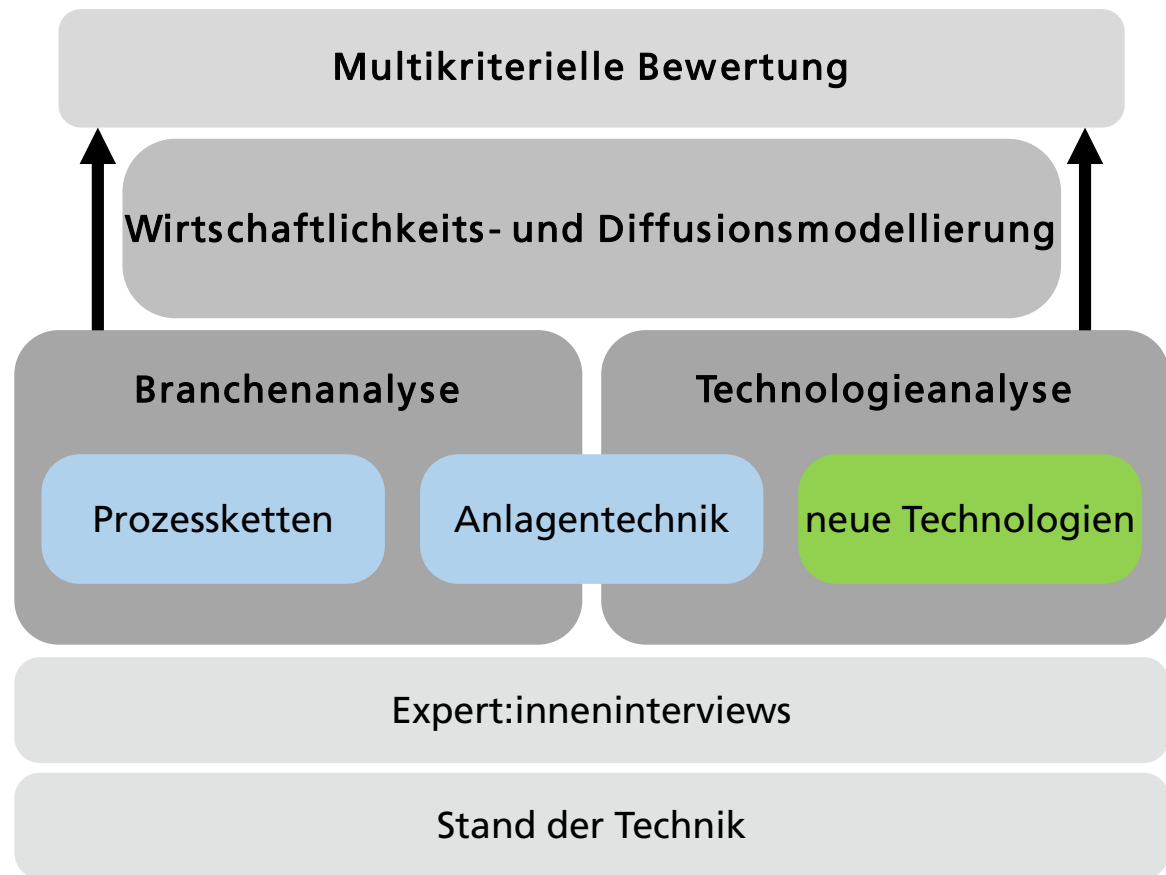
Kaum untersucht  
Stark Abhängig von Branche und Prozess  
Kleine klare Strategie  
Große Unsicherheiten für Unternehmen

# Zielsetzung der Studie

---

- **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, 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**

# Alle Arbeiten bauen aufeinander auf und münden einem Transformationskonzept aus 11 Thesen



**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.

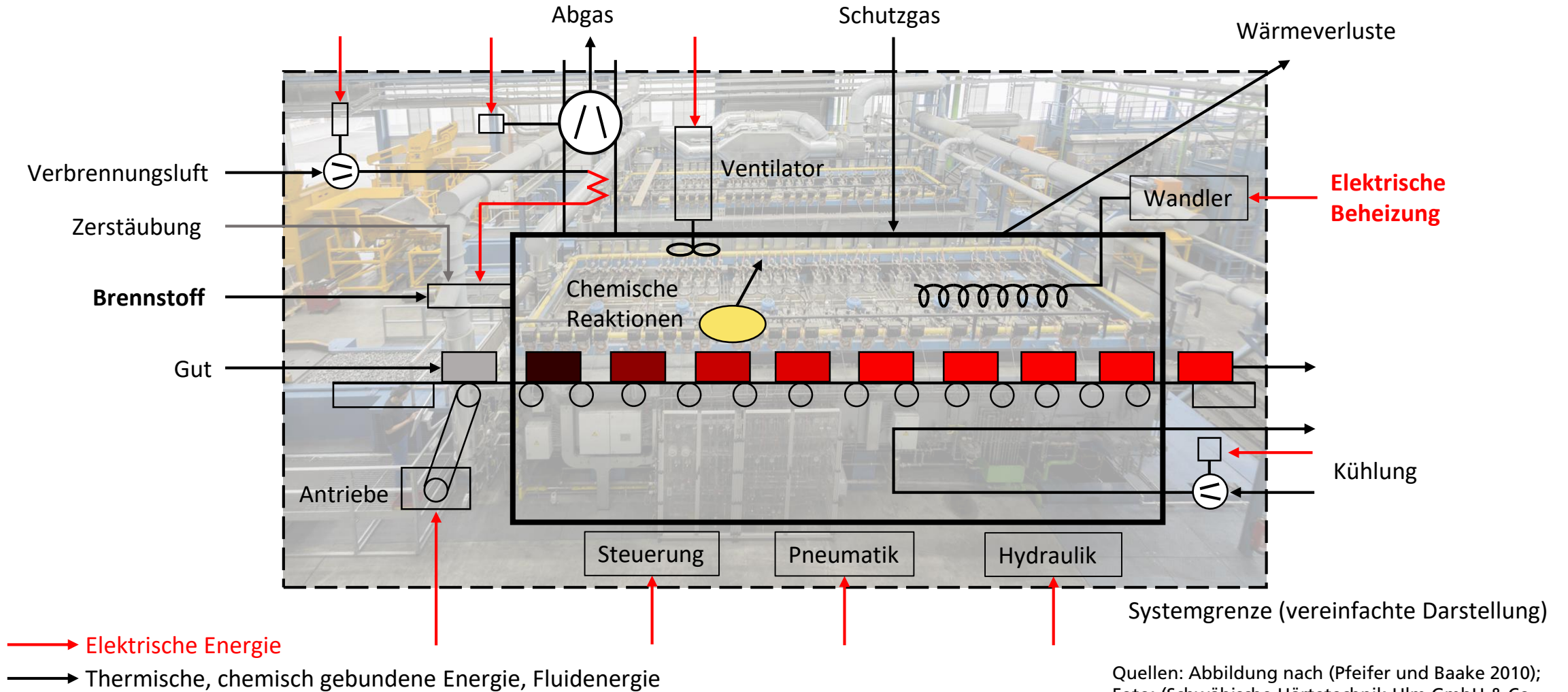
**These 9:** Aufgrund langer Modernisierungszyklen ist die Gefahr von stranded investments hoch.

**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.

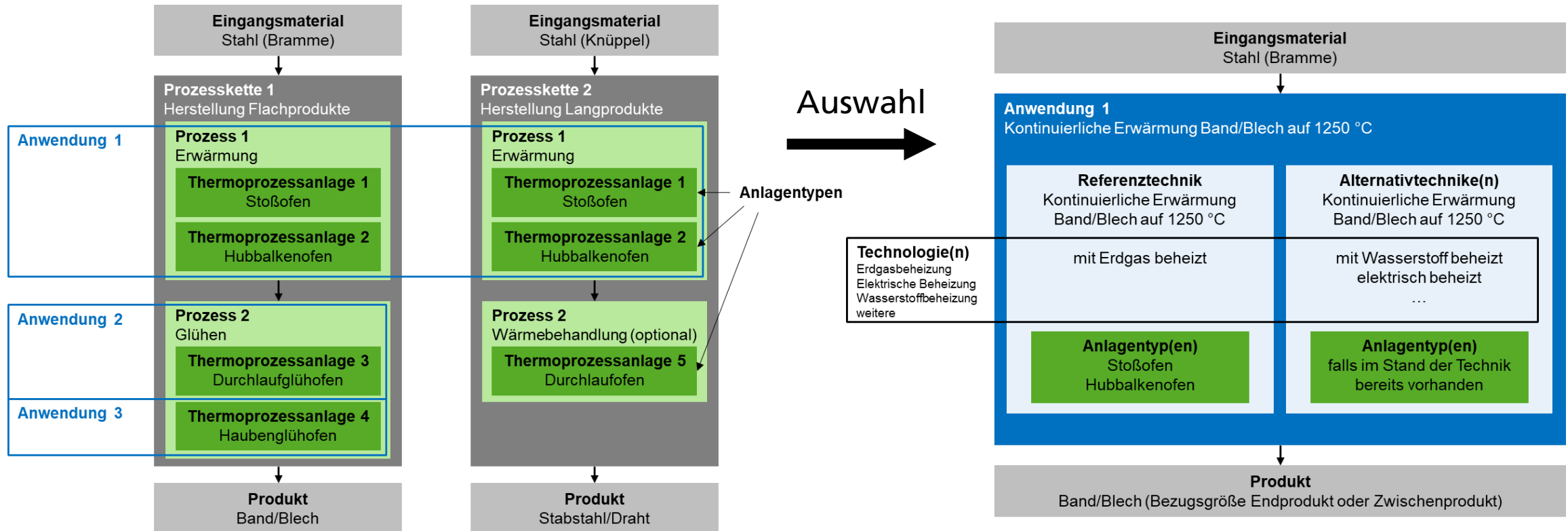


# Besondere Herausforderung der Betrachtungen: Thermoprozessanlagen sind komplexe technische Systeme

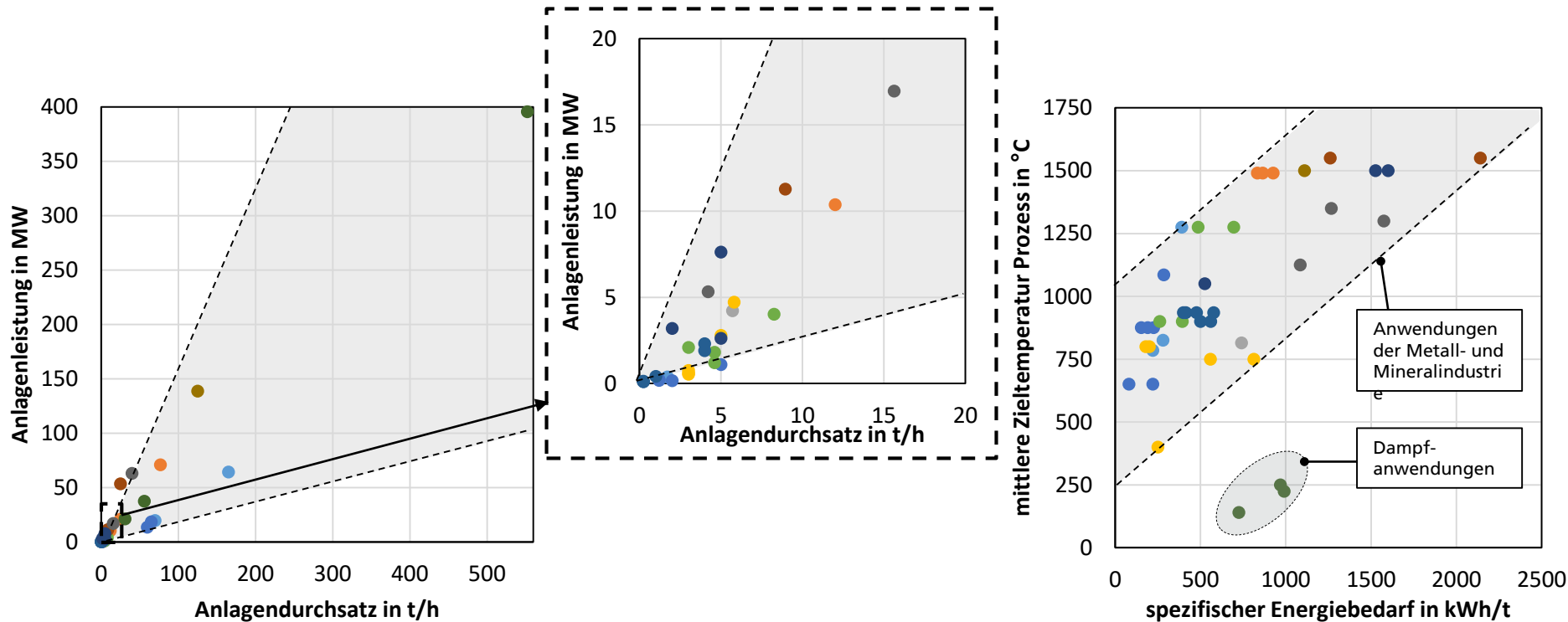


Quellen: Abbildung nach (Pfeifer und Baake 2010);  
Foto: (Schwäbische Härtetechnik Ulm GmbH & Co  
KG 2021)

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

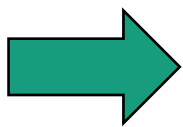


# These 1: Der Anlagenpark der Industrieöfen ist heterogen



## Referenztechniken\* der Anwendung

- 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



Sehr heterogener Anlagenpark, viele „kleine“ Anlagen  
 Großteil der Anlagen mit < 20 MW Leistung und < 20 t/h Durchsatz  
 Prozesstemperaturen zwischen ca. 250 – 1750 °C

Detaillierte Annahmen, Legende und Quellen siehe Bericht

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

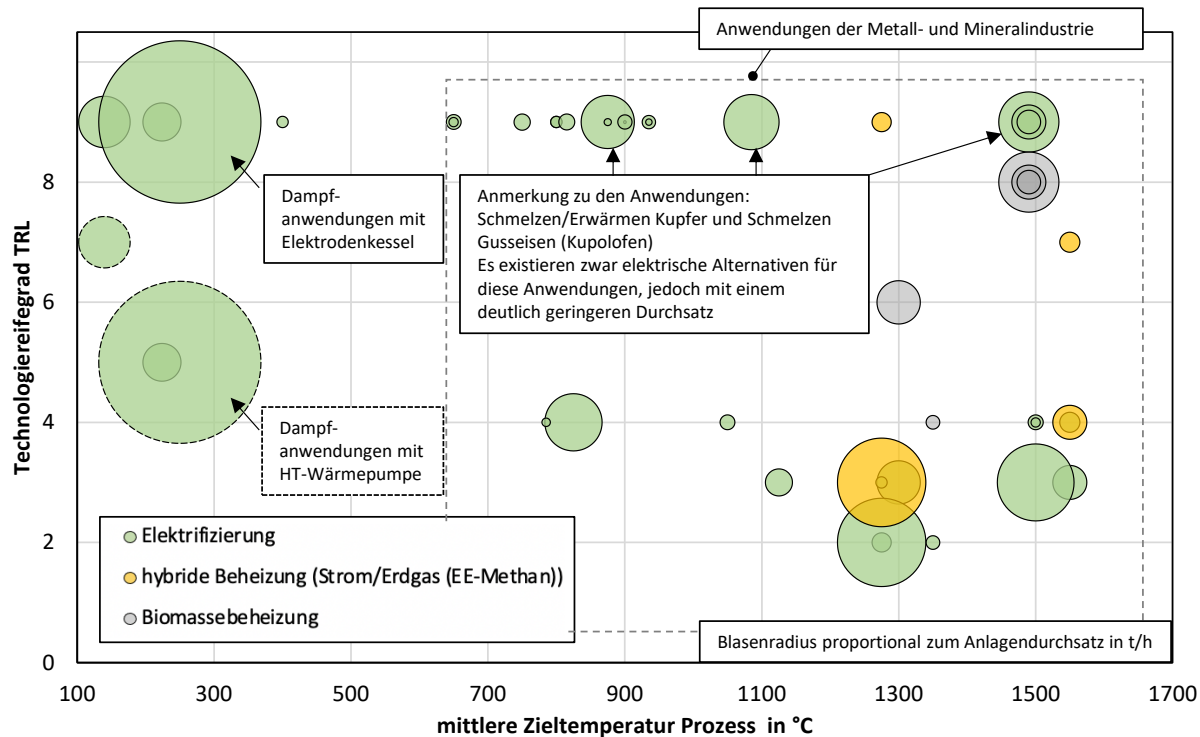
- **Elektrische Beheizungstechnologien** sind für einige Anwendungen der **Metallindustrie** bereits Stand der Technik (TRL = 9), sie werden im Anlagenpark in Deutschland jedoch vielfach nicht eingesetzt.
- **Elektrische Beheizungstechnologien** sind in für die Anwendungen der **Mineralindustrie** nicht Stand der Technik vorhanden (TRL < 3). Insbesondere die hohen Prozesstemperaturen für das Brennen und Schmelzen > 1200 °C lässt sich gegenwärtig mit elektrischen Beheizungstechnologien nicht erreichen.
- **Hybride Beheizungstechnologien (anteilige Elektrifizierung)** sind für Anwendungen mit hohen Prozesstemperaturen von Bedeutung. Für spezielle Anwendungen (bspw. Glas (als elektrische Zusatzheizung), oder in der Umformtechnik) sind sie Stand der Technik. Insbesondere für Anwendungen mit großen Kapazitäten (Glas, Zement, Stahl-Walzwerke) werden diese Konzepte jedoch (noch) nicht eingesetzt (TRL < 3 – 7).
- Einsatz von **Wasserstoff** besitzt für nahezu alle betrachteten Anwendungen aus technischer Sicht großer Potential. Mangels Verfügbarkeit von Wasserstoff konnte die Einsatzfähigkeit in Pilot- oder Demonstrationsanlagen bisher vielfach (noch) nicht ausreichend erprobt werden (TRL < 2 – 5). Einzelne Komponenten (bspw. Brenner) haben vielfach jedoch bereits ein deutlich höheres TRL.
- Beim Einsatz von **Biomasse** ist vor allem die Qualität des Brennstoffes ausschlaggebend. Der Einsatz wurde im großtechnischen Maßstab für die betrachteten Anwendungen bisher nicht erprobt (TRL < 4 – 8).
- Der Einsatz von **EE-Methan** ist aus technischer Sicht dem von Erdgas gleichzusetzen (TRL = 9).

Anmerkungen:  
 Fokus der Betrachtungen lag auf der Analyse des technischen Potentials einer vollständigen Elektrifizierung als PtH Alternative und dem Einsatz von Wasserstoff als PtG Alternative.  
 „n.v.“: Keine signifikanten F&E-Aktivitäten für diese Anwendung vorhanden.  
 „n.b.“: Anwendung wurde nicht betrachtet. Das TRL der Technologiekombination wird gleich oder geringer als das der Technologie mit jeweils geringeren TRL eingeschätzt.  
 Weitere Anmerkungen siehe Bericht.

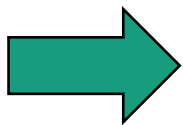
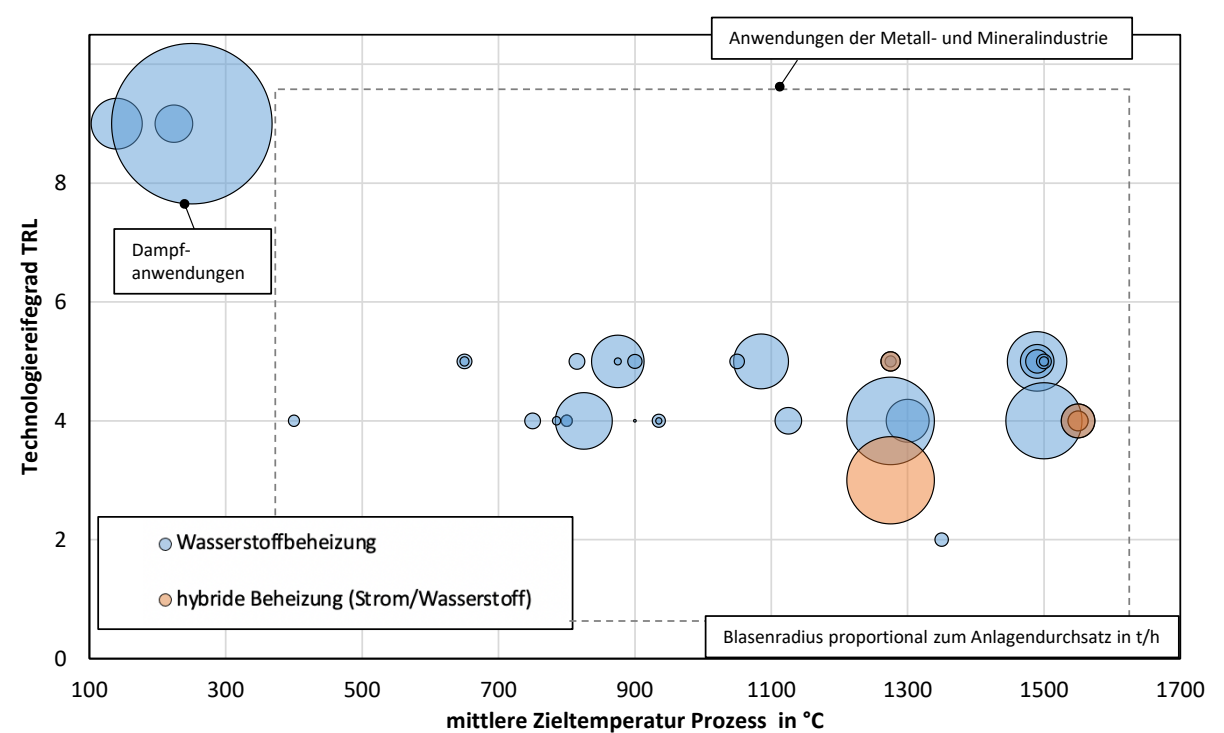
	Branche und Anwendung (zusammengefasst)																	
	Aluminium: Schmelzen, Erwärmen und Wärmebehandlung	Gießerei-Industrie: Schmelzen Al-Formguss	Kupfer: Schmelzen, Erwärmen und Wärmebehandlung	Gießerei-Industrie: Schmelzen Gusseisen	Härterechnik: Aufkohlen und Austenitisieren	Umformtechnik: Erwärmung Stahlblechzuschnitte	Stahl-Walzwerke: Wärmebehandlung	Keramik- und Ziegelindustrie: Brennen Ziegel und Feuerfest	Glasindustrie: Schmelzen Behälterglas	Glasindustrie: Schmelzen Flachglas	Kalk: Brennen im GGR-Ofen	Kalk: Brennen im Drehrohrofen	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					
<b>Elektrifizierung</b>	9	9	9	9	9	9	< 4	< 4	4/9 <sup>1)</sup>	< 3	< 3	< 3	< 3	< 3	< 2	< 2	< 2	9 <sup>7)</sup>
<b>Wasserstoffbeheizung</b>	< 4	< 5	< 5	< 5	< 4	< 5	< 4	< 5	< 4	< 4	< 4	< 4	< 4	< 5	< 5	< 4	< 2	9
<b>Biomassebeheizung</b>	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>
<b>Erdgas-/EE-Methanbeheizung</b>	(9)	(9)	(9)	< 8 <sup>3)</sup>	(9)	(9)	(9)	(9)	(9)	(9)	(9)	< 4	n.b.	(9)	(9)	(9)	n.v.	n.v.
<b>hybride Beheizung (Strom/Erdgas (EE-Methan))</b>	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.
<b>hybride Beheizung (Strom/Wasserstoff)</b>	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.
<b>Hybride Beheizung (Brennstoffmix/Strom)</b>	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.
<b>Hybride Beheizung (Biomasse/H<sub>2</sub>/Strom)</b>	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.

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

Technologiereifegrad TRL für die Elektrifizierung, hybride Beheizung (Strom/Erdgas (EE-Methan) und Biomasse in Abhängigkeit von Anlagendurchsatz und Prozesstemperatur



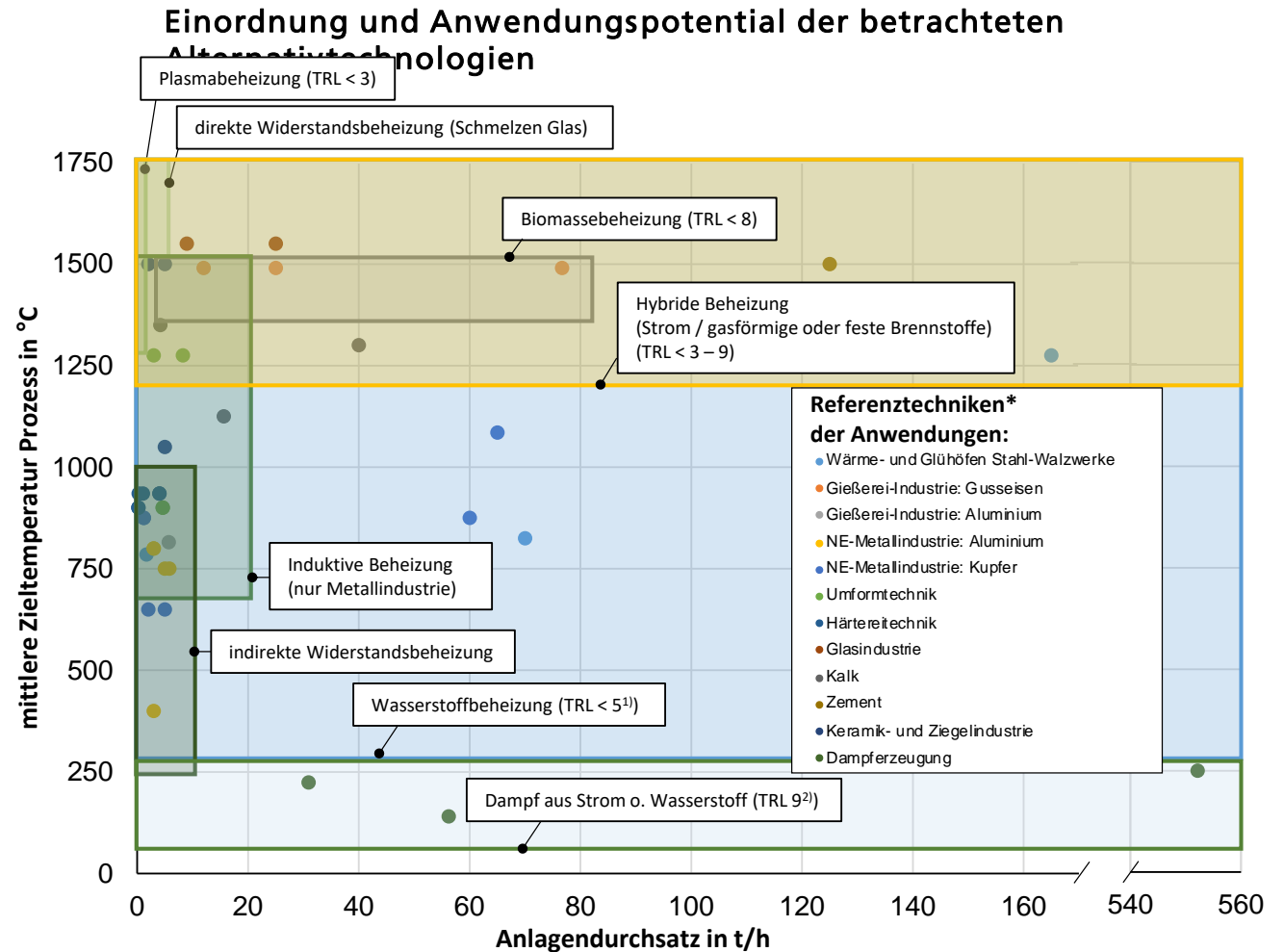
Technologiereifegrad TRL für die Wasserstoffbeheizung und hybride Beheizung (Strom/H<sub>2</sub>) in Abhängigkeit von Anlagendurchsatz und Prozesstemperatur



Während elektrische PtH-Alternativtechnologien für einige Anwendungen bereits zum Stand der Technik gehören, wurde der Einsatz von Wasserstoff für Gesamtsysteme bisher noch nicht demonstriert.

# These 6: Elektrifizierung ist bei vielen Anwendungen mit niedrigeren Temp. 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.
- 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).

# 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

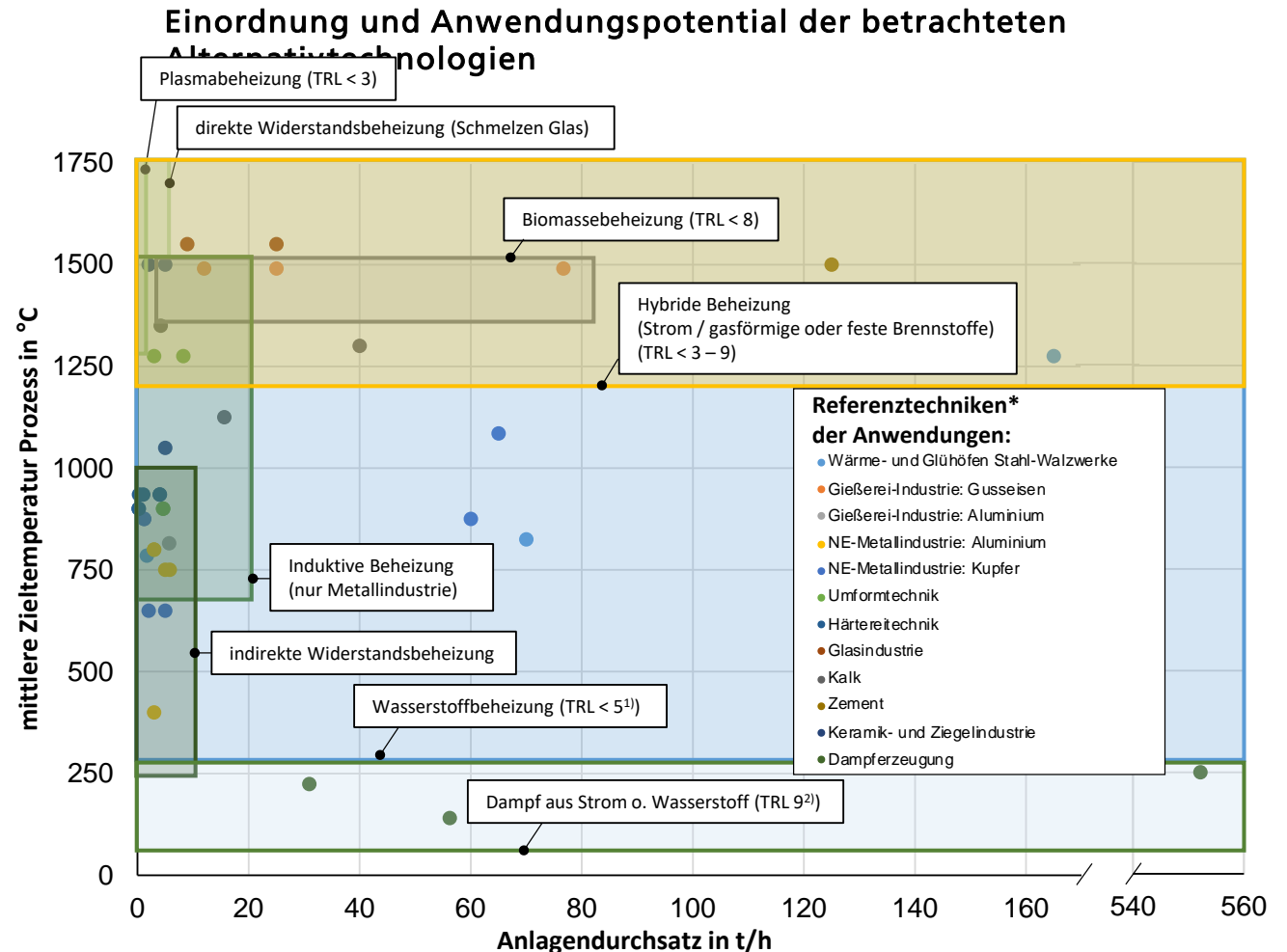
Tel.: +49 (0) 241 80-26068  
Fax: +49 (0) 241 80-22289  
E-Mail: [schwotzer@iob.rwth-aachen.de](mailto:schwotzer@iob.rwth-aachen.de)  
Web: [www.iob.rwth-aachen.de](http://www.iob.rwth-aachen.de)





# Diskussion: Welche strategische Bedeutung haben Wasserstoff und elektrische Beheizungskonzepte im Unternehmen?

- 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.



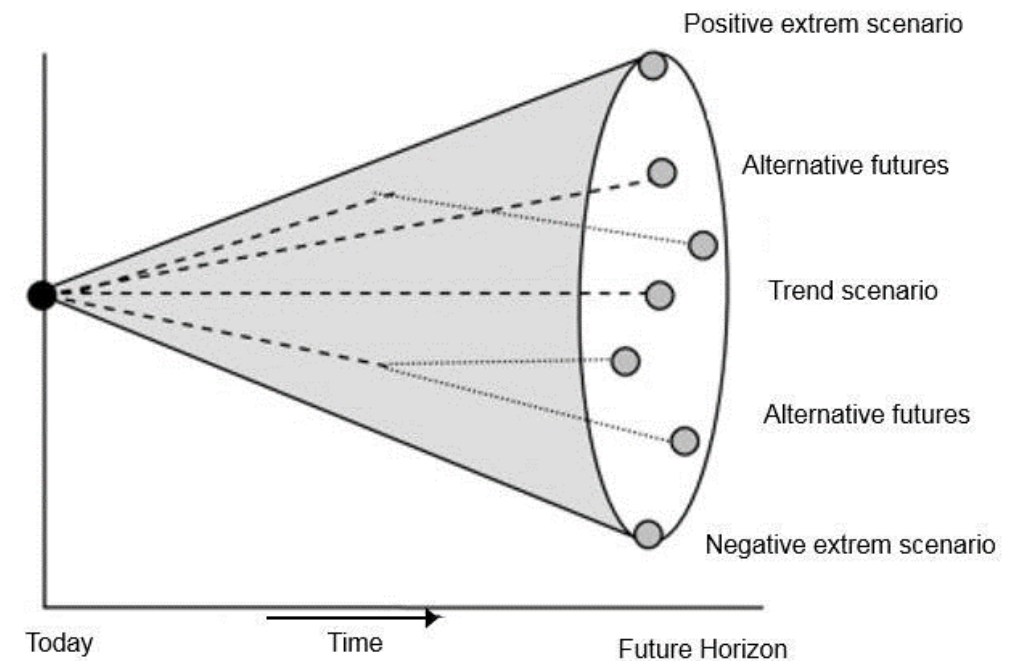
# Diskussion: Welche Bedeutung hat die Abwärmenutzung?

## Abwärmepotential unterschiedlicher Anwendungen (exemplarisch)

Anwendung	Anlagentypen	Technologie Referenztechnik und elektrische Alternative im Bestand	Mittlere Produktionsmenge je Anlage in Tsd. t/a	Mittlere Prozesstemperatur	Abwärmemedium	Mittlere Temperatur Abwärmemedium	Mittlerer Volumenstrom Abwärme in $m^3_{\text{Abgas}}/t_{\text{Produkt}} \text{ (STP*)}$
STA_ke	Hubbalkenofen, Stoßofen	Erdgasbeheizung	1260,0	1150 - 1400°C	Verbrennungsabgas	400 - 450°C	≈ 450
STA_kw	Durchlaufglühöfen	Erdgasbeheizung	503,5	750 - 900°C	Verbrennungsabgas	400 - 450°C	≈ 300
STA_dW	Haubenglühöfen	Erdgasbeheizung	9,5	670 - 900°C	Verbrennungsabgas	200 - 250°C	≈ 250
ALU_dH	Kammerherdofen	<b>Erdgasbeheizung</b>	45,0	1000 - 1200°C	Verbrennungsabgas	≈ 300°C	≈ 1050
ALU_dH	Kammerherdofen	<b>Elektrifizierung</b>	27,0	1000 - 1200°C	n.v.	-	-
ALU_kO	Stoßofen, (Rollen-)durchlaufofen	Erdgasbeheizung	16,0	550 - 1050°C	Verbrennungsabgas	≈ 200°C	≈ 350
ALU_dO	Tief-, Kammerofen, Bolzenerwärmung	Erdgasbeheizung	18,0	550 - 1050°C	Verbrennungsabgas	≈ 200°C	≈ 300
ALU_kw	Schwebebandofen, Durchlaufofen	Erdgasbeheizung	18,0	350 - 450°C	Verbrennungsabgas	≈ 150°C	≈ 350
KUP_ks	Kathodenschachtofen	Erdgasbeheizung	468,0	1085 - 1200°C	Verbrennungsabgas	120 - 160°C	≈ 400
KUP_ke1	Hubherd-, Hubbalken-, Rollenherdofen	<b>Erdgasbeheizung</b>	8,0	650 - 1100°C	Verbrennungsabgas	150 - 500°C	≈ 200
KUP_ke1	Hubherd-, Hubbalken-, Rollenherdofen	<b>Elektrifizierung</b>	8,0	650 - 1100°C	n.v.	-	-
UMF_ke1	Drehherdofen, Durchlaufofen	Erdgasbeheizung	46,1	1250 - 1300°C	Verbrennungsabgas	400 - 450°C	≈ 800
UMF_de	Kammer-, Herdwagenschmiedeofen	Erdgasbeheizung	11,7	1250 - 1300°C	Verbrennungsabgas	400 - 450°C	≈ 850

# WASSERSTOFF UND CO2-NEUTRALE PROZESSWÄRME – POTENTIALE UND WIRTSCHAFTLICHKEIT

## 7. Jahresveranstaltung der Initiative Energieeffizienz- und Klimaschutz-Netzwerke Matthias Rehfeldt



---

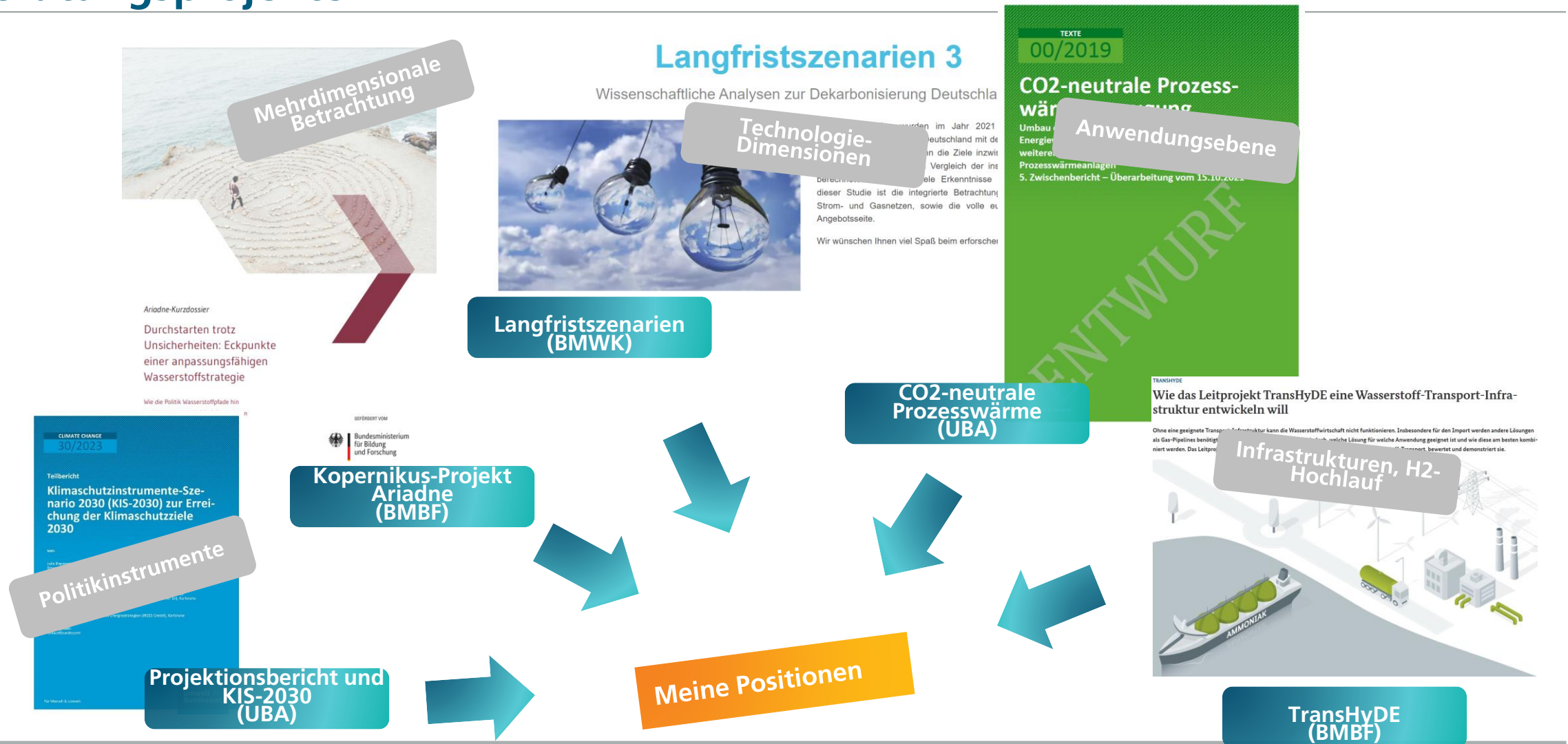
# AGENDA

---

- Ausgewählte Studien zu Wasserstoff und Prozesswärme
  
- Kurzer Blick in die Studie „CO<sub>2</sub>-neutrale Prozesswärmeerzeugung“

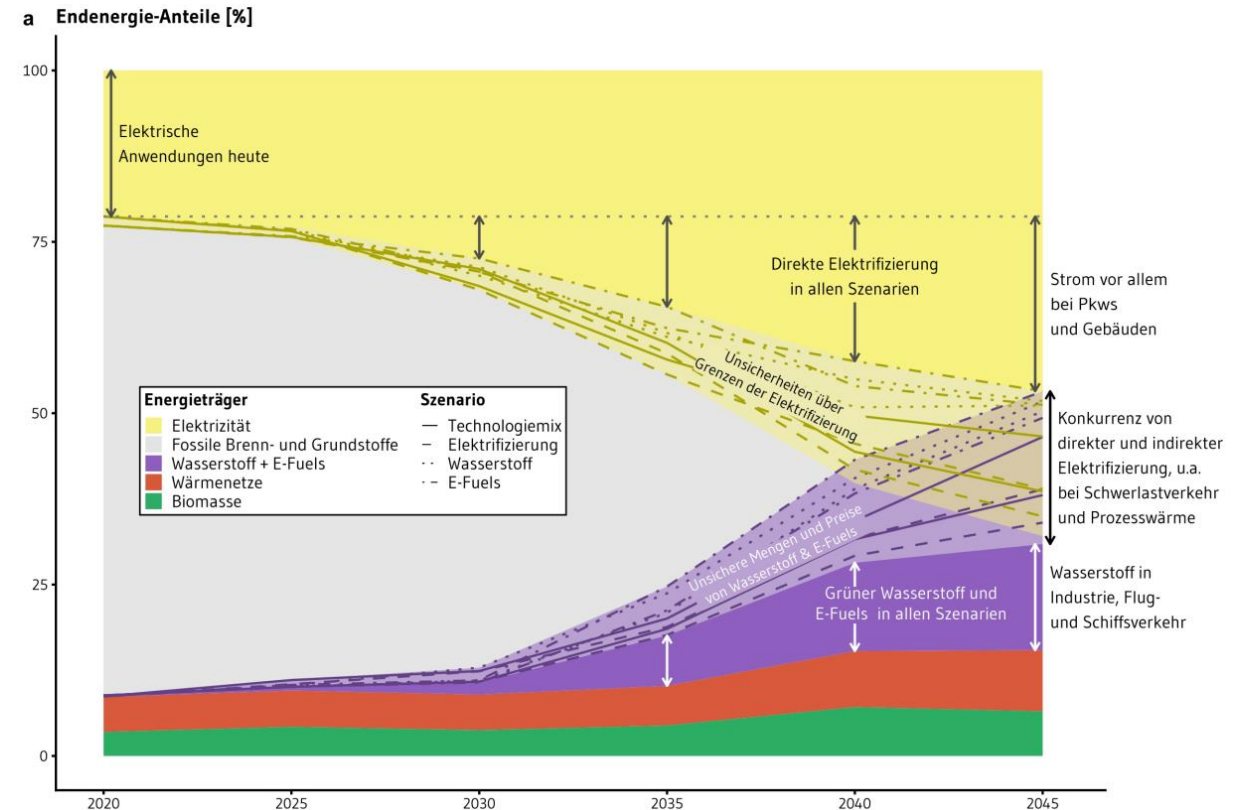
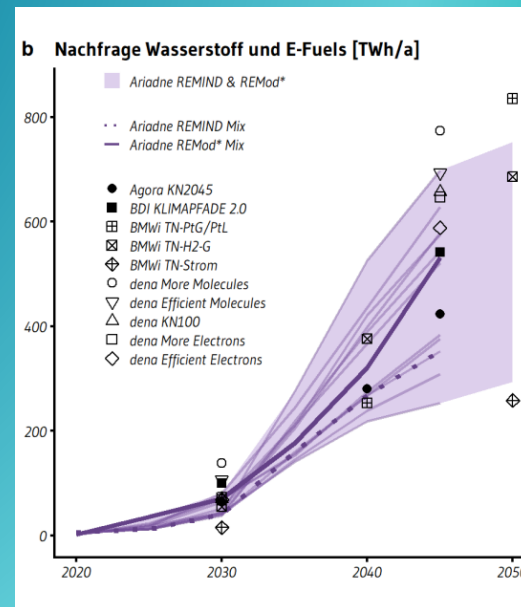


# Meine Positionen entstehen aus Mitarbeit in Forschungs- und Beratungsprojekten



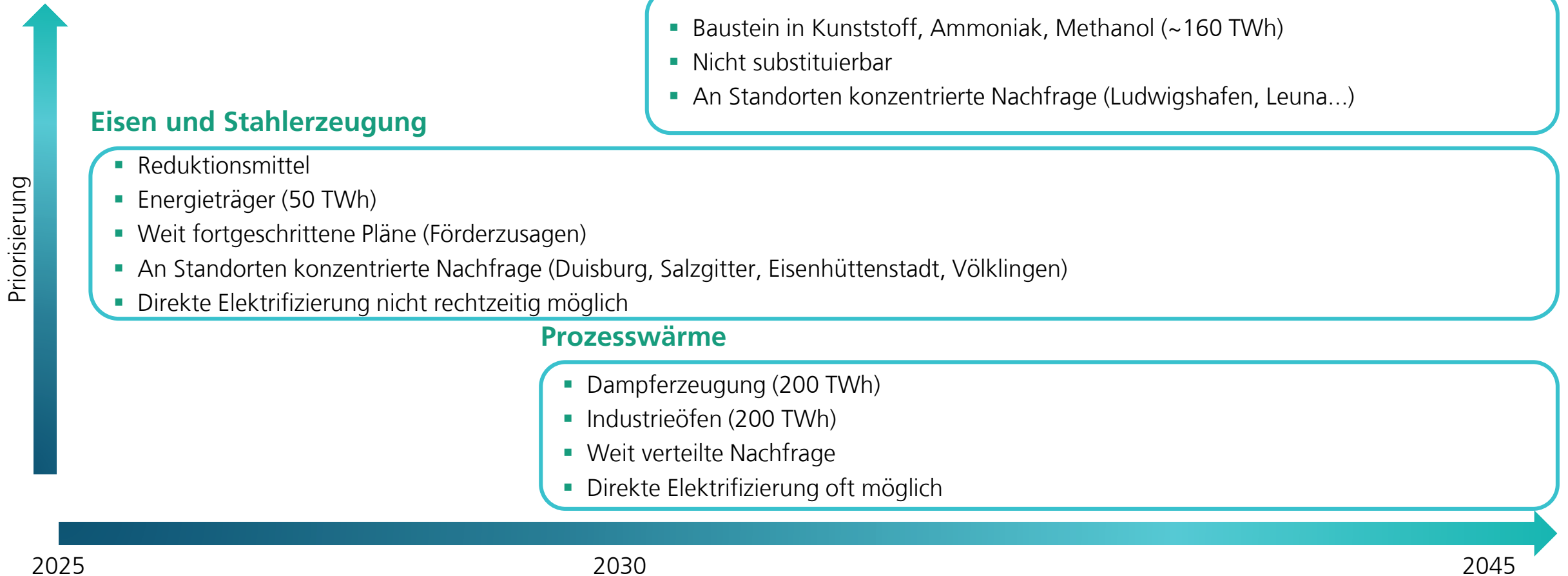
# Die Zukunft der Wasserstoffnutzung ist noch unsicher

- Mehrere Energiesystemstudien setzen sich mit Wasserstoff auseinander
- Es entstehen große Spannbreiten der Nutzung (~200 – 800 TWh)
- Unsicherheit betrifft etwa 30% der Endenergie



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

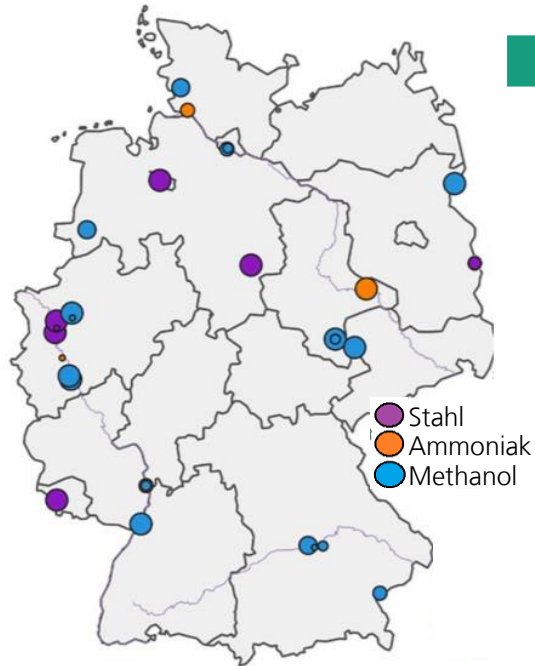
# Für die Industrie sind drei Anwendungsbereiche identifizierbar



Fraunhofer ISI, Consentec GmbH, ifeu, TU Berlin (2021):  
Langfristszenarien. <https://www.langfristszenarien.de/enertile-explorer-de/>  
Ähnlich TransHyDE Szenarien (in Bearbeitung)

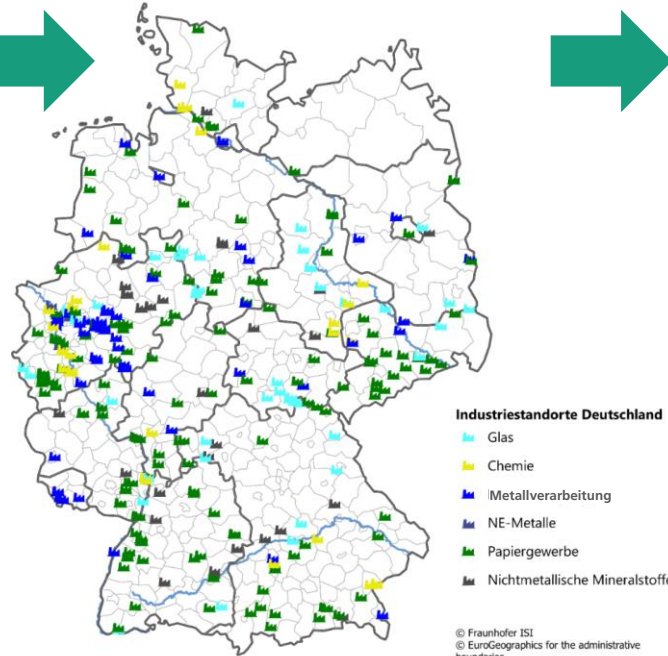
# Priorisierung von industriellen H2-Anwendungen erzeugt unterschiedliche Welten

Stahl und Grundstoffchemie

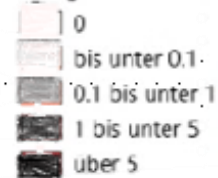


~240 TWh  
Wasserstoffbedarf

Weitere energieintensive

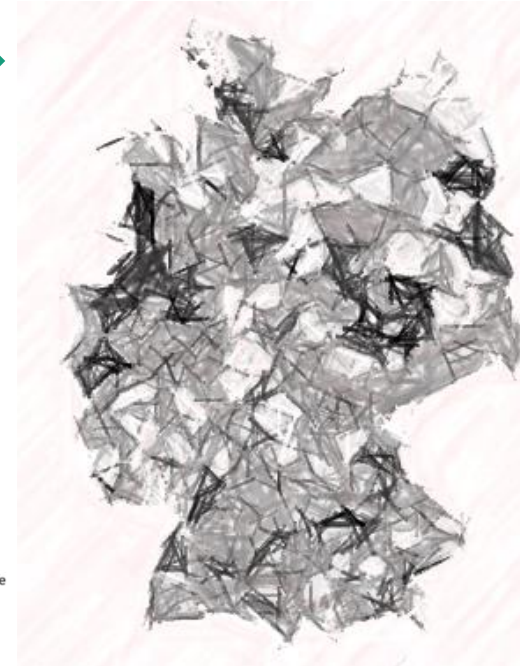


Wasserstoffnachfrage 2050 in TWh

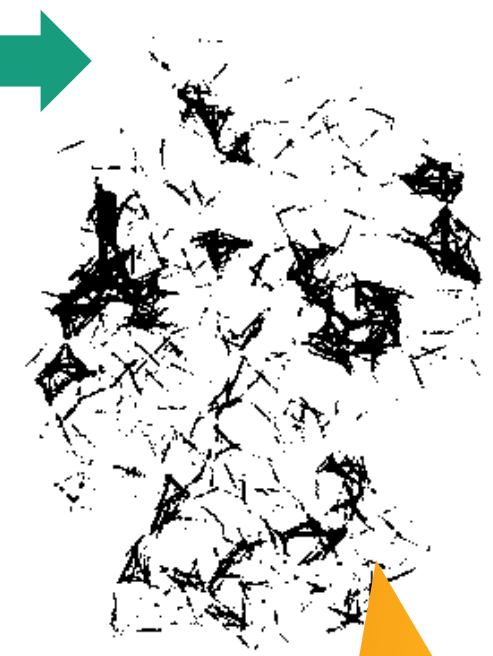


~440 TWh  
Wasserstoffbedarf

Breite Nutzung



Clusterbildung



Zugang zu Wasserstoff könnte lokal/regional gestaffelt sein



# Thesen aus „CO<sub>2</sub>-neutrale Prozesswärmeerzeugung“



**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.

# These 8: Umstellung auf CO<sub>2</sub>-neutrale Techniken ist mit höheren Energiekosten verbunden

## Hintergrund

Investitionsförderung ist ein wichtiger Baustein der Transformationsstrategie, aber nicht ausreichend. **Entscheidend sind die Energiekosten.** Hier gilt es einen Marktrahmen zu schaffen, der den wirtschaftlichen Betrieb CO<sub>2</sub>-neutraler Techniken ermöglicht und Investitionen wirtschaftlich attraktiv macht. Konkret heißt dies, dass CO<sub>2</sub>-neutraler Wasserstoff und **Strom gegenüber Erdgas konkurrenzfähig** sein müssen.

## Belege in Bericht/Berechnungstool

- Energiekosten erzeugen >75% der Gesamtkosten einer Anlage.
- Energiekosten bei theoretischer vollständiger Umstellung (Referenzszenario) um Faktor 1,5 - 3 erhöht.
- Für Diffusion CO<sub>2</sub>-neutraler Anlagen ist ein Strompreis von 4-5€ct/kWh und hohes CO<sub>2</sub>-Preisniveau notwendig (->300€/t). Dann entsteht entscheidungsrelevanter Kostenvorteil.
- Entkopplung Diffusion von Energiekosten könnte Hemmnisse abbauen. [These 10]

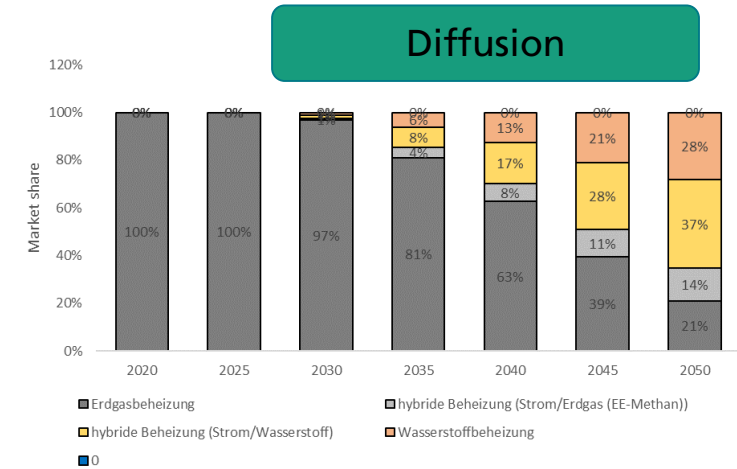
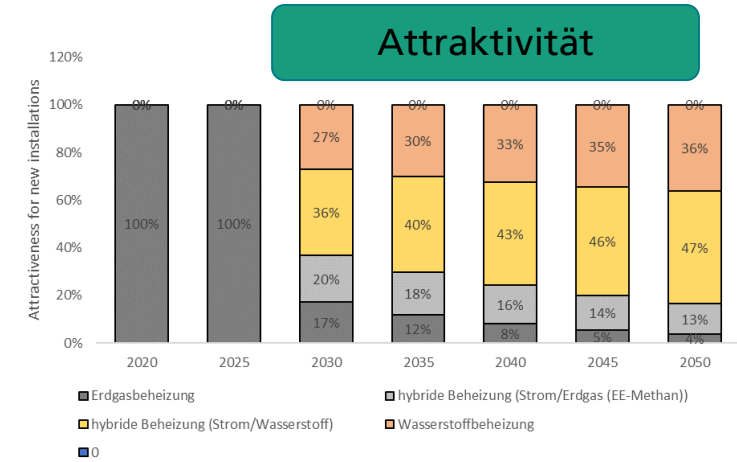
# These 8 - Beispiel für Energiekostenverschiebung

## Kontinuierliche Wärmebehandlung Flachstahl

Erdgasbeheizung				
Jahr	2020	2030	2040	2050
Aktivität [t]	1,260,000	1,260,000	1,260,000	1,260,000
Annuität Investition Neubau [EUR/t]	3.08	3.08	3.08	3.08
Annuität Investition Modernisierung [EUR/t]	1.54	1.54	1.54	1.54
CO2-Kosten/ Umweltkosten [EUR/t]	8.85	16.81	22.38	27.97
Energiekosten [EUR/t]	8.94	13.52	13.69	13.71
O&M Neubau [EUR/t]	2.33	2.33	2.33	2.33
O&M Modernisierung [EUR/t]	2.33	2.33	2.33	2.33
Wärmegestehungskosten Neubau [EUR/t]	23	36	41	47
Wärmegestehungskosten Modernisierung [EUR/t]	22	34	40	46

Elektrifizierung				
Jahr	2020	2030	2040	2050
Aktivität [t]	176,000	176,000	176,000	176,000
Annuität Investition Neubau [EUR/t]	5.68	5.68	5.68	5.68
Annuität Investition Modernisierung [EUR/t]	1.99	1.99	1.99	1.99
CO2-Kosten/ Umweltkosten [EUR/t]	-	-	-	-
Energiekosten [EUR/t]	19.08	24.60	25.01	25.18
O&M Neubau [EUR/t]	3.88	3.88	3.88	3.88
O&M Modernisierung [EUR/t]	3.88	3.88	3.88	3.88
Wärmegestehungskosten Neubau [EUR/t]	-	34	35	35
Wärmegestehungskosten Modernisierung [EUR/t]	-	30	31	31

Reduktion der Kostendifferenz ist zentral. Das ist von unten (CO2-Preis) und von oben (Strompreis) möglich. Beides scheint notwendig zu sein.



# 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)



# Diskussionspunkte?

- Verständnisfragen?
- Fragen zur Methodik?
  
- Weitere technologische Ansätze?
- Erfahrungsberichte aus der Praxis
- Erwartungen an Wasserstoffverfügbarkeit
- Erwartungen an Industriestrompreis
- Ideales Zielbild?
  
- Implikationen für Politikinstrumente
- Zeitlicher Ablauf der Transformation

**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.

# Wirtschaftlichkeits- und Diffusionsanalyse



**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.

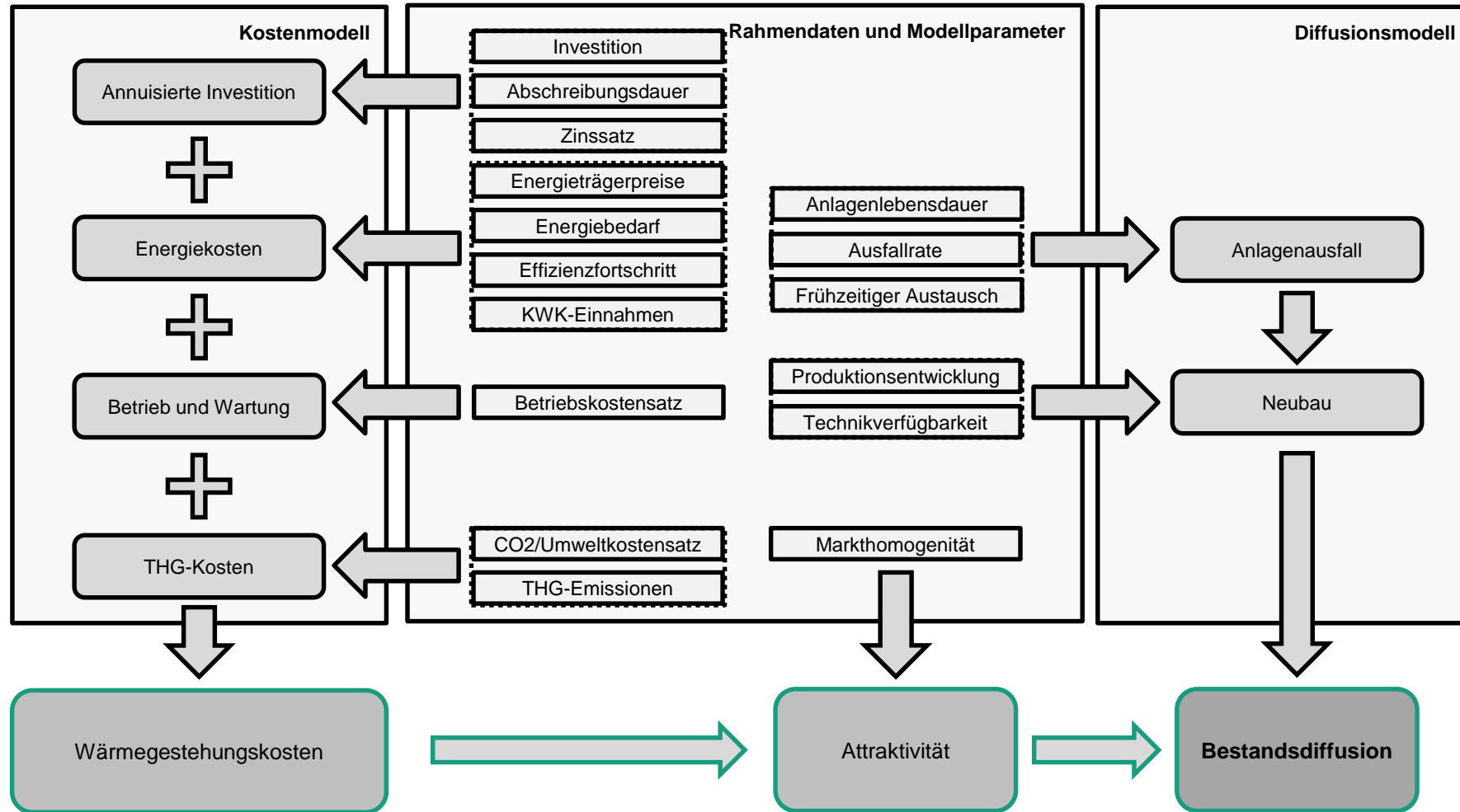
**These 9:** Aufgrund langer **Modernisierungszyklen** ist die Gefahr von stranded investments hoch.

**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.

# Optional: Methodik

## Wir verwenden eine techno-ökonomische Modellierung



### ■ Kernbotschaften

- Es ist eine Vereinfachung!
- Technikattraktivität ist durch die **Wärmegestehungskosten** dominiert.
- Neue Anlagen ersetzen alte.
- Nur im **Zusammenspiel** von **Attraktivität** und **Anlagenersatz** gelangen CO2-neutrale Anlagen in den Bestand.

# These 7: Der Investitionsbedarf für Anlagenneubau ist gering

## Hintergrund

Die nötigen Investitionen für den Umbau des Anlagenparks sollten in Synergie mit einer grundsätzlichen **Modernisierung des Anlagenbestandes** gesehen werden.

Es ist zu berücksichtigen, dass die Investitionen in Einzelfällen ein Vielfaches höher liegen können, wenn Kosten aus Abriss von Bestandsanlagen und Erweiterung der **Infrastruktur** wie Transformatoren und Stromnetzanschlüssen mitberechnet werden. Auch diese Kosten sollten "förderfähig" sein, da sie häufig **reale Hemmnisse** in der Umsetzung darstellen.

## Einschränkungen

- Kosten für Infrastrukturen sind nicht berücksichtigt (Systemgrenze Prozesswärmanlage)
- Kapitalverfügbarkeit kann dennoch ein relevantes Hemmnis sein.

## Belege in Bericht/Berechnungstool

- Anteil der Investitionen an den Gesamtkosten von Prozesswärmanlagen liegen in Größenordnung von 10-15%. [These 8]
- Neubau von fossilen Anlagen ist *aggregiert* nur 10-20% günstiger als Neubau CO<sub>2</sub>-neutraler Anlagen. Zusatzinvestition entsteht vor allem durch beschleunigten Ersatz.
- Genau diese Beschleunigung wird aber benötigt. [These 9]
- Umbau ist daher vor allem eine Modernisierung.



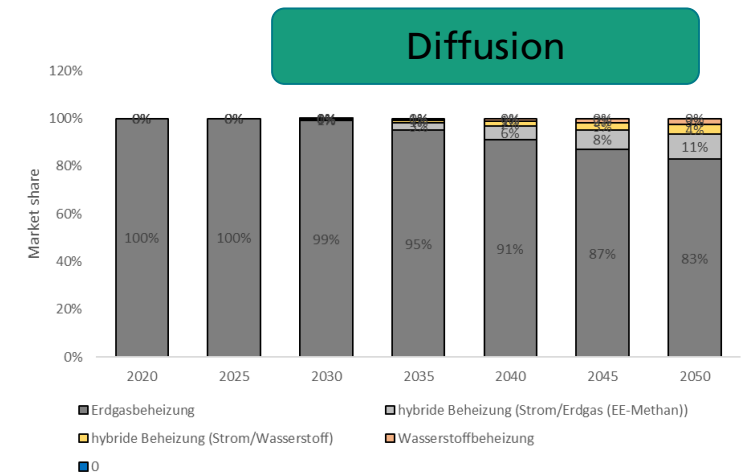
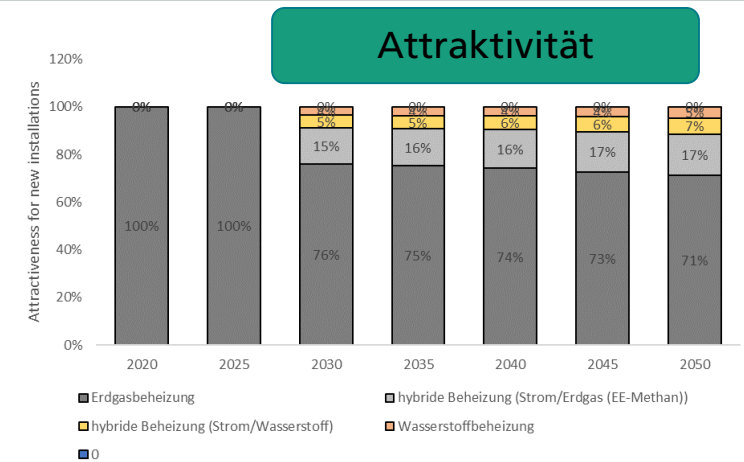
# These 7 - Beispiel für Investitionsanteile

## Kontinuierliche Wärmebehandlung Flachstahl

Erdgasbeheizung				
Jahr	2020	2030	2040	2050
<b>Aktivität [t]</b>	<b>1,260,000</b>	<b>1,260,000</b>	<b>1,260,000</b>	<b>1,260,000</b>
Annuität Investition Neubau [EUR/t]	3.08	3.08	3.08	3.08
Annuität Investition Modernisierung [EUR/t]	1.54	1.54	1.54	1.54
CO2-Kosten/ Umweltkosten [EUR/t]	5.90	7.47	9.32	11.19
Energiekosten [EUR/t]	1.60	11.39	11.56	11.74
O&M Neubau [EUR/t]	2.33	2.33	2.33	2.33
O&M Modernisierung [EUR/t]	2.33	2.33	2.33	2.33
<b>Wärmegestehungskosten Neubau [EUR/t]</b>	<b>13</b>	<b>24</b>	<b>26</b>	<b>28</b>
<b>Wärmegestehungskosten Modernisierung [EUR/t]</b>	<b>11</b>	<b>23</b>	<b>25</b>	<b>27</b>

Elektrifizierung				
Jahr	2020	2030	2040	2050
<b>Aktivität [t]</b>	<b>176,000</b>	<b>176,000</b>	<b>176,000</b>	<b>176,000</b>
Annuität Investition Neubau [EUR/t]	5.68	5.68	5.68	5.68
Annuität Investition Modernisierung [EUR/t]	1.99	1.99	1.99	1.99
CO2-Kosten/ Umweltkosten [EUR/t]	7.16	2.44	-	-
Energiekosten [EUR/t]	28.06	48.28	50.12	49.93
O&M Neubau [EUR/t]	3.88	3.88	3.88	3.88
O&M Modernisierung [EUR/t]	3.88	3.88	3.88	3.88
<b>Wärmegestehungskosten Neubau [EUR/t]</b>	<b>-</b>	<b>60</b>	<b>60</b>	<b>59</b>
<b>Wärmegestehungskosten Modernisierung [EUR/t]</b>	<b>-</b>	<b>57</b>	<b>56</b>	<b>56</b>

Investitionen sind kleiner Teil.  
Energiekosten bestimmen  
Wirtschaftlichkeit.



# These 8: Umstellung auf CO<sub>2</sub>-neutrale Techniken ist mit höheren Energiekosten verbunden

## Hintergrund

Investitionsförderung ist ein wichtiger Baustein der Transformationsstrategie, aber nicht ausreichend. **Entscheidend sind die Energiekosten.** Hier gilt es einen Marktrahmen zu schaffen, der den wirtschaftlichen Betrieb CO<sub>2</sub>-neutraler Techniken ermöglicht und Investitionen wirtschaftlich attraktiv macht. Konkret heißt dies, dass CO<sub>2</sub>-neutraler Wasserstoff und **Strom gegenüber Erdgas konkurrenzfähig** sein müssen.

## Belege in Bericht/Berechnungstool

- Energiekosten erzeugen >75% der Gesamtkosten einer Anlage.
- Energiekosten bei theoretischer vollständiger Umstellung (Referenzszenario) um Faktor 1,5 - 3 erhöht.
- Für Diffusion CO<sub>2</sub>-neutraler Anlagen ist ein Strompreis von 4-5€/ct/kWh und hohes CO<sub>2</sub>-Preisniveau notwendig (->300€/t). Dann entsteht entscheidungsrelevanter Kostenvorteil.
- Entkopplung Diffusion von Energiekosten könnte Hemmnisse abbauen. [These 10]

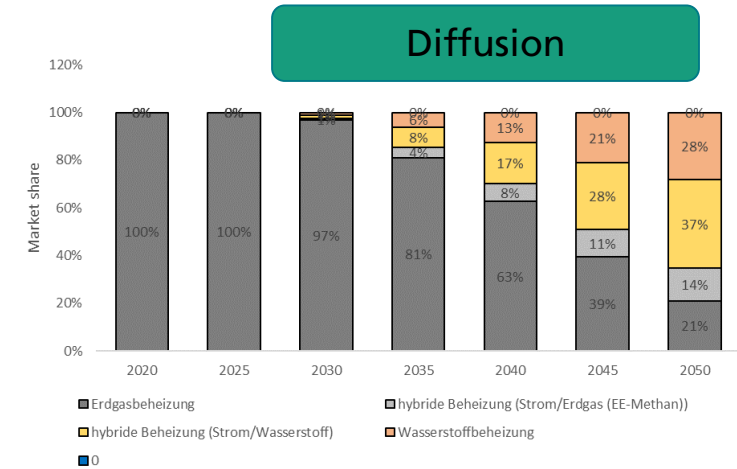
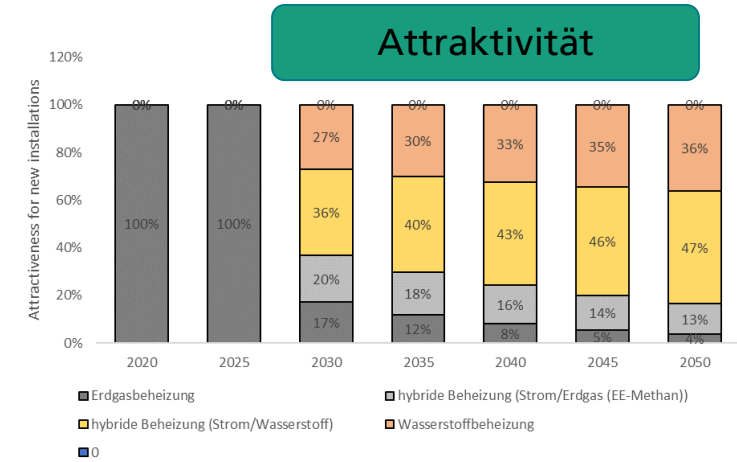
# These 8 - Beispiel für Energiekostenverschiebung

## Kontinuierliche Wärmebehandlung Flachstahl

Erdgasbeheizung				
Jahr	2020	2030	2040	2050
<b>Aktivität [t]</b>	<b>1,260,000</b>	<b>1,260,000</b>	<b>1,260,000</b>	<b>1,260,000</b>
Annuität Investition Neubau [EUR/t]	3.08	3.08	3.08	3.08
Annuität Investition Modernisierung [EUR/t]	1.54	1.54	1.54	1.54
CO2-Kosten/ Umweltkosten [EUR/t]	8.85	16.81	22.38	27.97
Energiekosten [EUR/t]	8.94	13.52	13.69	13.71
O&M Neubau [EUR/t]	2.33	2.33	2.33	2.33
O&M Modernisierung [EUR/t]	2.33	2.33	2.33	2.33
<b>Wärmegestehungskosten Neubau [EUR/t]</b>	<b>23</b>	<b>36</b>	<b>41</b>	<b>47</b>
<b>Wärmegestehungskosten Modernisierung [EUR/t]</b>	<b>22</b>	<b>34</b>	<b>40</b>	<b>46</b>

Elektrifizierung				
Jahr	2020	2030	2040	2050
<b>Aktivität [t]</b>	<b>176,000</b>	<b>176,000</b>	<b>176,000</b>	<b>176,000</b>
Annuität Investition Neubau [EUR/t]	5.68	5.68	5.68	5.68
Annuität Investition Modernisierung [EUR/t]	1.99	1.99	1.99	1.99
CO2-Kosten/ Umweltkosten [EUR/t]	-	-	-	-
Energiekosten [EUR/t]	19.08	24.60	25.01	25.18
O&M Neubau [EUR/t]	3.88	3.88	3.88	3.88
O&M Modernisierung [EUR/t]	3.88	3.88	3.88	3.88
<b>Wärmegestehungskosten Neubau [EUR/t]</b>	<b>-</b>	<b>34</b>	<b>35</b>	<b>35</b>
<b>Wärmegestehungskosten Modernisierung [EUR/t]</b>	<b>-</b>	<b>30</b>	<b>31</b>	<b>31</b>

Reduktion der Kostendifferenz ist zentral. Das ist von unten (CO2-Preis) und von oben (Strompreis) möglich. Beides scheint notwendig zu sein.



# These 9: Durch lange Modernisierungszyklen besteht Gefahr von stranded investments

---

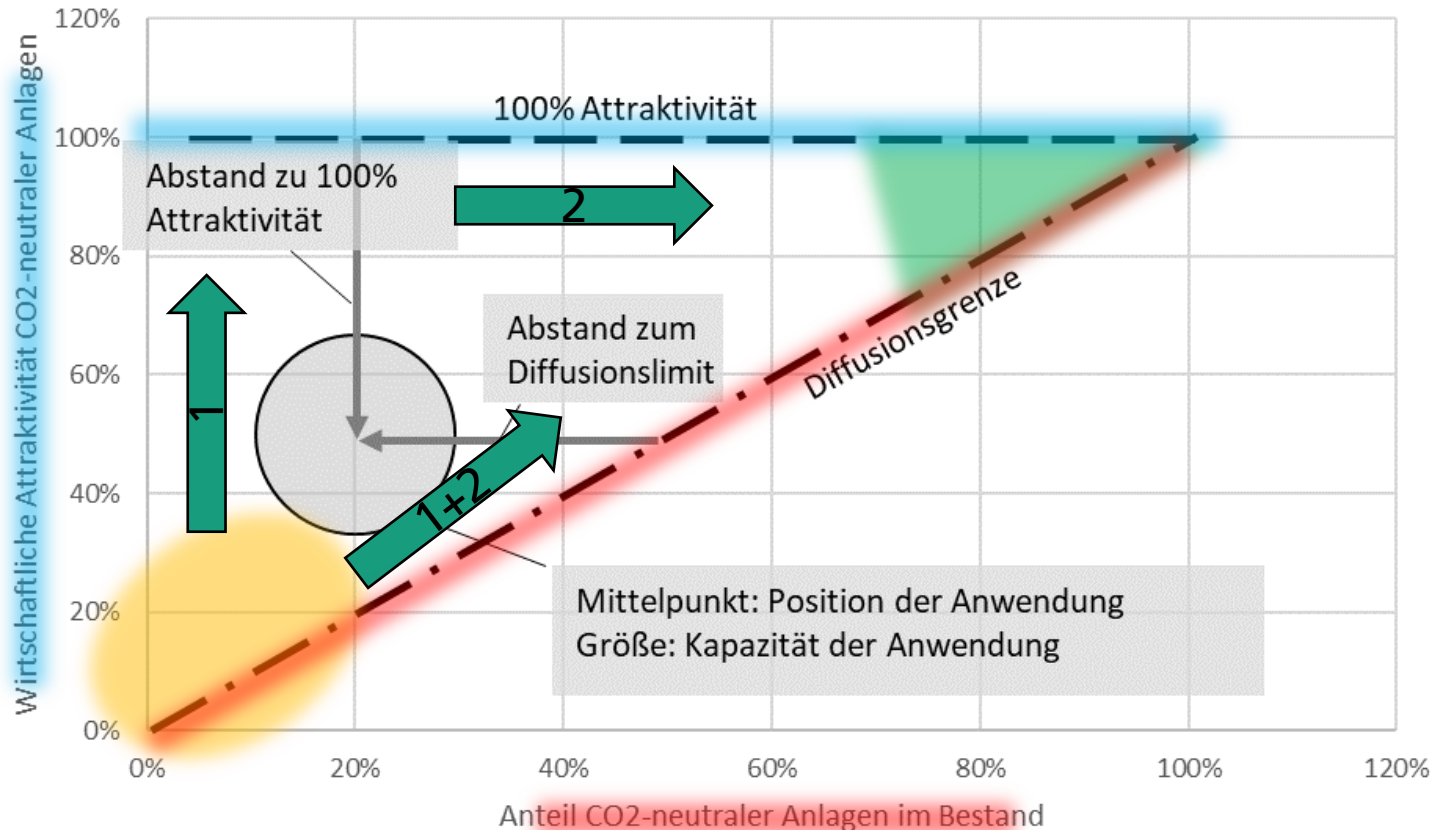
## Hintergrund

Eine **planbare Transformationspolitik** erlaubt den Unternehmen zukünftige Preisänderungen frühzeitig zu antizipieren. Diese **vorausschauende Transformation** hilft Stranded Assets und Lock-ins zu vermeiden und **Möglichkeitsfenster** bei Re-Investitionen oder Modernisierungen zu nutzen.

## Belege in Bericht/Berechnungstool

- Modernisierungszyklus im Mittel >30 Jahre (min 13, max 50)
- Wirtschaftlichkeitsfenster öffnet sich erst ab 2030 in der Breite
- Dezidierte Diffusionsmodellierung zeigt Trägheit des Systems (Abbildung nächste Folie).
- Entkopplung von Wirtschaftlichkeit und Diffusion notwendig. [These 10]

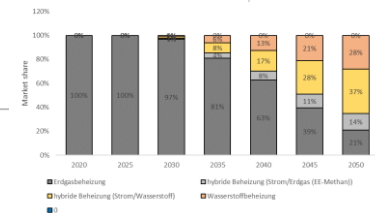
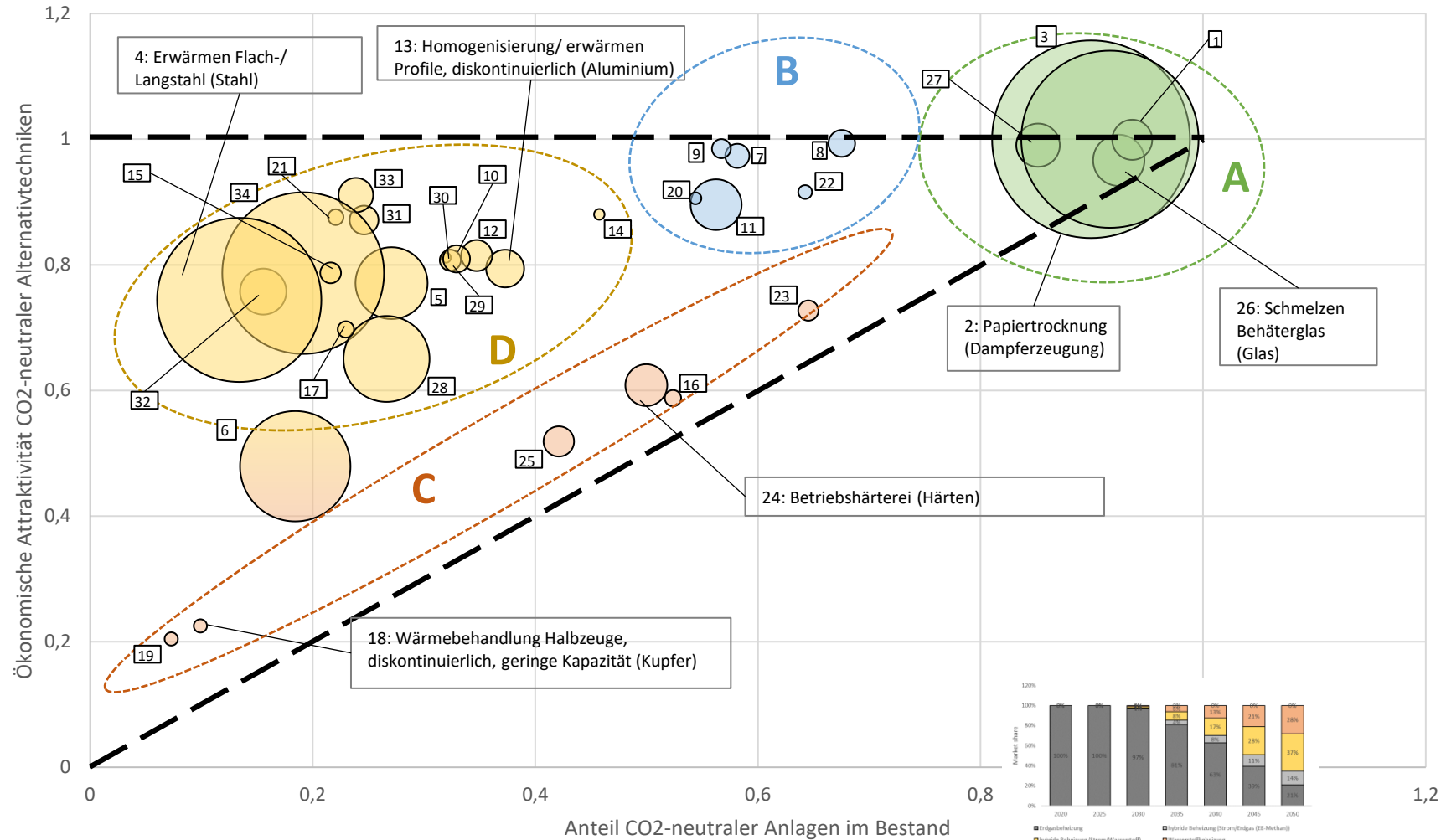
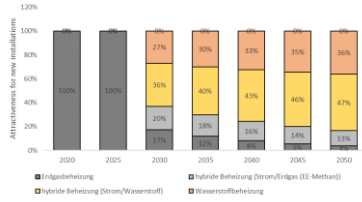
# Optional: Erläuterung Diffusionsabbildung



## ■ Kernbotschaften

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

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



# 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				
8	Continuous melting cast iron (medium capacity)	50	2070	Green	Green	Green	Yellow	Orange	Red	Red	Black				
9	Continuous melting cast iron (high capacity)	47	2067	Green	Green	Green	Yellow	Orange	Red	Red	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				
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				
18	Discontinuous heat treatment copper semi-finished product (low capacity)	35	2055	Green	Green	Green	Yellow	Orange	Red	Red	Black				
19	Discontinuous heat treatment copper semi-finished product (high capacity)	35	2055	Green	Green	Green	Yellow	Orange	Red	Red	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	Orange							
24	Continuous carburizing (company store)	13	2033	Green	Green	Green	Yellow	Orange							
25	Discontinuous carburizing	13	2033	Green	Green	Green	Yellow	Orange							
26	Continuous melting container glass	15	2035	Green	Green	Green	Yellow	Orange							
27	Continuous melting flat glass	15	2035	Green	Green	Green	Yellow	Orange							
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				
32	Continuous burning (medium/high reactivity)	45	2065	Green	Green	Green	Yellow	Orange	Red	Red	Black				
33	Continuous burning (high throughput)	50	2070	Green	Green	Green	Yellow	Orange	Red	Red	Black				
34	Continuous burning cement clinker	60	2080	Green	Green	Green	Yellow	Orange	Red	Red	Black				

## In 2020 ersetzte Anlagen werden nach 2045 zumeist noch betriebsbereit sein

- Diese Anlagen (**rot/schwarz**) werden vermutlich von Ordnungsrecht betroffen sein – das beträfe 92% der Anwendungen (nach Kapazität, ohne Dampf).
- Glas, Härtereien, einige Dampftechnologien sehen kürzere Lebensdauern

## Was sind Handlungsoptionen?

- Produktion einstellen
- Klimaziele verfehlen
- Schnelleren Austausch für Modernisierung nutzen

Sehr unattraktive Optionen

Frage: Wie sind Ihre Planungen/Erfahrungen mit Anlagenaustausch/Modernisierung?

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

---

## Hintergrund

Hybride Systeme können einen **Einstieg in die CO<sub>2</sub>-neutrale Prozesswärme** ermöglichen. Dafür sind Hemmnisse, die Investitionen in hybride Anlagen entgegenstehen, abzubauen, z. B. durch eine Reform der Netzentgelte. Hybride Systeme sollten gefördert und durch einen geeigneten marktlichen Rahmen angereizt werden, z. B. um ein **Nachrüsten bestehender gasbeheizter Anlagen** mit zusätzlicher elektrischer Beheizung zu erproben und umzusetzen. Die Transformationsstrategie kann so einen wichtigen Beitrag zu einem resilienten und **flexiblen Industriesystem** sowie zur Integration erneuerbarer Energien in das Energiesystem leisten.

## Belege in Bericht/Berechnungstool

- These 7: Zusätzliche Anlage (mit geringer Investition) ist geringes Risiko.
- These 8: Flexible Reaktion auf Preissignale kann Kostendifferenz ausgleichen.
- These 9: Enges Zeitfenster des Umbaus wird erweitert.



# Diskussionspunkte?

- Verständnisfragen?
- Fragen zur Methodik?
  
- Weitere technologische Ansätze?
- Erfahrungsberichte aus der Praxis
- Erwartungen an Wasserstoffverfügbarkeit
- Erwartungen an Industriestrompreis
- Ideales Zielbild?
  
- Implikationen für Politikinstrumente
- Zeitlicher Ablauf der Transformation

**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.

# 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)

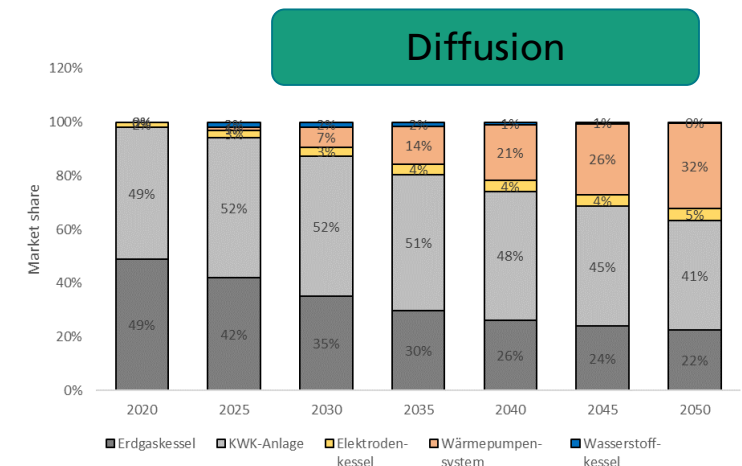
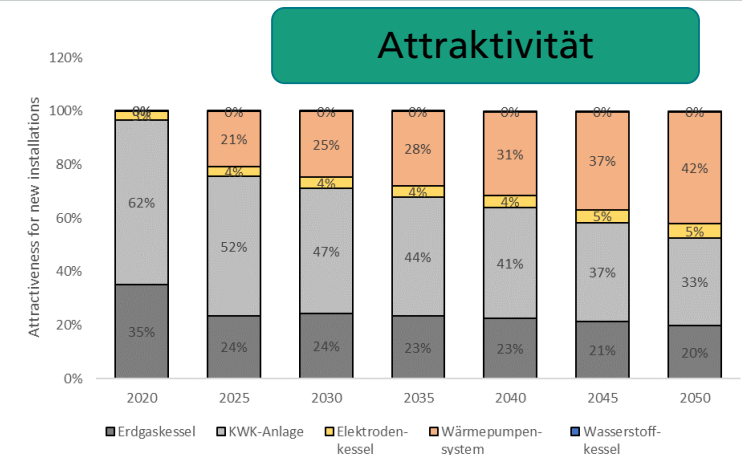


# Backup: Wirtschaftlichkeit und Diffusion Dampfbereich

## Referenzfall: Papiertrocknung

Erdgaskessel				
Jahr	2020	2030	2040	2050
<b>Aktivität [t]</b>	<b>337,177</b>	<b>337,177</b>	<b>337,177</b>	<b>337,177</b>
Annuität Investition Neubau [EUR/t]	0.53	0.48	0.44	0.44
Annuität Investition Modernisierung [EUR/t]	0.35	0.31	0.29	0.29
CO2-Kosten/ Umweltkosten [EUR/t]	10.95	13.87	17.31	20.77
Energiekosten [EUR/t]	3.56	25.31	25.68	26.08
O&M Neubau [EUR/t]	0.33	0.33	0.33	0.33
O&M Modernisierung [EUR/t]	0.33	0.33	0.33	0.33
<b>Wärmegestehungskosten Neubau [EUR/t]</b>	<b>15</b>	<b>40</b>	<b>44</b>	<b>48</b>
<b>Wärmegestehungskosten Modernisierung [EUR/t]</b>	<b>15</b>	<b>40</b>	<b>44</b>	<b>47</b>

Wärmepumpensystem				
Jahr	2020	2030	2040	2050
<b>Aktivität [t]</b>	<b>337,177</b>	<b>337,177</b>	<b>337,177</b>	<b>337,177</b>
Annuität Investition Neubau [EUR/t]	3.74	3.37	2.99	2.62
Annuität Investition Modernisierung [EUR/t]	3.74	3.37	2.99	2.62
CO2-Kosten/ Umweltkosten [EUR/t]	-	-	-	-
Energiekosten [EUR/t]	20.79	33.99	33.42	31.45
O&M Neubau [EUR/t]	2.33	2.33	2.33	2.33
O&M Modernisierung [EUR/t]	2.33	2.33	2.33	2.33
<b>Wärmegestehungskosten Neubau [EUR/t]</b>	<b>-</b>	<b>40</b>	<b>39</b>	<b>36</b>
<b>Wärmegestehungskosten Modernisierung [EUR/t]</b>	<b>-</b>	<b>40</b>	<b>39</b>	<b>36</b>

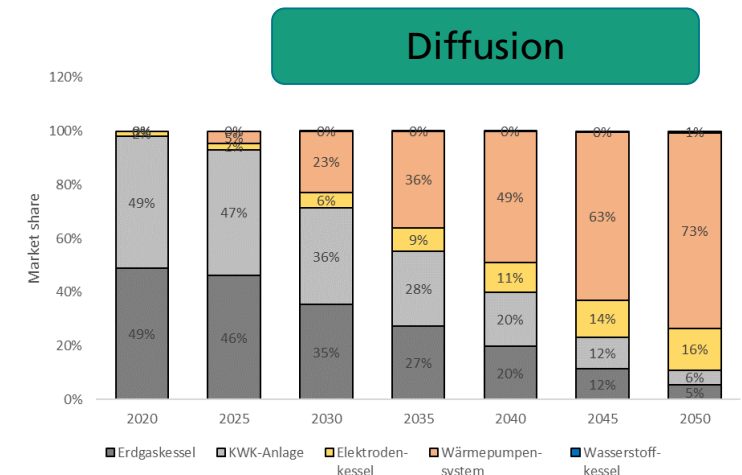
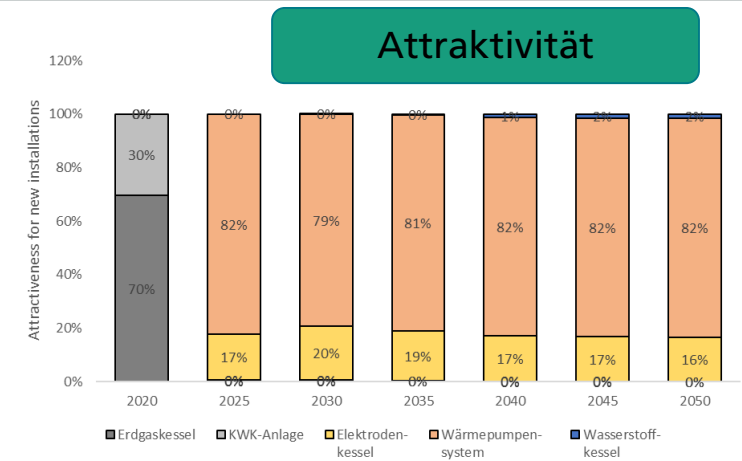


# Backup: Wirtschaftlichkeit und Diffusion Dampfbereich

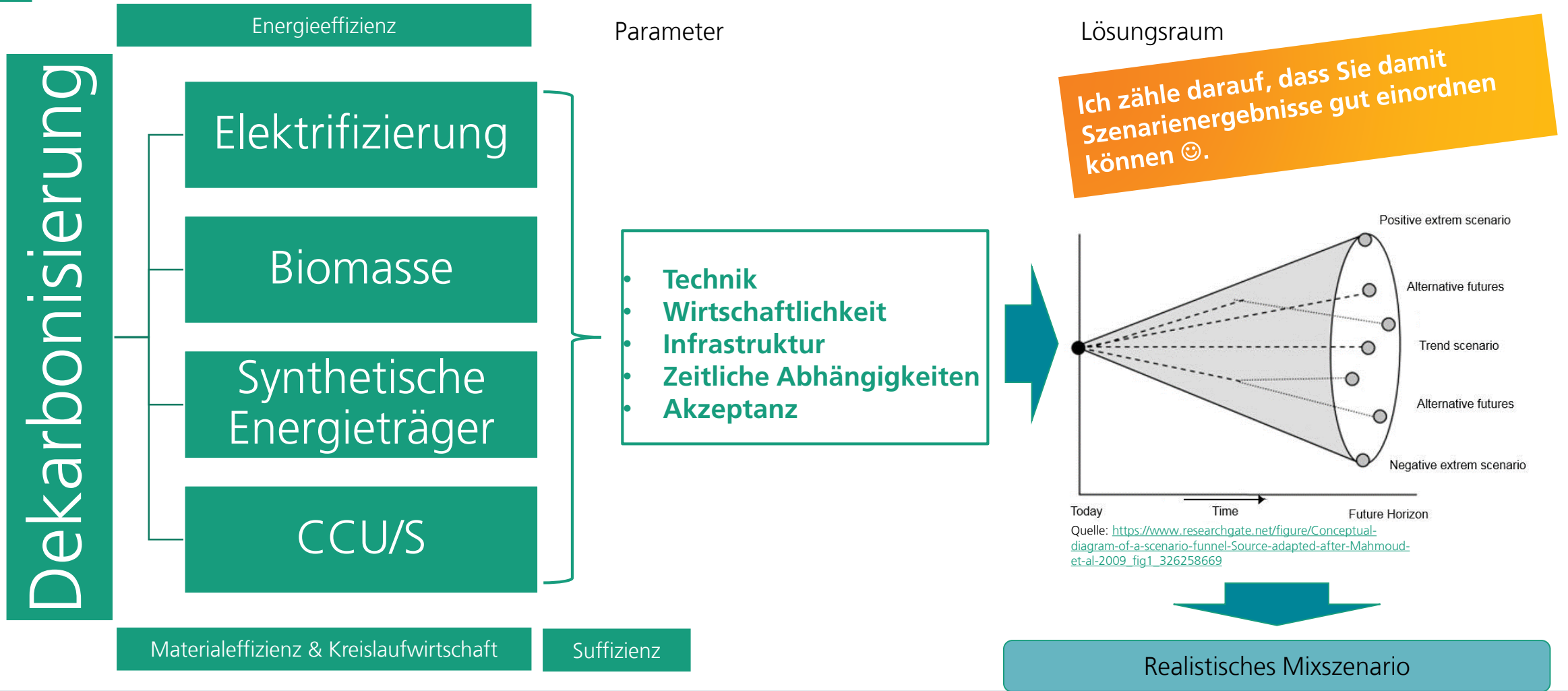
## Stufe 3: Papiertrocknung

Erdgaskessel				
Jahr	2020	2030	2040	2050
<b>Aktivität [t]</b>	<b>337,177</b>	<b>337,177</b>	<b>337,177</b>	<b>337,177</b>
Annuität Investition Neubau [EUR/t]	0.53	0.48	0.44	0.44
Annuität Investition Modernisierung [EUR/t]	0.35	0.31	0.29	0.29
CO2-Kosten/ Umweltkosten [EUR/t]	16.42	31.21	41.54	51.93
Energiekosten [EUR/t]	19.87	30.04	30.40	30.45
O&M Neubau [EUR/t]	0.33	0.33	0.33	0.33
O&M Modernisierung [EUR/t]	0.33	0.33	0.33	0.33
<b>Wärmegestehungskosten Neubau [EUR/t]</b>	<b>37</b>	<b>62</b>	<b>73</b>	<b>83</b>
<b>Wärmegestehungskosten Modernisierung [EUR/t]</b>	<b>37</b>	<b>62</b>	<b>73</b>	<b>83</b>

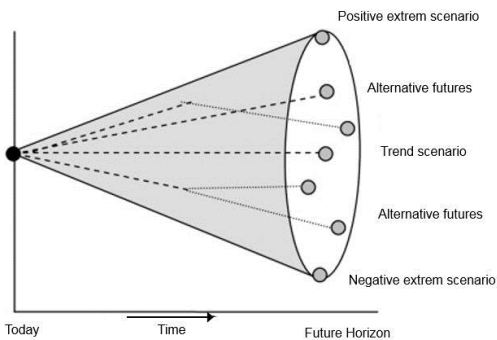
Wärmepumpensystem				
Jahr	2020	2030	2040	2050
<b>Aktivität [t]</b>	<b>337,177</b>	<b>337,177</b>	<b>337,177</b>	<b>337,177</b>
Annuität Investition Neubau [EUR/t]	3.74	3.37	2.99	2.62
Annuität Investition Modernisierung [EUR/t]	3.74	3.37	2.99	2.62
CO2-Kosten/ Umweltkosten [EUR/t]	-	-	-	-
Energiekosten [EUR/t]	14.14	17.32	16.68	15.86
O&M Neubau [EUR/t]	2.33	2.33	2.33	2.33
O&M Modernisierung [EUR/t]	2.33	2.33	2.33	2.33
<b>Wärmegestehungskosten Neubau [EUR/t]</b>	<b>-</b>	<b>23</b>	<b>22</b>	<b>21</b>
<b>Wärmegestehungskosten Modernisierung [EUR/t]</b>	<b>-</b>	<b>23</b>	<b>22</b>	<b>21</b>



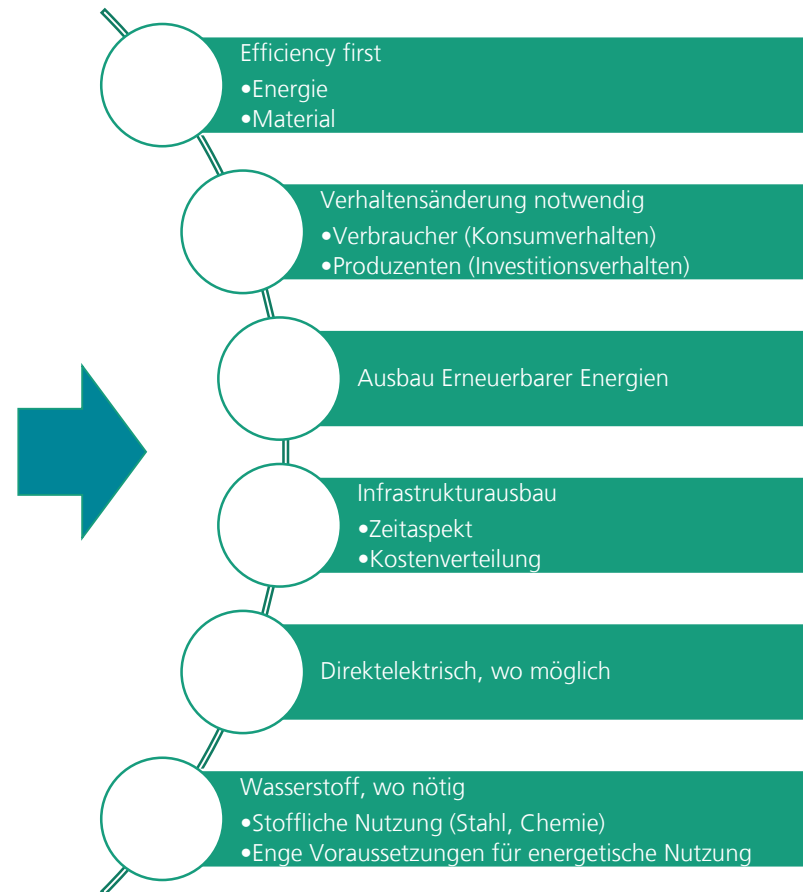
# Vermeidungsstrategien erzeugen einen breiten Lösungsraum



# Der untersuchte Lösungsraum liefert robuste Erkenntnisse

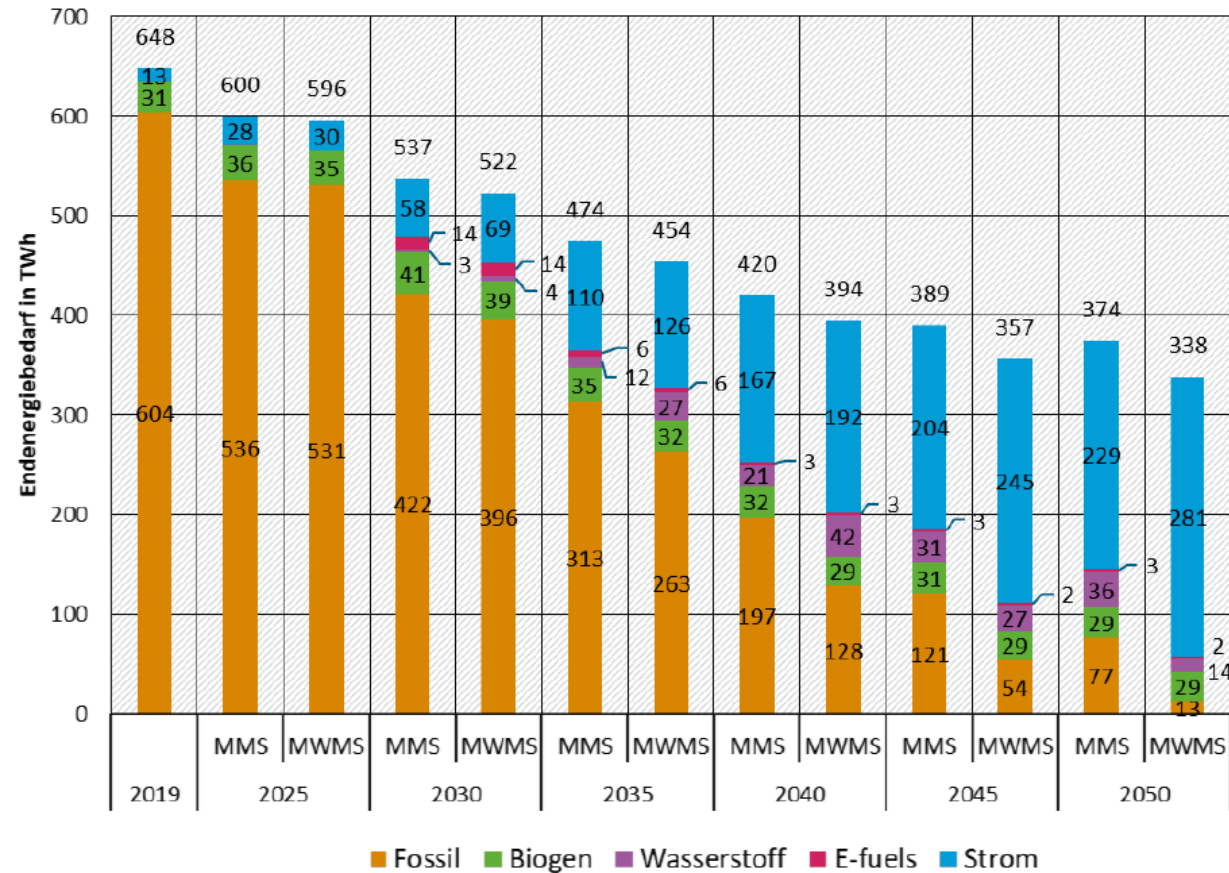


Quelle: [https://www.researchgate.net/figure/Conceptual-diagram-of-a-scenario-funnel-Source-adapted-after-Mahmoud-et-al-2009\\_fig1\\_326258669](https://www.researchgate.net/figure/Conceptual-diagram-of-a-scenario-funnel-Source-adapted-after-Mahmoud-et-al-2009_fig1_326258669)



Was sind robuste Anwendungen für Wasserstoff?

# Wasserstoff spielt im Verkehr nur in ausgewählten Anwendungen eine Rolle



## Wasserstoff

- 2030 nur etwa 1% des Endenergiebedarfs durch H<sub>2</sub>
- 2050 zwischen 5% (MWMS) und 10% (MMS)
- Vor allem in Brennstoffzellen-LKW

## E-fuels (Wasserstoffderivate)

- Ergänzend zu biogenen Kraftstoffen (2030: 3%)
- Später fast vollständig ersetzt

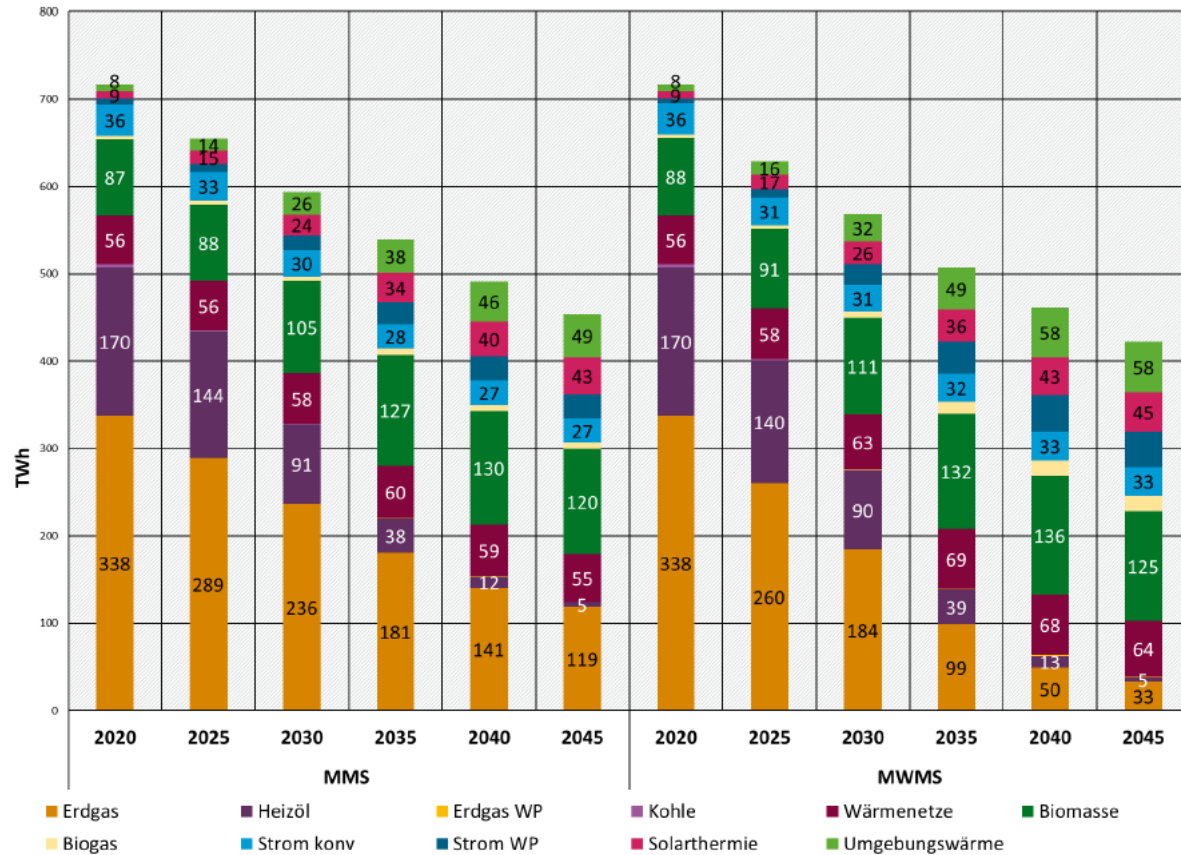
Summe etwa 40 TWh in 2050

Im Verkehr dominieren langfristig direktelektrische Lösungen.

Quelle: Eigene Berechnungen Öko-Institut (Projektionsbericht 2023)

# Im Gebäudesektor ist Wasserstoff...

... im Projektionsbericht nicht vorhanden!



## Aber dennoch interessant:

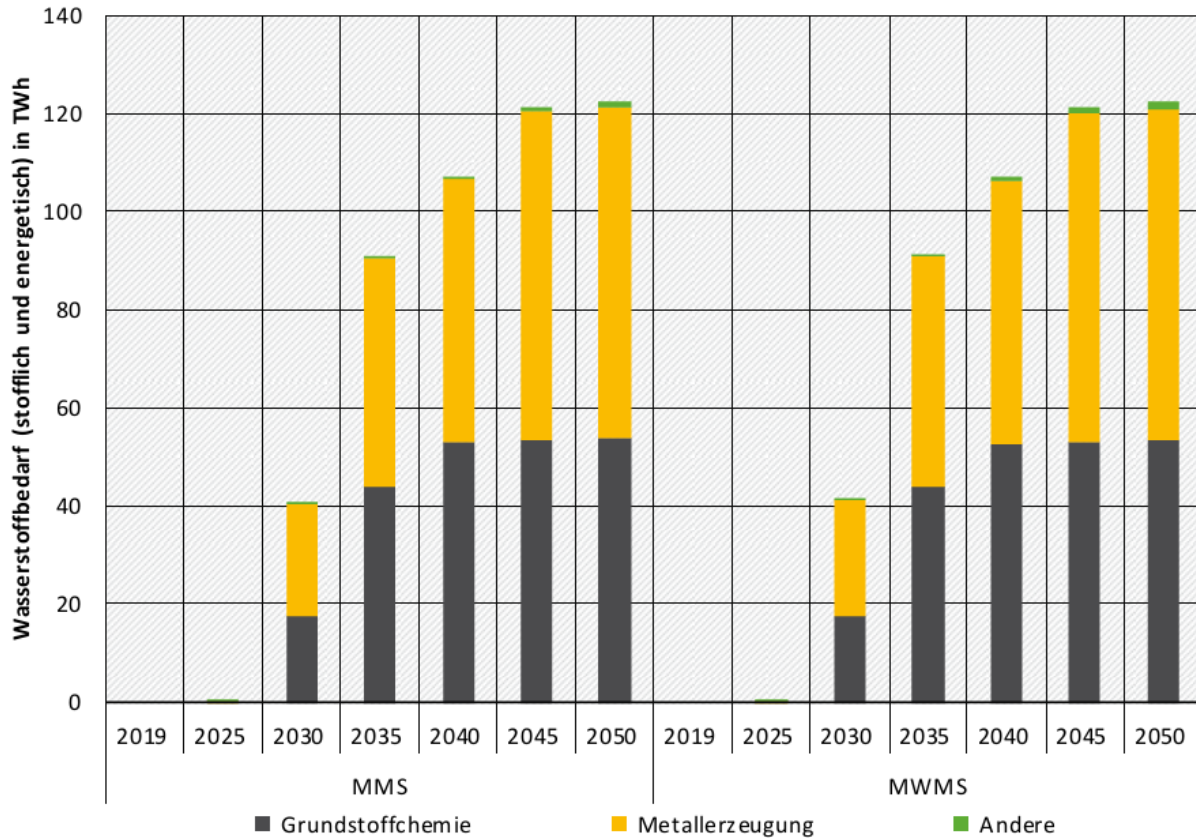
- Biomassennutzung legt stark zu!
- Wärmenetze steigen anteilig.
- Größter Zuwachs bei Wärmepumpen und Solarthermie.
- Gesamtenergiebedarf sinkt deutlich.

Darum schauen wir mal lieber schnell in die Industrie!

Quelle: Berechnungen IREES (Projektionsbericht 2023)



# Wasserstoff ist ein zentraler Hebel für die Industrie



Quelle: Berechnungen Fraunhofer ISI (Projektionsbericht 2023)

## Stoffliche Nutzung

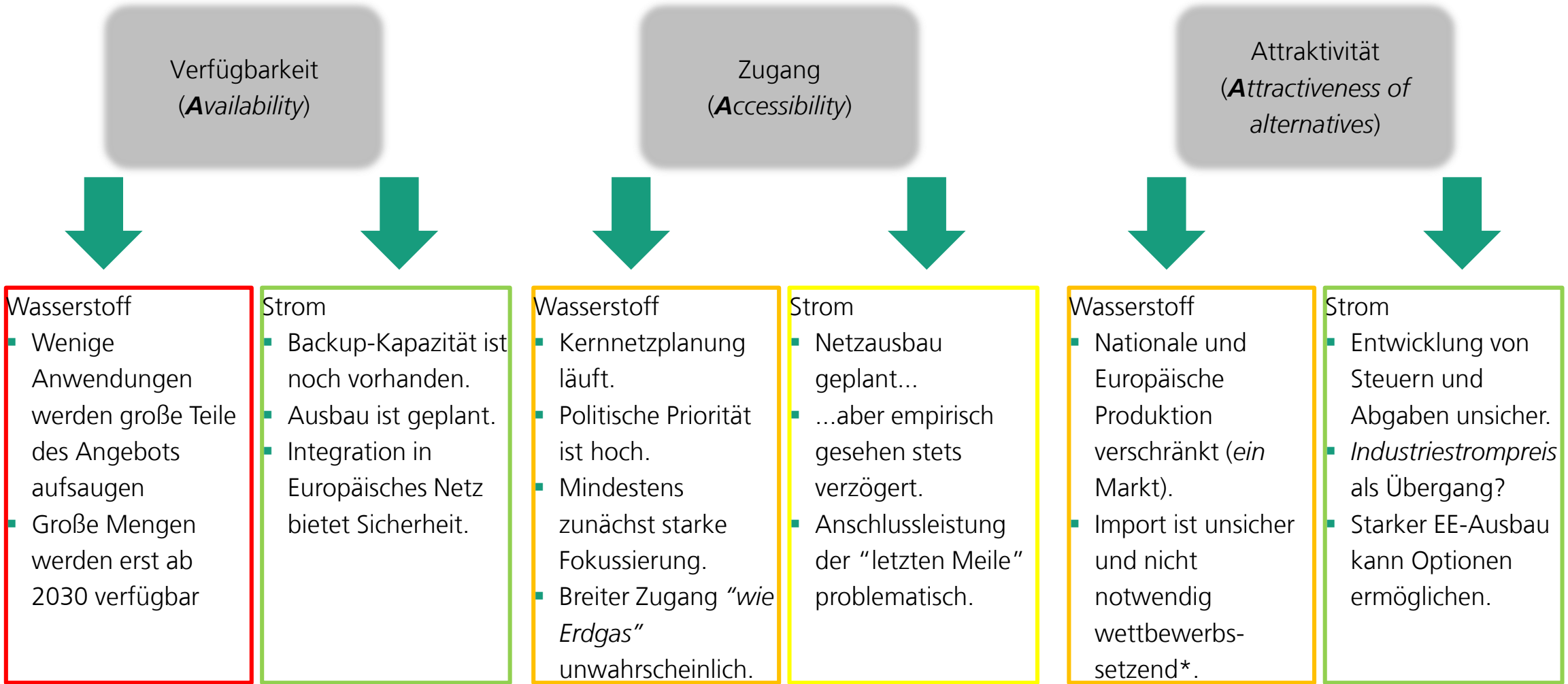
- Substitution von öl- und erdgasbasierten Rohstoffen

## Stahlerzeugung

- Substitution von kohlebasierten Reduktionsmitteln

Vergleichsweise frühe Hochlauf, Priorisierung ist wichtig

# Versuch einer Einordnung – Triple-A Ansatz zeigt direkte Elektrifizierung im Vorteil



Wenn technisch möglich, scheint frühe und direkte Elektrifizierung vorteilhaft. Auf Wasserstoff hoffen (und deswegen im Übergang fossil zu bleiben), sollte nur bei sehr konkret vorliegenden Argumenten erwogen werden.