

---

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

---

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

24. November 2023 (online)

---



# Agenda der heutigen Veranstaltung

---

*Moderation: Christian Schwotzer*

- 09:00 – 09:05 Uhr: Begrüßung (C. Schwotzer)
- 09:05 – 09:15 Uhr: Kurzvorstellung Studie und des Workshopkonzeptes (C. Schwotzer)
  
- 09:15 – 09:40 Uhr: Ergebnisse Teil I: Branche Gießerei (C. Schwotzer, M. Rehfeldt)
- 09:40 – 10:05 Uhr: Ergebnisse Teil II: Branche Aluminium (F. Kaiser, M. Rehfeldt)
- 10:05 – 10:30 Uhr: Ergebnisse Teil III: Branche Kupfer (C. Schwotzer, M. Rehfeldt)
- 10:30 – 10:40 Uhr: Einführung in die Methodik des gemeinsamen, interaktiven Arbeitens (C. Schwotzer)
  
- *10:40 – 10:50 Uhr: Pause*
  
- 10:50 – 11:50 Uhr: Gemeinsame Diskussion und interaktives Arbeiten (C. Schwotzer, F. Kaiser, C. Gondorf)
- 11:50 – 12:00 Uhr: Zusammenfassung (C. Schwotzer, M. Rehfeldt)

## Herausforderung

- CO<sub>2</sub>-neutrale Anwendungen zur Prozesswärmeerzeugung sind nicht ohne das energiewirtschaftliche Umfeld bewertbar.
- Die Untersuchung auf Anwendungsebene ist aber mit einer Modellierung im Rahmen einer Systemanalyse nicht unmittelbar kompatibel.
- Daher wurden in dieser Untersuchung Vereinfachungen und Annahmen getroffen. Dazu gehören:
  - national einheitliche und nur jährlich definierte Strompreise,
  - Annahmen zur Verfügbarkeit von Energieträgern und entsprechender Infrastruktur,
  - Preispfade für Energieträger und CO<sub>2</sub>,
  - keine Modellierung der Stromerzeugung,
  - und daraus resultierend keine Abbildung flexibler Endverbraucher.

## Lösungsvorschlag

- Diese hier nicht betrachteten Aspekte des Energiesystems werden in verschiedenen darauf spezialisierten Studien mit komplexen Modellverbänden untersucht. Einige der in dieser Studie verwendeten Annahme basieren darauf.
- Für die Einordnung der Ergebnisse in den breiteren Kontext empfehlen wir die Berücksichtigung dieser (und weiterer) Studien. Dort sind vielfältige Hintergrundinformationen dargestellt und komplementäre Untersuchungen zu Wasserstoff, Angebot an EE und weitere zu finden.
  - **Langfristszenarien** des BMWK [1]
  - **Ariadne** des BMBF [2]
    - Vielfältige Veröffentlichungen u.A. zu Kosten, Akzeptanz, Politikinstrumenten; die verlinkte ist Teil der „Big5“ Energiesystemstudien [3]
  - **TransHyDE** des BMBF [4]
  - **Projektionsbericht** der Bundesregierung/Umweltbundesamt [5]

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

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

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

[4]: <https://www.wasserstoff-leitprojekte.de/leitprojekte/transhyde>

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

---

# Kurzvorstellung Studie und des Workshopkonzeptes

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

---

Auftraggeberin:



Projektstart: April 2019

geplante Veröffentlichung: September 2023

Ausführende Stellen:



Dr. Tobias Fleiter, Dr. Matthias Rehfeldt, Dr. Simon Hirzel,  
Lisa Neusel, Dr. Ali Aydemir



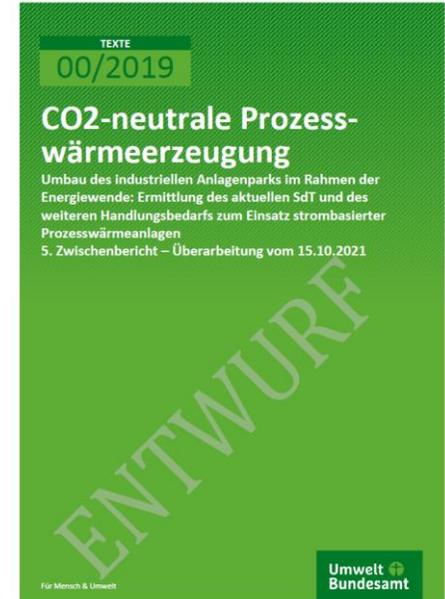
Dr. Christian Schwotzer, Felix Kaiser, Carsten Gondorf,  
Justin Hauch, Jan Hof, Lukas Sankowski, Moritz Langhorst

*Wir bedanken sich bei vielen weiteren Kolleginnen und Kollegen, die uns bei der Studie unterstützt haben. Besonderer Dank geht an Dr. Thomas Echterhof, Dr. Nico Schmitz, Fabian Störmann, Simon Lukas Bussmann, Jennifer Birke, Lukas Knorr, Lena Noner, Prof. Herbert Pfeifer, Prof. Harald Bradke, Prof. Clemens Rohde, Moritz Heuchel, Nadine Steinhübel, Sina Lange, Kerstin Kopf.*

# Die vorgestellten Ergebnisse sind Teil einer Studie für des Umweltbundesamt

---

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



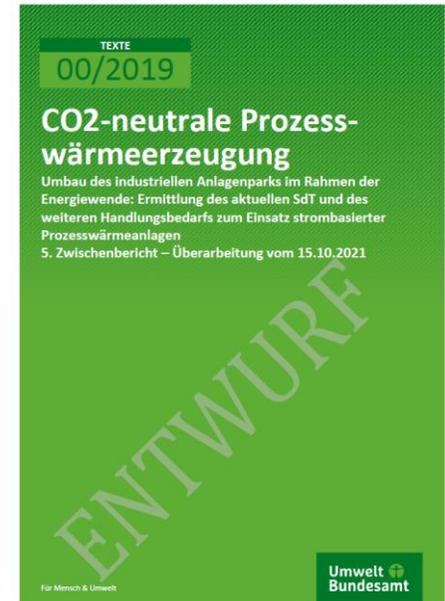
Gesamtbericht 739 Seiten (inkl. Anhang)

# Zielsetzung der Studie

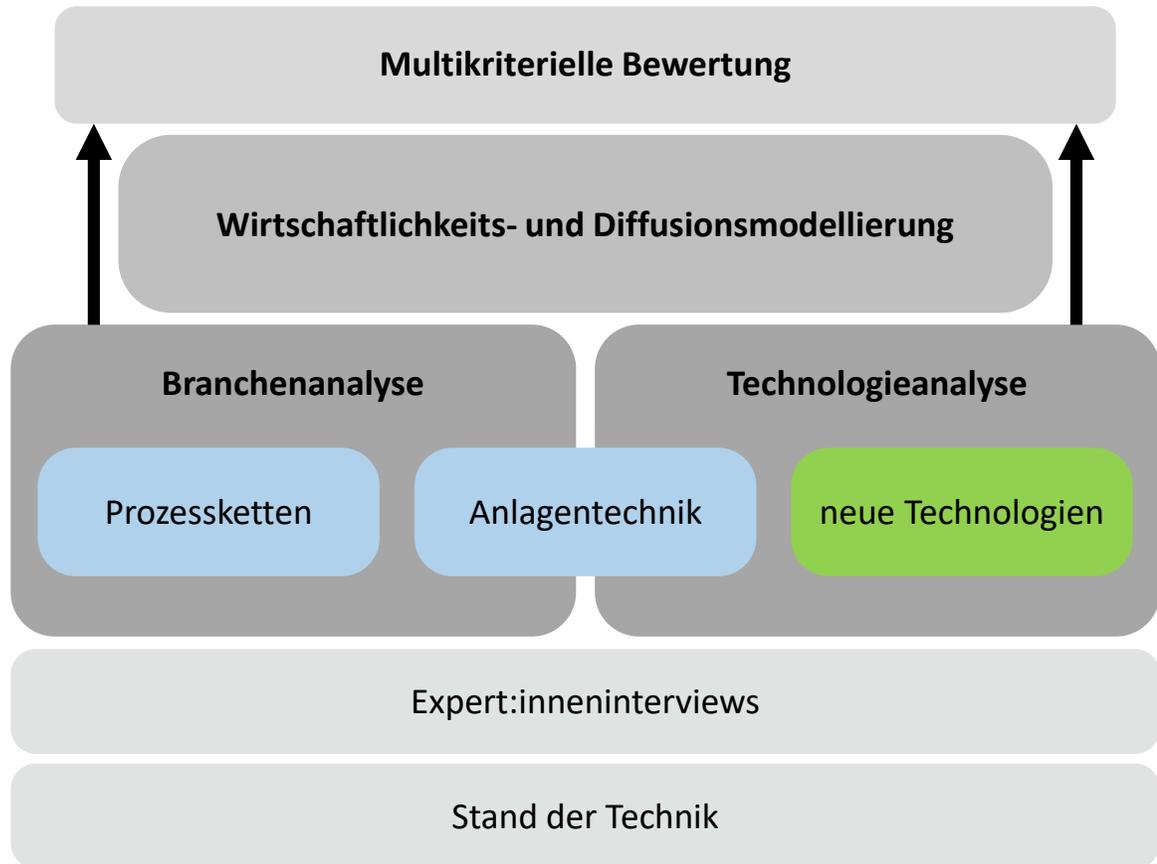
---

## Hauptstudie (in Kürze veröffentlicht):

- Wissenslücke zur Rolle von 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 System Sicht 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.

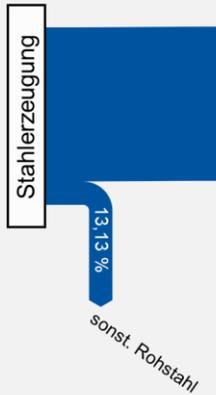
# Branchen im Fokus der Studie

<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	

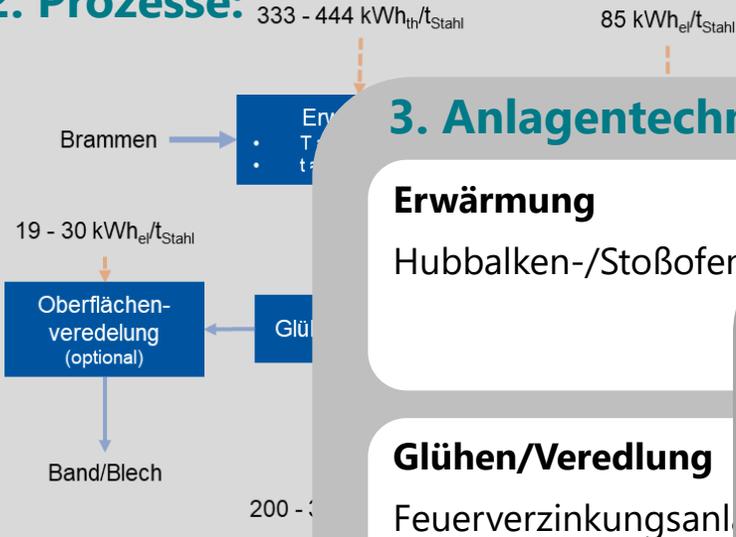
# 4-schrittiger Lösungsansatz der Branchen- und Technologieanalyse

## 1. Produkte:

Rohstahlerzeugung in 2016: 42,88 Mrd. t



## 2. Prozesse:



## 3. Anlagentechnik (Stand der Technik):

### Erwärmung

Hubbalken-/Stoßofen

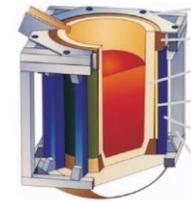
### Glühen/Veredlung

Feuerverzinkungsanl.

## 4. CO<sub>2</sub>-neutrale Alternativtechnologien:

### Power-to-Heat (PtH)

Induktion, Widerstandsbeheizung, Plasma, ...

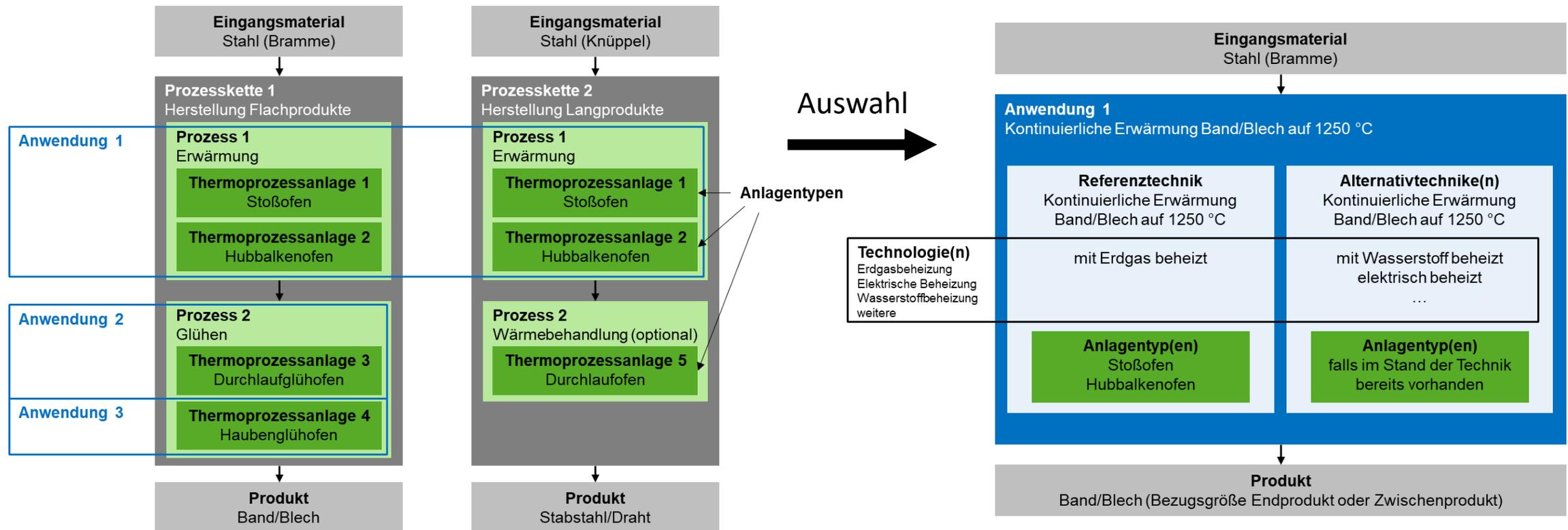


### Power-to-Gas (PtG) / Power-to-Liquid (PtL)

Wasserstoff, EE-Methan, ...



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



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

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



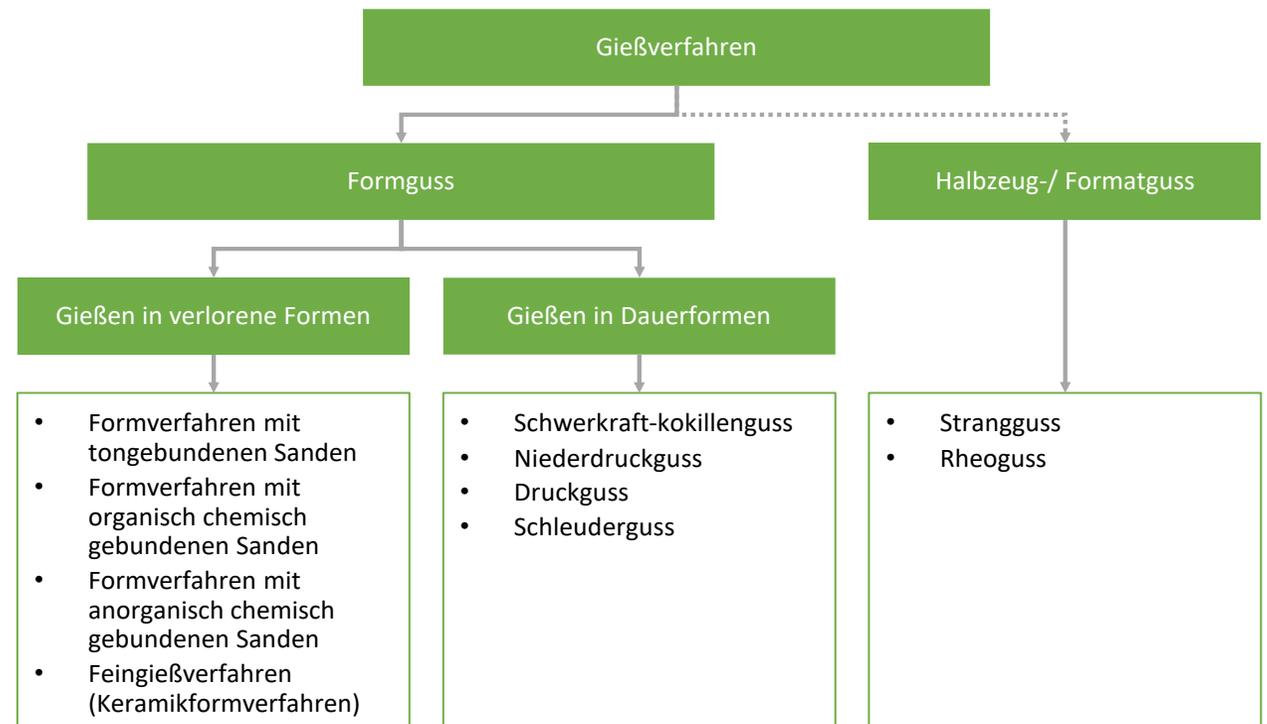
---

# Ergebnisse Teil I: Branche Gießerei

# Kurzbeschreibung der Branche und Fokus der Studie

- Weltweit wurden im Jahr 2018 circa 112,29 Millionen Tonnen Gusserzeugnisse in über 39.998 gelisteten Gießereien produziert
- Allein in Deutschland wurden 5,43 Millionen Tonnen hergestellt
- Deutschland ist europaweit führend und weltweit auf Rang 5
- 95% der 527 eingetragenen Gießereien gelten als Mittelstand und diese beschäftigen 79.000 Menschen
- Einteilung auf „Eisen und Stahl“ (4,26 Mio t) und „Nichteisenmetalle“ (1,18 Mio t)

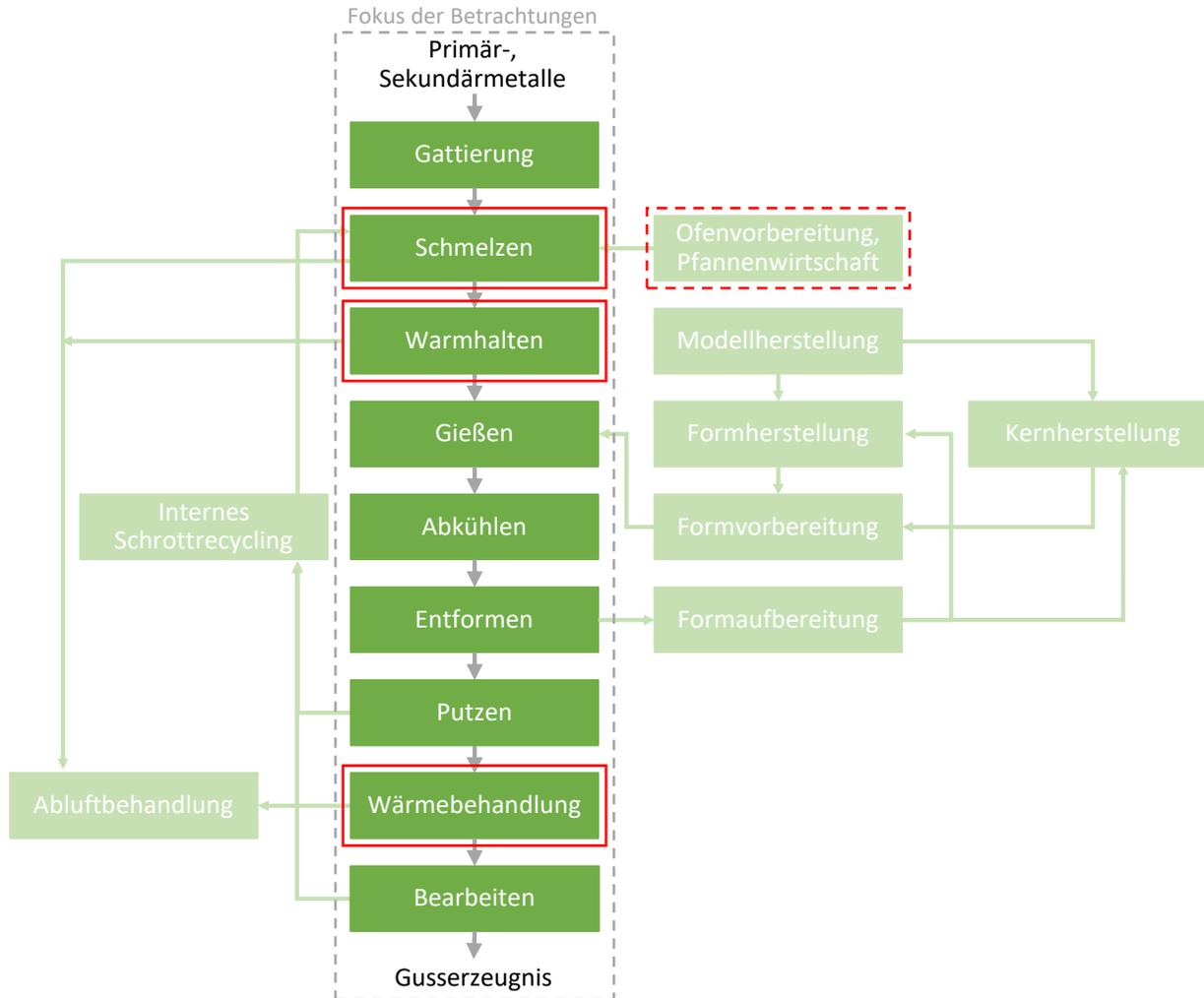
## Unterteilung der Gießverfahren



eigene Darstellung, Quelle: Daten nach (Expert:inneninterview 2021i; Sahn et al. 1998)

# Prozessketten und Produkte:

## Prozesskette der Gießerei-Industrie



### Legende:

Dunkelgrün eingefärbt: Prozessschritte im Fokus der Betrachtungen im Rahmen dieser Studie

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

### Anmerkungen:

Der Prozessschritt der Ofenvorbereitung, Pfannenwirtschaft ist ebenfalls energieintensiv, wird aber nicht weiter betrachtet.

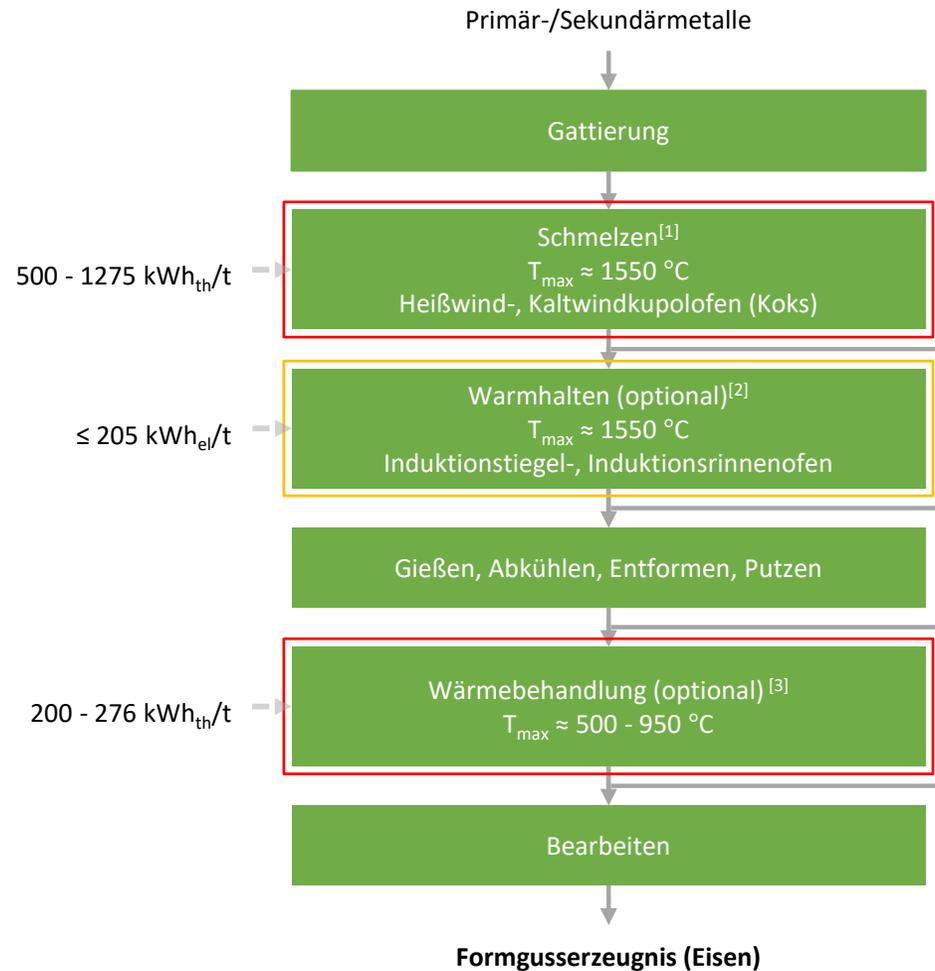
Der Prozessschritt der Wärmebehandlung ist optional und nur für spezifische Legierungen und spezifisch einzustellende Eigenschaften des Gussbauteils relevant.

Quellen:

nach (Institut für Gießereitechnik gGmbH (IfG) 2008) (eigene Darstellung)

# Prozessketten und Produkte:

## Prozesskette Eisen Formguss



### Legende:

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

Orange markiert: Energieintensive Prozessschritte, die größtenteils elektrifiziert sind

### Anmerkungen:

Die Prozessschritte Gießen, Abkühlen, Entformen und Putzen wurden für eine vereinfachte Darstellung zusammengefasst.

Der Prozessschritt der Wärmebehandlung wird in der Branche Härtereitechnik betrachtet.

Die Daten der Prozessschritte Warmhalten und Wärmebehandlung basieren auf Werten einzelner Anlagen.

### Quellen:

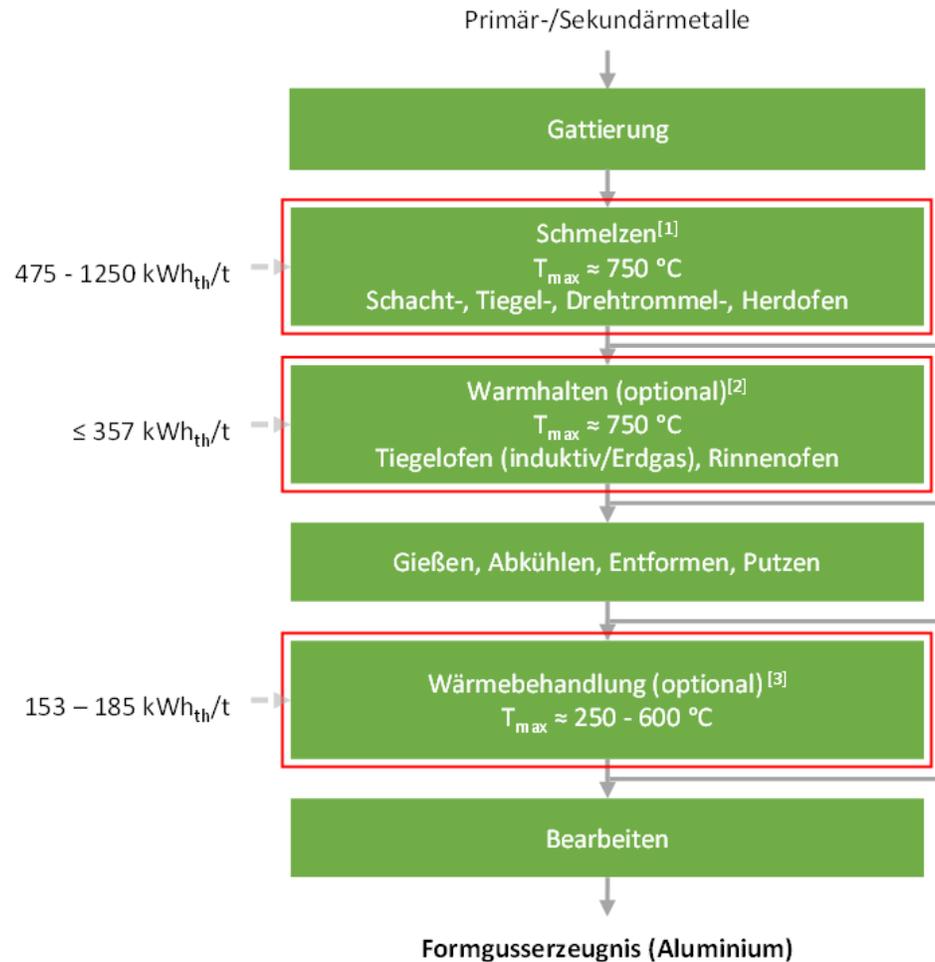
[1]: Energieverbrauch und Temperatur: Mittelwert aus Reference Document on Best Available Techniques in the Smitheries and Foundries Industry, 2005, European IPPC und Energieeffizienter Gießereibetrieb, 2008, Franzen und Ermittlung von Energie-kennzahlen für Anlagen, Herstellungsverfahren und Erzeugnisse, 1999 Layer et al. und Beste verfügbare Techniken (BVT) in ausgewählten industriellen Bereichen Teilvorhaben 3: Gießereien – Volume 3: Technikerhebung 2014; Wolff

[2]: Energieverbrauch und Temperatur: Mittelwert aus Reference Document on Best Available Techniques in the Smitheries and Foundries Industry, 2005, European IPPC und Energieeffizienter Gießereibetrieb, 2008, Franzen und Beste verfügbare Techniken (BVT) in ausgewählten industriellen Bereichen Teilvorhaben 3: Gießereien – Volume 3: Technikerhebung 2014; Wolff und Ermittlung von branchenspezifischen Potentialen zum Einsatz von erneuerbaren Energien in besonders energieintensiven Indust-riesektoren am Beispiel der Gießerei-Industrie, 2013, Bosse et al.

[3]: Energieverbrauch und Temperatur: Mittelwert aus Reference Document on Best Available Techniques in the Smitheries and Foundries Industry, 2005, European IPPC und Energieeffizienter Gießereibetrieb, 2008, Franzen und Praxishandbuch Thermopro-zesstechnik Band 1, 2010 Pfeifer et al. und Praxishandbuch Thermoprozesstechnik Band 2, 2011 Pfeifer et al. und <https://www.next-foundry.com/giesserei-lexikon/glossar/waermebehandlung>

# Prozessketten und Produkte:

## Prozesskette Aluminium Formguss



### Legende:

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

### Anmerkungen:

Die Prozessschritte Gießen, Abkühlen, Entformen und Putzen wurden für eine vereinfachte Darstellung zusammengefasst.

Der Prozessschritt der Wärmebehandlung wird in der Branche Härtereitechnik betrachtet.

Die Daten der Prozessschritte Warmhalten und Wärmebehandlung basieren auf Werten einzelner Anlagen.

### Quellen:

[1]: Energieverbrauch und Temperatur: Mittelwert aus Reference Document on Best Available Techniques in the Smitheries and Foundries Industry, 2005, European IPPC und Energieeffizienter Gießereibetrieb, 2008, Franzen und Ermittlung von Energie-kennzahlen für Anlagen, Herstellungsverfahren und Erzeugnisse, 1999 Layer et al. und Beste verfügbare Techniken (BVT) in aus-gewählten industriellen Bereichen Teilvorhaben 3: Gießereien – Volume 3: Technikerhebung 2014; Wolff und Effiziente Ener-gieverwendung in der Industrie– Teilprojekt „Metallschmelzbetriebe“ Effiziente Energienutzung in Nicht-Eisen-Metall-Schmelzbetrieben, Bayerisches Landesamt für Umweltschutz, 2005 Stephan et al.

[2]: Energieverbrauch und Temperatur: Mittelwert aus Reference Document on Best Available Techniques in the Smitheries and Foundries Industry, 2005, European IPPC und Energieeffizienter Gießereibetrieb, 2008, Franzen und Beste verfügbare Techniken (BVT) in ausgewählten industriellen Bereichen Teilvorhaben 3: Gießereien – Volume 3: Technikerhebung 2014; Wolff und Er-mittlung von branchenspezifischen Potentialen zum Einsatz von erneuerbaren Energien in besonders energieintensiven Indust-riesektoren am Beispiel der Gießerei-Industrie, 2013, Bosse et al.

[3]: Energieverbrauch und Temperatur: Mittelwert aus Reference Document on Best Available Techniques in the Smitheries and Foundries Industry, 2005, European IPPC und Energieeffizienter Gießereibetrieb, 2008, Franzen und Praxishandbuch Thermopro-zesstechnik Band 1, 2010 Pfeifer et al. und Praxishandbuch Thermoprozesstechnik Band 2, 2011 Pfeifer et al. und <https://www.giessereilexikon.com/giesserei-lexikon/Encyclopedia/show/waermebehandlung-von-aushaertbaren-aluminium-legierungen-1088/?cHash=f5f2b7908442aebc279c3ea69131043a>

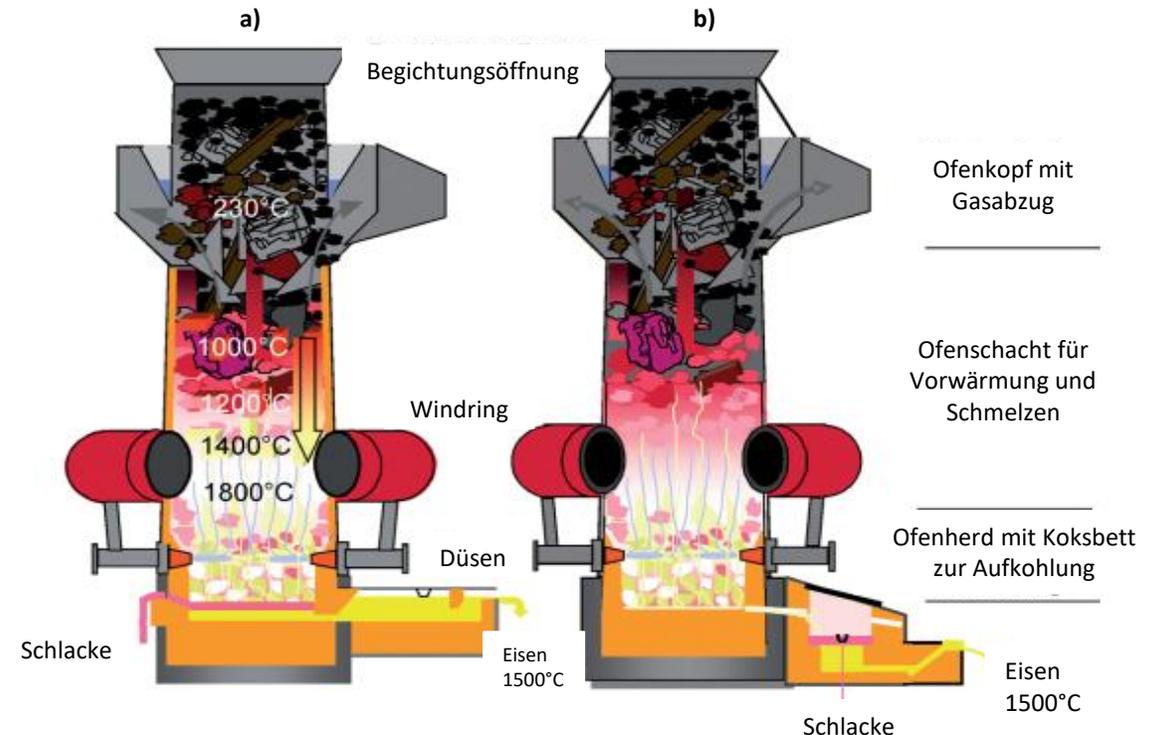
# Thermoprozessanlagen (exemplarisch, nicht maßstabsgetreu)

Anzahl der Schmelzanlagen in deutschen Eisen-, Stahl- und NE-Metall-Gießereien

Werkstoffgruppe	Schmelzöfen	Energieträger	Anzahl der verwendeten Öfen
Eisen	Kaltwindkupolöfen	Koks	ca. 30 Kupolofenanlagen mit je 2 Öfen
	Heißwindkupolöfen	Koks, Erdgas	ca. 25
	Induktionsöfen	Strom	> 140
	Drehtrommelöfen	Erdgas, Erdöl	< 10
Stahl	Induktionsöfen	Strom	> 40
	Lichtbogenöfen	Strom	ca. 15
NE-Metalle	Gasbeheizte Öfen	Erdgas	1.500 bis 2.000
	Ölbeheizte Öfen	Erdöl	600 bis 800
	Elektrisch beheizte Öfen	Strom	900 bis 1.200

Quelle: nach Wolff- Innovative Techniken: Beste verfügbare Techniken (BVT) in ausgewählten industriellen Bereichen. Teilvorhaben 3: Gießereien, 2014; (Expert:inneninterview 2021i)

Ausführungen des Heißwindkupolofens a) gefuttert mit atmosphärischem Siphon, b) futterlos mit Drucksiphon



Quelle: (Lemperle und Rachner 2011)

# Auswahl der Anwendungen und Referenztechniken anhand von Energieverbrauch und CO<sub>2</sub>-Emissionen

## Abschätzung charakteristischer Anlagenkennzahlen zur Auswahl der betrachteten Anwendungen und Referenztechniken „Gießerei-Industrie“ in Deutschland

Anlagentypen	Jährlicher Anlagendurchsatz		Jährlicher Energieverbrauch		Energiebedingte CO <sub>2</sub> -Emissionen	
<b>Gusseisen (Kat. 1 und 2 gesamt)</b>	<b>ca. 4,1 Mio. t</b>	<b>Anteil</b>	<b>2.033 - 3.695 GWh</b>	<b>Anteil</b>	<b>880 - 1.575 Tsd. t</b>	<b>Anteil</b>
Heißwind-, Kaltwind-Kupolofen (fossil)	2,1 Mio. t	50 %	1.046 - 2.255 GWh	51 - 61 %	410 - 884 Tsd. t	47 - 56 %
Induktionstiegelofen (elektrisch)	1,9 Mio. t	46 %	907 - 1.343 GWh	36 - 45 %	453 - 672 Tsd. t	43 - 52 %
Drehtrommelofen (fossil)	0,2 Mio. t*	4 %	80 - 96 GWh	3 - 4 %	16 - 19 Tsd. t	1 - 2 %
<b>Stahlguss (Kat. 3 gesamt)</b>	<b>ca. 185 Tsd. t</b>	<b>Anteil</b>	<b>93 - 148 GWh</b>	<b>Anteil</b>	<b>46 - 74 Tsd. t</b>	<b>Anteil</b>
Induktionstiegel-, Lichtbogenofen (elektrisch)	185,0 Tsd. t	100 %	93 - 148 GWh	100 %	46 - 74 Tsd. t	100 %
<b>Aluminiumguss (Kat. 4 bis 5 gesamt)</b>	<b>ca. 1 Mio. t</b>	<b>Anteil</b>	<b>1.490 - 1.680 GWh</b>	<b>Anteil</b>	<b>340 - 387 Tsd. t</b>	<b>Anteil</b>
Schacht-, Tiegel-, Drehtrommelofen (fossil)	0,8 Mio. t**	80 %	1.360 - 1.520 GWh	90 - 91 %	275 - 307 Tsd. t	79 - 81 %
Induktions-, und Tiegelöfen (elektrisch)	0,2 Mio. t**	20 %	130 - 160 GWh	9 - 10 %	65 - 80 Tsd. t	19 - 21 %
<b>Verteilung</b>						
Anteil Anlagen mit elektrischer Energie beheizt				30 - 31 %		41 - 45 %
Anteil Anlagen mit fossiler Energie beheizt				69 - 70 %		55 - 59 %
<b>Davon im Rahmen der Studie betrachteten Anlagentypen (fett)</b>				<b>97 - 98%</b>		<b>98 %</b>

\* \* Der Anteil von Drehtrommelöfen wird mit < 10 Anlagen angegeben (Wolff 2014). Der Anteil an der gesamten Produktionsmenge innerhalb Kategorie 1 und Kategorie 2 wird für die weiteren Betrachtungen im Rahmen dieser Studie mit < 5 % angenommen.

\*\* Die jährliche Al-Produktionsmenge liegt bei rund 1 Mio. t, welche überwiegend mit gasbeheizten Schacht- und Tiegelöfen hergestellt wird (Expert:inneninterview 2021d). Die Verteilung wird für die weiteren Betrachtungen im Rahmen dieser Studie mit 80/20 geschätzt.

Quellen: (Umweltbundesamt (UBA) 2016, 2019)

# Betrachtete Anwendungen und Referenztechniken

Referenztechnik	
Definition	kontinuierlicher Schmelzofen Gusseisen mit Koksbeheizung
Anwendung	kontinuierliches Schmelzen Gusseisen ( $T_{\text{Schmelze,max}} \approx 1500^\circ\text{C}$ )
Thermoprozessanlage(n)	Kaltwindkupolofen, Heißwindkupolofen
Beheizungstechnologie(n)	Verbrennung von Koks (Zufeuerung mit Erdgas/Sauerstoff möglich*)

Referenztechnik	
Definition	kontinuierlicher Schmelzofen Aluminium Formguss mit Erdgasbeheizung
Anwendung	kontinuierliches Schmelzen Aluminium Formguss ( $T_{\text{Schmelze,max}} \approx 750^\circ\text{C}^*$ )
Thermoprozessanlage(n)	Schachtofen
Beheizungstechnologie(n)	Erdgasbeheizung (seltener Erdölbeheizung)

# Definition von Alternativtechniken

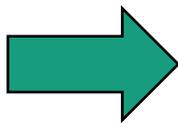
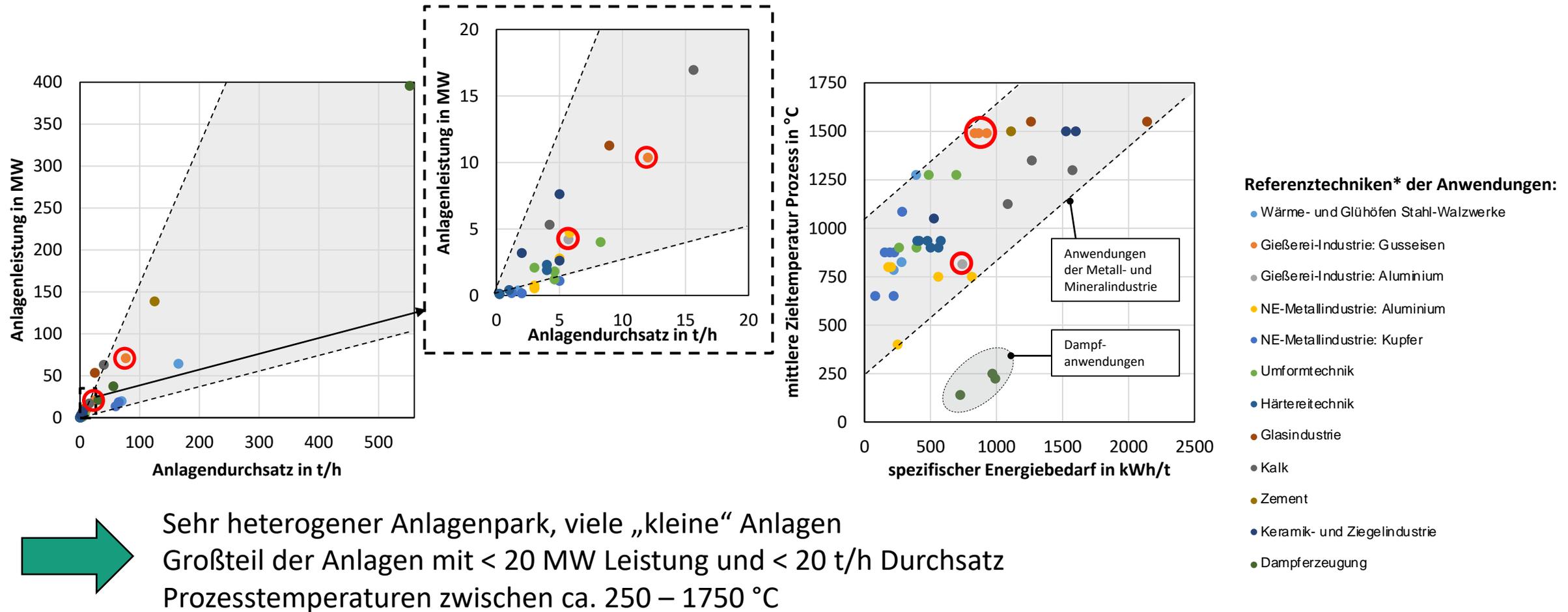
<b>Technik und Technologie</b>	
<i>Referenztechnik</i>	<i>kontinuierlicher Schmelzofen Gusseisen mit Koks beheizt (Kaltwind-, Heißwindkupolofen)</i>
Alternative Beheizungstechnologie(n)	Biokoks/Biokoks-Staub Erdgas/EE-Methan (als Brückentechnologie) Elektrifizierung Wasserstoffbeheizung
Alternativtechnik(en)	kontinuierlicher Schmelzofen Gusseisen mit Biokoks/Biokoks-Staub <sup>1)</sup> kontinuierlicher Schmelzofen Gusseisen mit Erdgasbeheizung <sup>2)</sup> (koksloser Kupolofen als Brückentechnologie) kontinuierlicher Schmelzofen Gusseisen mit elektrischer Beheizung <sup>3)</sup> (als MF-Induktionstiegelofen (Mehrfenanlagen), diskontinuierlich) kontinuierlicher Schmelzofen Gusseisen mit Wasserstoffbeheizung <sup>4)</sup> (als koksloser Kupolofen mit Wasserstoffbeheizung und Stützkörpern)
<b>Technik und Technologie</b>	
<i>Referenztechnik</i>	<i>kontinuierlicher Schmelzofen Aluminium Formguss mit Erdgas beheizt</i>
Alternative Beheizungstechnologie(n)	Elektrifizierung Wasserstoffbeheizung
Alternativtechnik(en)	konti. Schmelzofen Aluminium Formguss mit elektrischer Beheizung (als MF-Induktionstiegelofen, diskontinuierlich) <sup>1)</sup> konti. Schmelzofen Aluminium Formguss mit Wasserstoffbeheizung

# Erhebung von Kenndaten: „kontinuierliches Schmelzen Gusseisen (hohe Kapazität)“

Technik	Referenztechnik	Alternativtechnik 1	Alternativtechnik 2	Alternativtechnik 3	Alternativtechnik 4	Einheit
Beheizungstechnologie	Koksbeheizung	Biokoksbeheizung	Erdgas-/EE-Methanbeheizung	Wasserstoffbeheizung	Elektrifizierung	
Thermoprozessanlagen	Kupolofen <sup>1)</sup>	Kupolofen <sup>1)</sup>	koksloser Kupolofen	koksloser Kupolofen	MF-Induktionsofen	
Produkt	Gusseisen					
Investition Neubau	56,7	56,7	128,0	128,0	21,4	EUR/tKap.
Investition Modernisierung	5,7	5,7	7,5	7,5	3,2	EUR/tKap.
Minimale Investition Neubau	56,7	56,7	108,8	108,8	21,4	EUR/tKap.
Min. Investition Modernisierung	5,7	5,7	6,4	6,4	3,2	EUR/tKap.
TRL	9	< 8	< 7	< 5	9	-
Energieträger 1	Koks	Biokoks	Erdgas	EE-Wasserstoff	Strom	-
Energieträger 2	keine	keine	Strom	Strom	keine	-
Energieträger 3	keine	keine	keine	keine	keine	-
Spez. Energiebedarf 1	0,925	0,925	0,750	0,750	0,627	MWh/tPr.
Spez. Energiebedarf 2	0,000	0,000	0,070	0,070	0,000	MWh/tPr.
Spez. Energiebedarf 3	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	MWh/tPr.
Min. spezifischer Energiebedarf	0,800	0,800	0,530	0,530	0,500	MWh/tPr.
Prozessb. Emissionen	0	0	0	0	0,000	tCO <sub>2</sub> /tPr.
Betriebs- und Wartungskosten	0,4	0,4	2,8	2,8	1,1	EUR/tKap.
Abschreibungszeitraum	10	10	13	13	10	a
Lebensdauer	43	43	50	50	30	a
Repräsentative Kapazität	530.000	530.000	90.000	90.000	210.000	t Jahresleistung
Auslastung	0,95	0,95	0,90	0,90	0,80	1,00
Anteil Bestand 2020	100 %	0 %	0 %	0 %	0 %	
Verfügbar ab	2020	2020	2020	2030	2020	
Verfügbar bis	2050	2050	2050	2050	2050	

Annahmen, Legende und Quellen siehe Bericht

# These 1: Der Anlagenpark der Industrieöfen ist heterogen



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

Detaillierte Annahmen, Legende und Quellen siehe Bericht

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

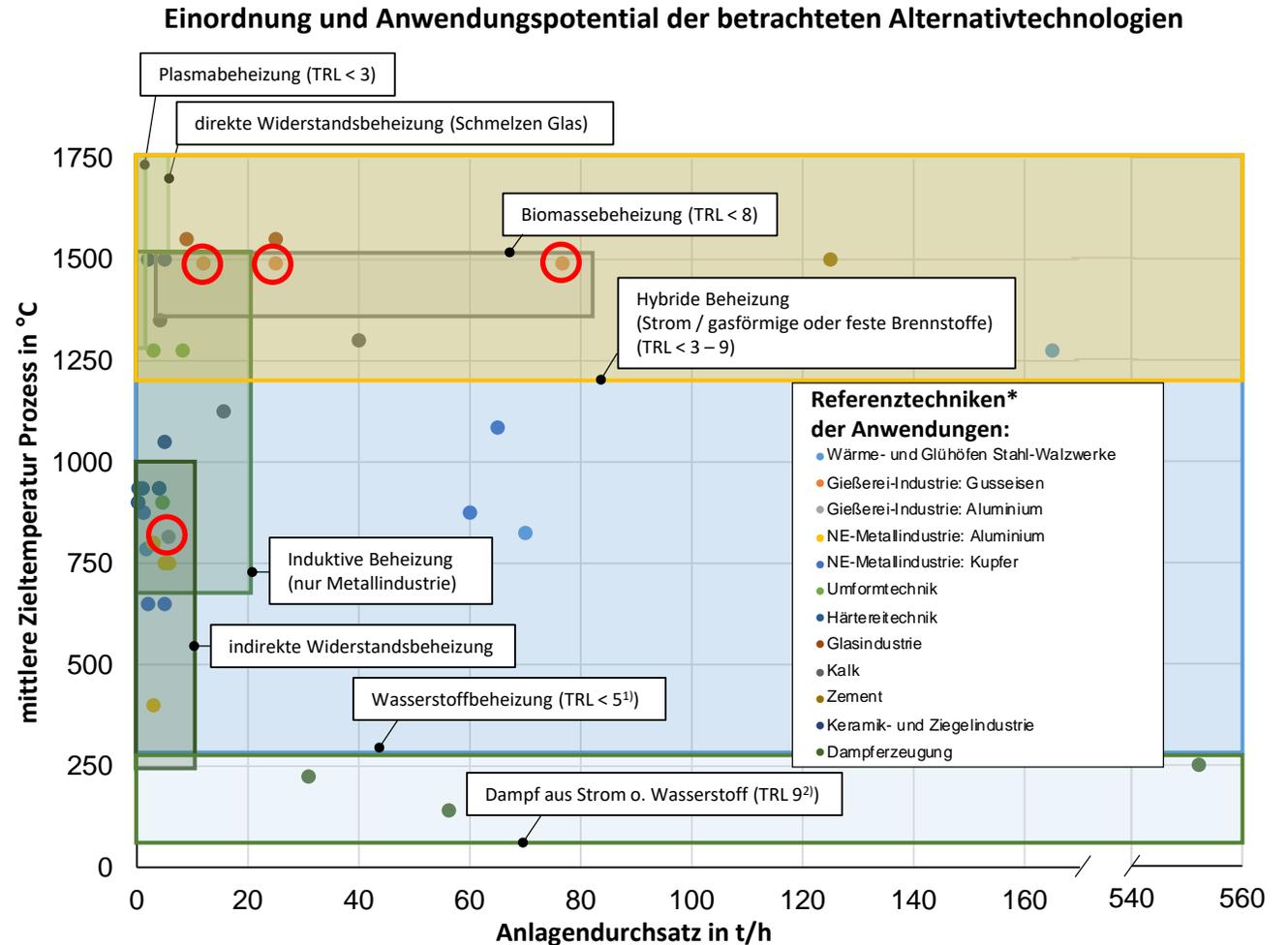
- **Elektrische Beheizungstechnologien** sind für einige Anwendungen der **Metallindustrie** bereits Stand der Technik (TRL = 9), sie werden im Anlagenpark in Deutschland jedoch vielfach nicht eingesetzt.
- **Elektrische Beheizungstechnologien** sind in für die Anwendungen der **Mineralindustrie** nicht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

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

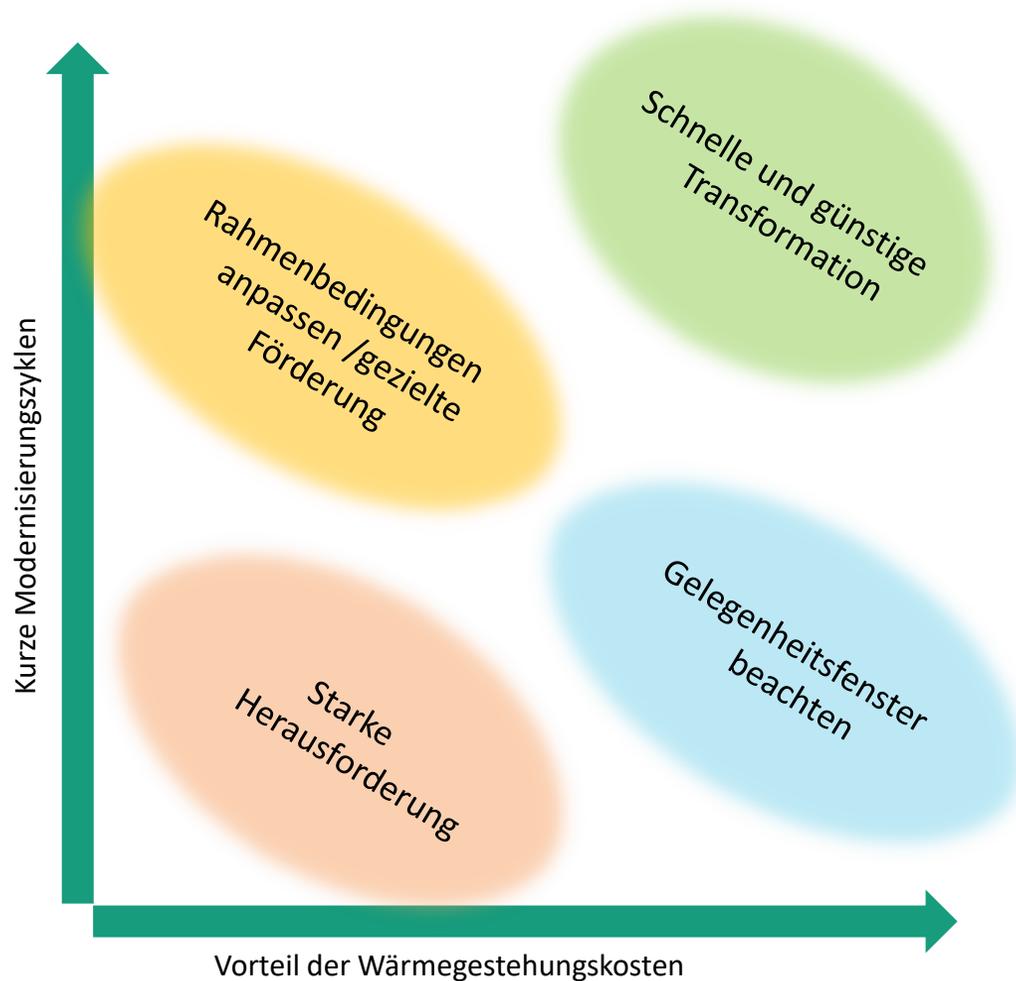
		Branche und Anwendung (zusammengefasst)																	
		Aluminium: Schmelzen, Erwärmen und Wärmebehandlung	Gießerei-Industrie: Schmelzen Al-Formguss	Kupfer: Schmelzen, Erwärmen und Wärmebehandlung	Gießerei-Industrie: Schmelzen Gusseisen	Härtereitechnik: Aufkohlen und Austenitisieren	Umformtechnik: Erwärmung Stahlblechzuschnitte	Stahl-Walzwerke: Wärmebehandlung	Keramik- und Ziegelindustrie: Brennen Ziegel und Feuerfest	Glasindustrie: Schmelzen Behälterglas	Glasindustrie: Schmelzen Flachglas	Kalk: Brennen im GGR-Ofen	Kalk: Brennen im Drehrohrfen	Zement: Brennen Zementklinker	Umformtechnik: Diskont. Erwärmung	Umformtechnik: Konti. Erwärmung	Stahl-Walzwerke: Konti. Erwärmung	Kalk: Brennen im Schachtofen	Dampferzeugung
Energieträger Referenztechnik		Gas	Koks					Gas				BS-Mix	Gas	Koks	Gas				
TRL der Alternativtechnologie	Elektrifizierung	9	9	9	9	9	9	< 4	< 4	4/9 <sup>1)</sup>	< 3	< 3	< 3	< 3	< 2	< 2	< 2	< 2	9 <sup>7)</sup>
	Wasserstoffbeheizung	< 4	< 5	< 5	< 5	< 4	< 5	< 4	< 5	< 4	< 4	< 4	< 4	< 4	< 5	< 5	< 4	< 2	9
	Biomassebeheizung	n.v.	n.v.	n.v.	< 8 <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.

# 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.



# Wir untersuchen zwei Dimensionen der wirtschaftlichen Bewertung

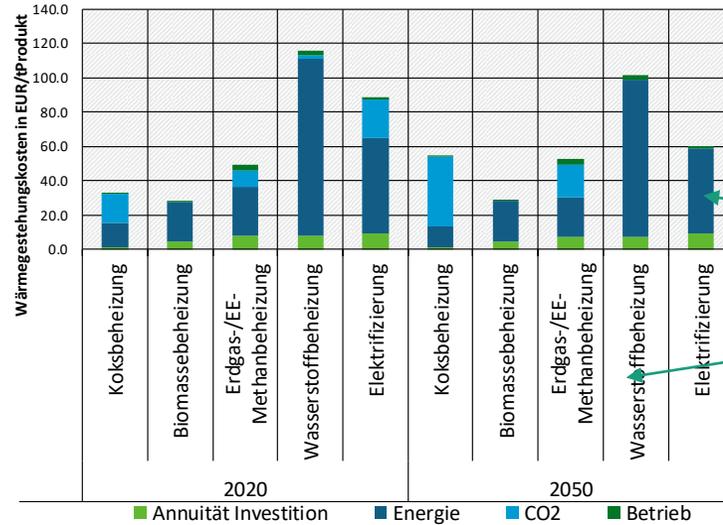


- Modernisierungszyklen
  - Orientieren sich an Abschreibungszeiträumen
  - Vorzeitiger Austausch von Anlagen ist eine Option (und in vielen Fällen notwendig)
- Wärmegestehungskosten
  - Investition, Energie, CO<sub>2</sub>, Betrieb und Wartung
  - Differenz zu Referenztechnologie ist maßgeblich

# Dimension 1: Wärmegestehungskosten bestimmen die Attraktivität der Techniken

## Gießerei-Industrie

Kontinuierliches Schmelzen Gusseisen (hohe Kapazität)



Eigene Berechnung Fraunhofer ISI

Referenzfall

Transformation

Kostenkomponenten

Techniken

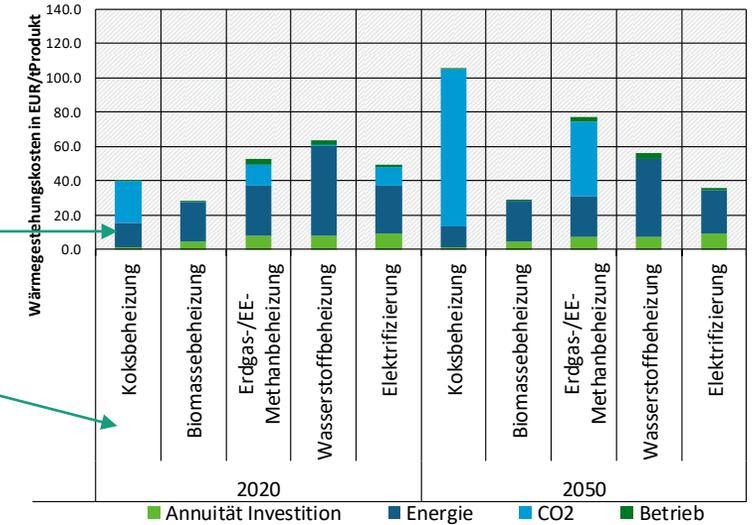
Gas: 30€/MWh  
 Strom: 124 €/MWh  
 CO<sub>2</sub>: 125€/t

Gas: 37€/MWh  
 Strom: 62 €/MWh  
 CO<sub>2</sub>: 300€/t

Angenommene, nicht der aktuellen Realität entsprechende Rahmenbedingungen!

## Gießerei-Industrie

Kontinuierliches Schmelzen Gusseisen (hohe Kapazität)



Eigene Berechnung Fraunhofer ISI

- Konventionelle Technik (Koks) ist auch bis 2050 im Referenzfall konkurrenzfähig
- CO<sub>2</sub>-Preise können Energieträger-Kostendifferenz aber gut ausgleichen
- Sehr attraktiv scheint Biomassenutzung
  - Hier ist aber Vorsicht geboten, da nachhaltige Biomasse stark begrenzt ist!
  - Die Preisannahme ist damit auch besonders unsicher.

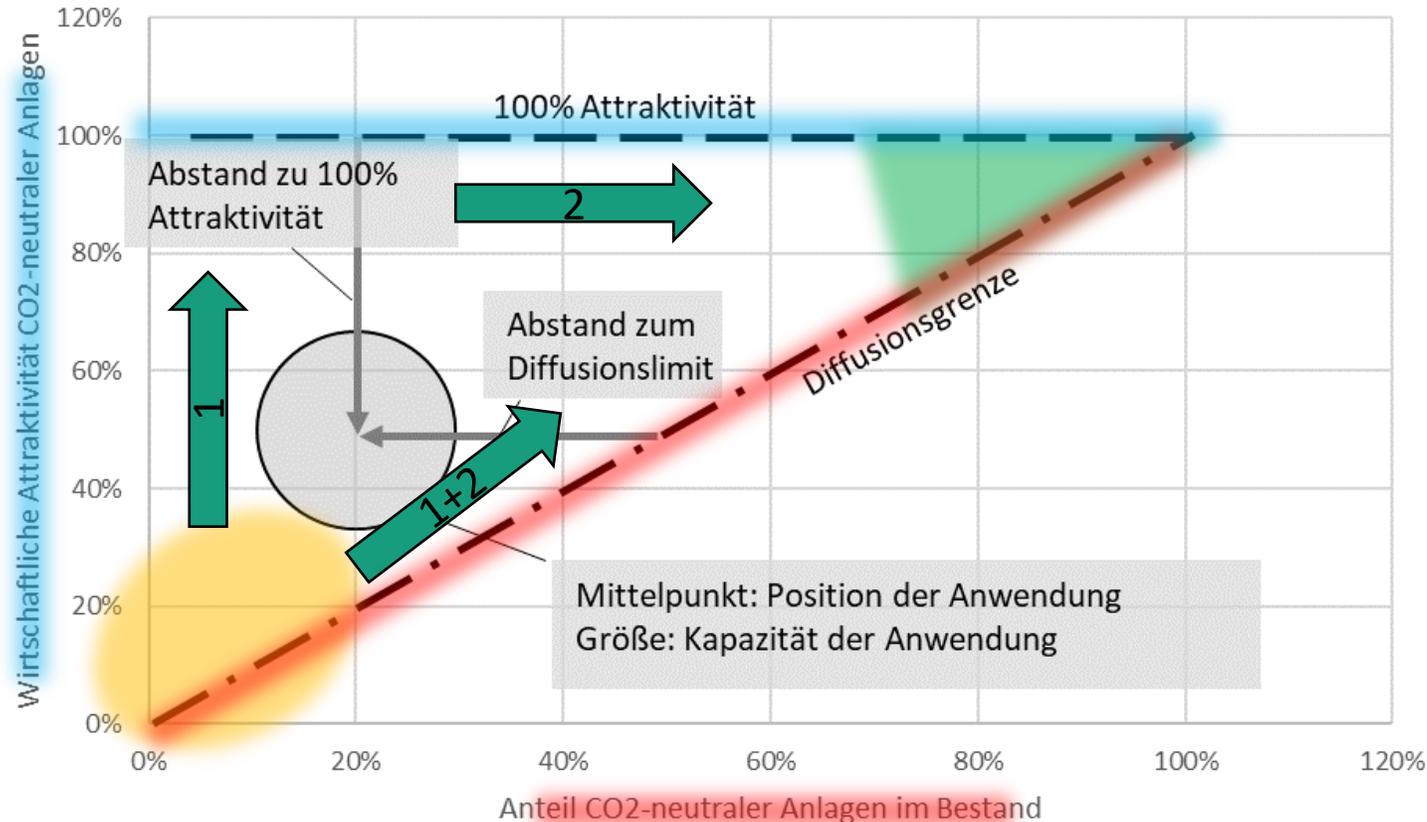
- Im Transformationsfall (hohe CO<sub>2</sub>-Preise!) wird die Referenztechnik unwirtschaftlich.
- Direkte Elektrifizierung und Biomasse sind attraktiv.

# Dimension 2: Modernisierungszyklen bestimmen die Austauschrate der Anlagen

#	Anwendung	Lebensdauer	Lebensende bei Invest	Lebensende														
				2020	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															

- Investitionen in fossile Anlagen werden nicht das Ende ihrer technischen Lebensdauer erreichen.
- Bestandsanlagen ab 2000 sind gefährdet
- Für ältere Anlagen existiert **genau eine Gelegenheit** für Reinvestition.
- Damit stehen diese Anwendungen bei Weitem nicht allein.
- Niedrigschwelligem Brennstoffwechsel kommt daher besondere Bedeutung zu.
  - Aber: Verfügbarkeit von Wasserstoff, PtG und Biomasse ist fraglich.
- Empfehlung:
  - Standortspezifisch Verfügbarkeit prüfen.
  - Elektrifizierung ernsthaft berücksichtigen.
  - NICHT in fossil investieren und auf Wasserstoff hoffen.

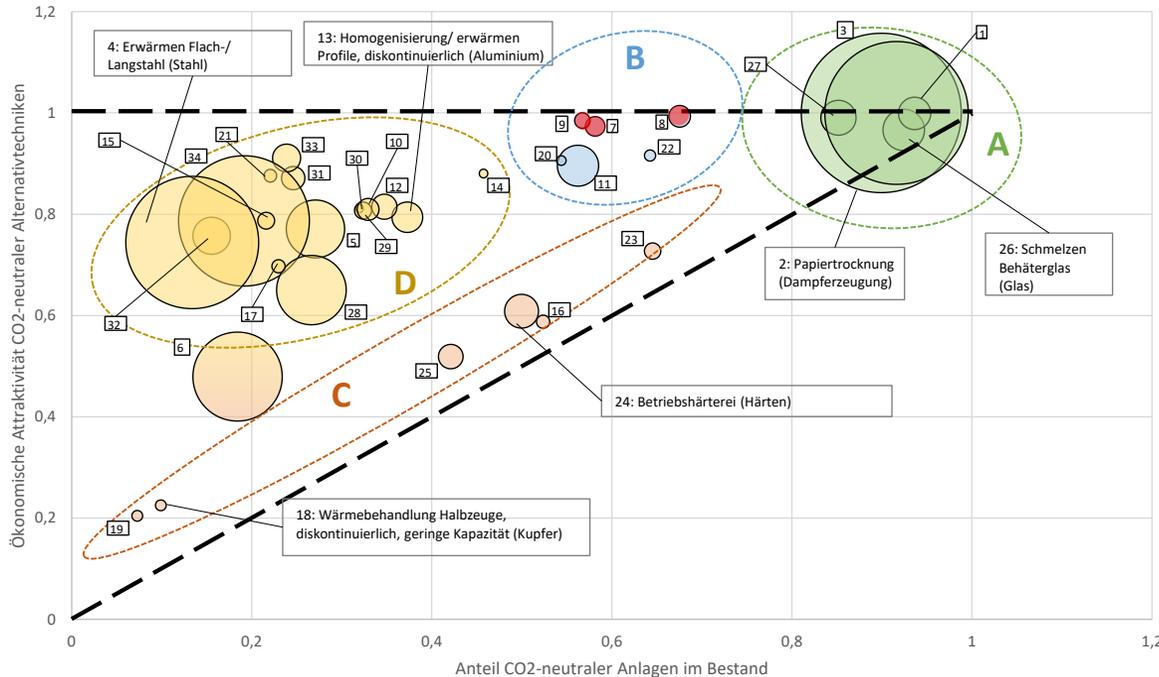
# Erläuterung Diffusionsabbildung



## ■ Kernbotschaften

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

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



Transformationszenario, 2040

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

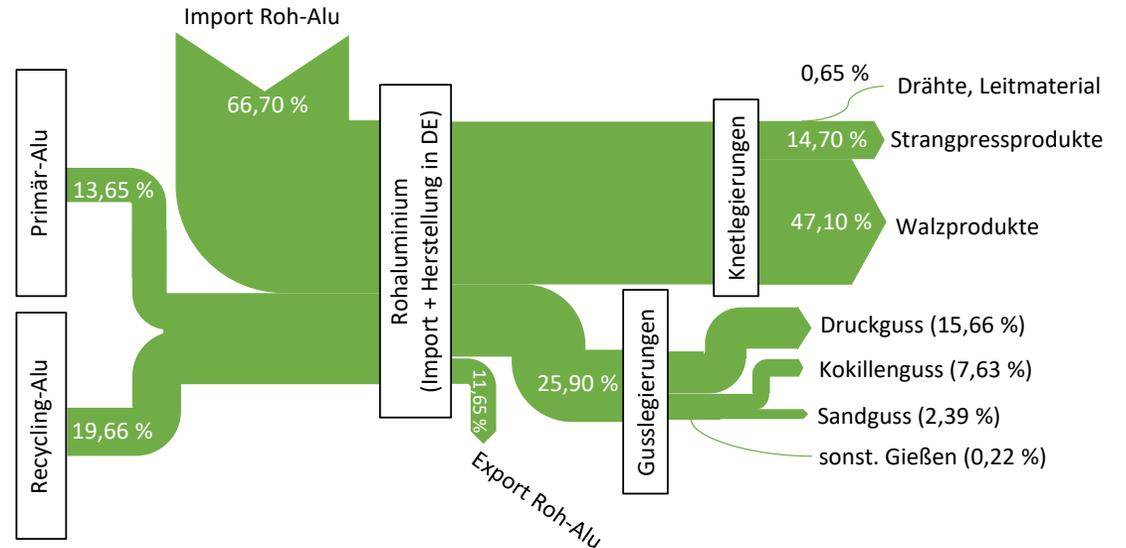
- A ("Advantaged": im Vorteil): Anwendungen, die früh wirtschaftlich attraktive CO<sub>2</sub>-neutrale Techniken zur Verfügung haben und durch geringe Anlagenlebensdauern vergleichsweise schnell wechseln können. Diese Anwendungen können dadurch im maximalen Reformpaket eine (beinahe) vollständige Dekarbonisierung 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.

---

## Ergebnisse Teil II: Branche Aluminium

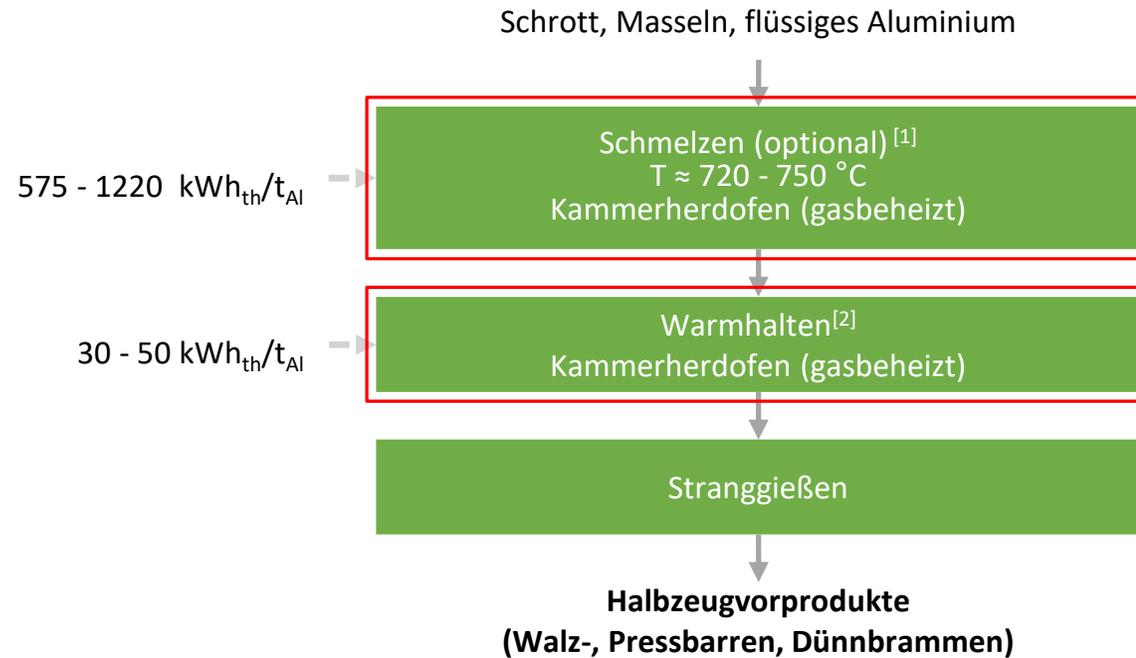
# Kurzbeschreibung der Branche und Fokus der Studie

- 2018 wurden in Deutschland 528.000 t Hüttenaluminium und 761.000 t Recyclingaluminium hergestellt
- Der größte Absatzmarkt ist mit 48% der Verkehrssektor, gefolgt von Bauwesen (15%) und der Verpackungsindustrie (10%)
- Die Aluminiumindustrie ist in hohem Maße von Rohstoffimporten abhängig, sodass Lieferschwierigkeiten und Produktionsengpässe entstehen können
- Die Primäraluminiumelektrolyse wurde in dieser Studie nicht betrachtet

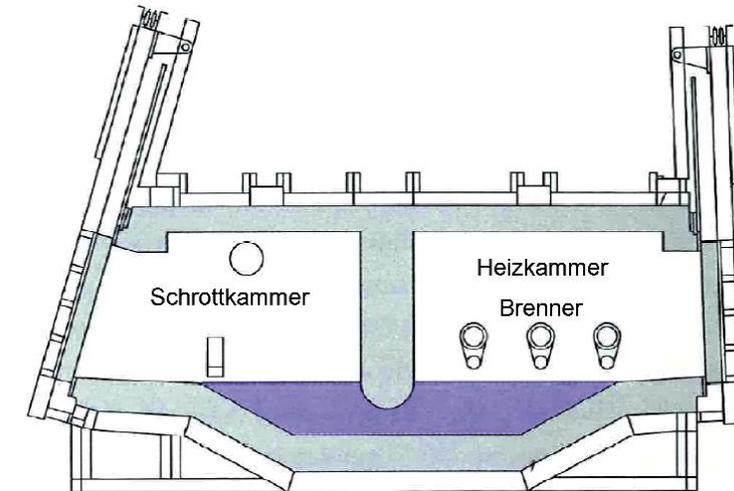


eigene Darstellung nach, Quellen: (Gesamtverband der Aluminiumindustrie (GDA) 2019b, 2019c)  
Rohaluminiumerzeugung in Deutschland in 2018: 1.290.600 t  
Import von Rohaluminium in 2018: 2.584.500 t

# Prozessketten und Produkte: Aluminiumhalbzeuggussprodukte



Zweikammerherdofen zum Schmelzen von Aluminium



Quelle: (Valder 2011b)

## Legende:

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

## Anmerkungen:

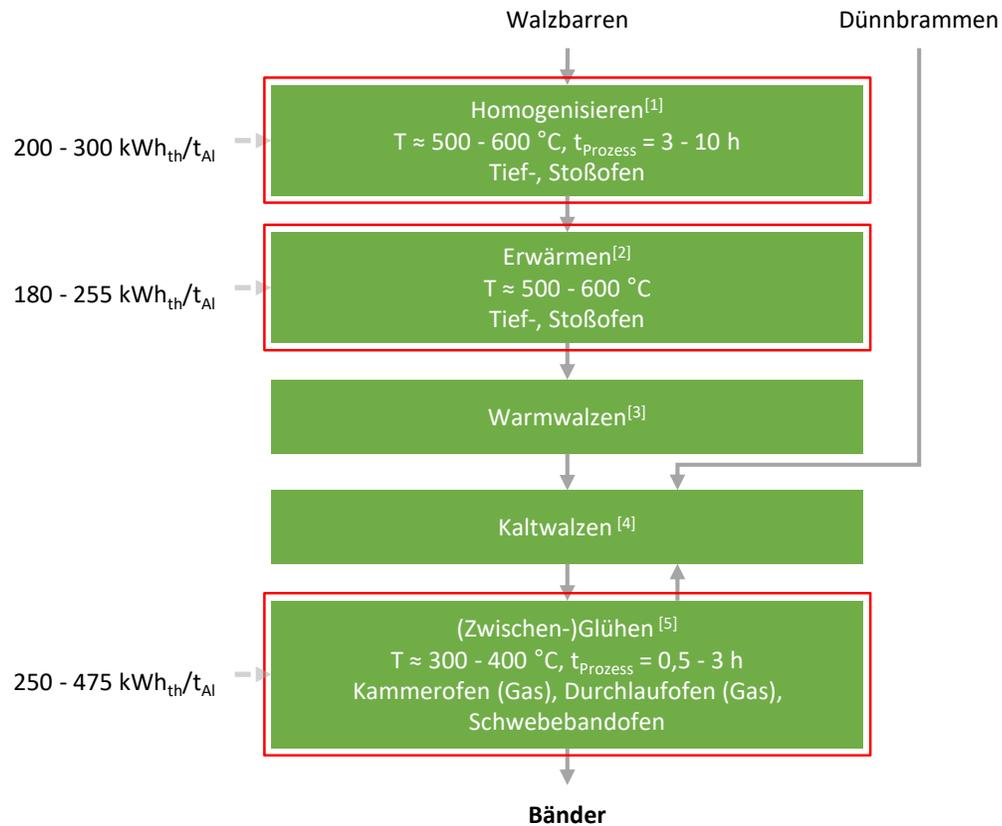
Der Hinweis „optional“ beim Schmelzprozess bezieht sich darauf, dass auch die Anlieferung von Flüssigschmelze in Gießereien möglich ist. Diese Möglichkeit spielt jedoch aktuell in Deutschland eine untergeordnete Rolle.

Quellen:

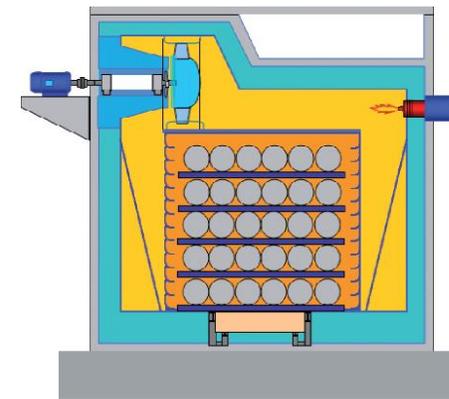
[1]: Energieverbrauch: gerundeter Mittelwert aus (European Commission 2017b), verglichen mit (Valder 2011b); Temperatur entnommen aus (Valder 2011b)

[2]: Energieverbrauch: gerundeter Mittelwert aus (European Commission 2017b), verglichen mit (Valder 2011b)

# Prozessketten und Produkte: Walzen von Aluminium



Kammerofen zum Erwärmen von Aluminium



Quelle: (Valder 2011d)

## Legende:

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

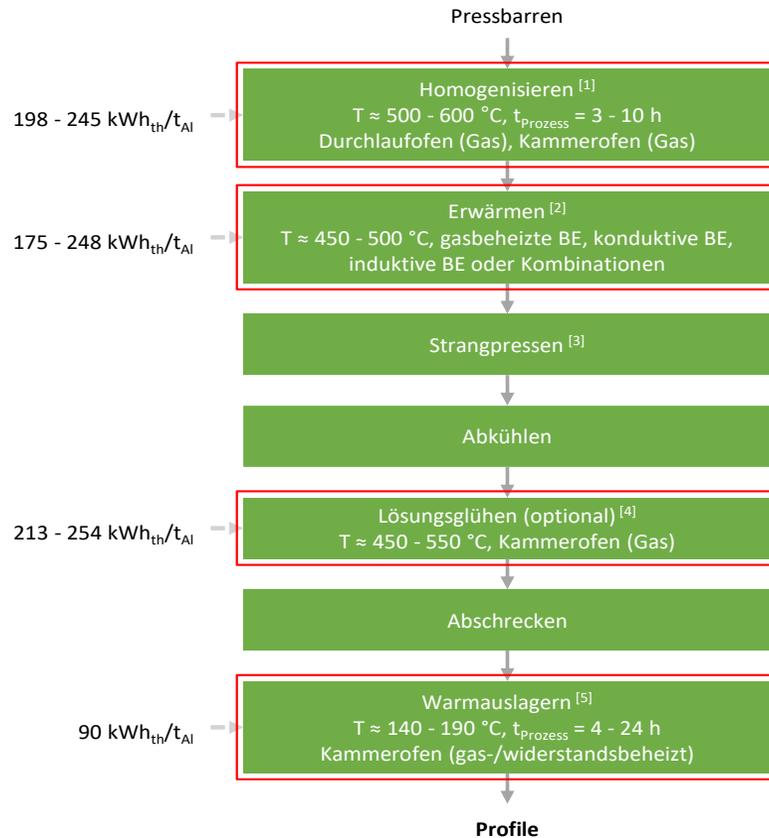
Quellen:

[1]: Energieverbrauch: Intervall entnommen aus (Menzler 2011b). Temperatur: Intervall entnommen aus (Gesamtverband der Aluminiumindustrie (GDA) 2019a). Dauer: Intervall entnommen aus (Drossel et al. 2018)

[2]: Energieverbrauch: Berechnet aus Temperaturwerten, theoretischem Energieverbrauch und dem Wirkungsgrad. Wirkungsgrad entnommen aus (Drossel et al. 2018). Temperatur: Intervall entnommen aus (Drossel et al. 2018)

[5]: Energieverbrauch: Entnommen aus (Neumeister 2007)

# Prozessketten und Produkte: Strangpressen von Aluminium



## Legende:

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

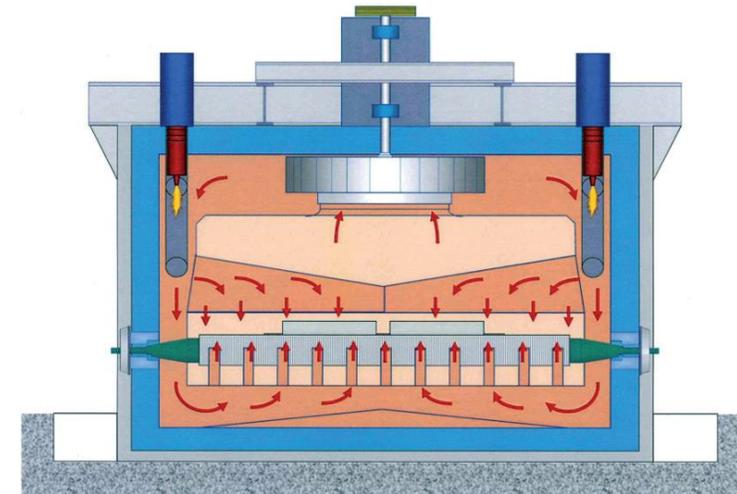
Quellen: [1]: Energieverbrauch: Intervall ermittelt aus verschiedenen Aggregaten bei (Valder 2011c). Temperatur. Intervall entnommen aus (Gesamtverband der Aluminiumindustrie (GDA) 2019a). Dauer: Intervall entnommen aus (Drossel et al. 2018)

[2]: Energieverbrauch: Intervall ermittelt aus verschiedenen Aggregaten bei (Valder 2011c). Temperatur. Intervall entnommen aus (Gesamtverband der Aluminiumindustrie (GDA) 2019a)

[4]: Energieverbrauch: Intervall ermittelt aus verschiedenen Aggregaten bei (Valder 2011c). Temperatur. Intervall entnommen aus (Gesamtverband der Aluminiumindustrie (GDA) 2019a)

[5]: Energieverbrauch: Intervall ermittelt aus verschiedenen Aggregaten bei (Valder 2011c) und (Johne 2017). Temperatur. Intervall entnommen aus (Gesamtverband der Aluminiumindustrie (GDA) 2019a)

Rollenherdofen zum Lösungsglühen



Quelle: (Pfeifer et al. 2011a)

# Auswahl der Anwendungen und Referenztechniken anhand von Energieverbrauch und CO<sub>2</sub>-Emissionen

## Abschätzung charakteristischer Anlagenkennzahlen zur Auswahl der betrachteten Anwendungen und Referenztechniken „NE-Metallindustrie Aluminium“ in DE

Anlagentypen	Jährlicher Anlagendurchsatz*		Jährlicher Energieverbrauch		Energiebedingte CO <sub>2</sub> -Emissionen	
	9,3 Mio. t	Anteil	2.428 - 4.098 GWh	Anteil	649 - 1.095 Tsd. t	Anteil
<b>Tieföfen (fossil)</b>	985 Tsd. t	11 %	195 - 292 GWh	7 - 8 %	39 - 59 Tsd. t	5 - 6 %
<b>Stoßöfen (fossil)</b>	1.005 Tsd. t	11 %	199 - 297 GWh	7 - 8 %	40 - 60 Tsd. t	5 - 6 %
<b>Kammeröfen Erwärmung (fossil)</b>	302 Tsd. t	3 %	61 - 213 GWh	3 - 5 %	35 - 51 Tsd. t	5 %
Kammeröfen Wärmebehandlung (fossil)	654 Tsd. t	7 %	57 - 111 GWh	2 - 3 %	12 - 23 Tsd. t	2 %
Kammeröfen Wärmebehandlung (elektrisch)	262 Tsd. t	3 %	22 - 27 GWh	< 1 %	11 - 14 Tsd. t	1 - 2 %
<b>Durchlauföfen Erwärmung (fossil)</b>	262 Tsd. t	3 %	52 - 62 GWh	2 %	10 - 18 Tsd. t	2 %
<b>Durchlauföfen Wärmebehandlung (fossil)</b>	57 Tsd. t	1 %	14 - 27 GWh	< 1 %	3 - 5 Tsd. t	< 1 %
<b>Schwebebandöfen (fossil)</b>	114 Tsd. t	1 %	28 - 54 GWh	< 1 %	6 - 11 Tsd. t	< 1 %
<b>Bolzenwärmanlage (fossil)</b>	235 Tsd. t	3 %	41 - 48 GWh	1 - 2 %	8 - 10 Tsd. t	< 1 %
Bolzenwärmanlage (elektrisch)	235 Tsd. t	3 %	47 GWh	1 - 2 %	23 Tsd. t	2 - 4 %
<b>Bolzenwärmanlage (hybrid)</b>	105 Tsd. t	1 %	10 - 12 GWh	< 1 %	3 - 3 Tsd. t	< 1 %
<b>Einkammerherdöfen (fossil)</b>	2.298 Tsd. t	25 %	628 - 1.061 GWh	26 %	127 - 214 Tsd. t	20 %
<b>Mehrkammerherdöfen (fossil)</b>	1.021 Tsd. t	11 %	689 - 1.072 GWh	26 - 28 %	139 - 217 Tsd. t	20 - 21 %
Tiegelinduktionsofen (elektrisch)	1.787 Tsd. t	19 %	384 - 774 GWh	16 - 19 %	192 - 387 Tsd. t	30 - 35 %
<b>Verteilung</b>						
Anteil Anlagen mit elektrischer Energie beheizt				19 - 21 %	35 - 39 %	
Anteil Anlagen mit fossiler Energie beheizt				79 - 81 %	61 - 65 %	
<b>Davon im Rahmen der Studie betrachteten Anlagentypen (fett)</b>				<b>97 %</b>	<b>97 %</b>	

\* Der Anlagendurchsatz entspricht der Produktionsmenge eines Anlagentyps für den jeweiligen Prozessschritt. Durchläuft ein Produkt mehrere Prozessschritte entlang der Prozesskette, kann der kumulierte Anlagendurchsatz die branchenspezifische Produktionsmenge um ein Vielfaches überschreiten. Einkammerherdöfen werden bspw. sowohl zum Einschmelzen als auch zum Warmhalten der Schmelze verwendet, daher wird die über sie geführte Tonnage doppelt gewertet (mit unterschiedlichen Energiebedarfen für Schmelzen und Warmhalten).

# Betrachtete Anwendungen und Referenztechniken

<b>Referenztechnik</b>	
Definition	disk. Schmelz-/Warmhalteofen Halbzeugguss Aluminium mit Erdgasbeheizung
Anwendung	disk. Schmelzen/Warmhalten Halbzeugguss Aluminium ( $T_{\text{Werkstück,max}} \approx 750^\circ\text{C}$ )
Thermoprozessanlage(n)	Kammerherdofen
Beheizungstechnologie(n)	Erdgasbeheizung
<b>Referenztechnik</b>	
Definition	konti. Homogenisierungs-/Erwärmungsöfen Alu-Band/Profil mit Erdgasbeh.
Anwendung	konti. Homogenisieren/Erwärmen Alu-Band/Profil ( $T_{\text{Werkstück,max}} \approx 600^\circ\text{C}$ )
Thermoprozessanlage(n)	Stoßofen, (Rollen-)durchlauföfen
Beheizungstechnologie(n)	Erdgasbeheizung
<b>Referenztechnik</b>	
Definition	diskonti. Homogenisierungs-/Erwärmungsöfen Alu-Band/Profil mit Erdgasbeh.
Anwendung	diskonti. Homogenisieren/Erwärmen Alu-Band/Profil ( $T_{\text{Werkstück,max}} \approx 600^\circ\text{C}$ )
Thermoprozessanlage(n)	Tieföfen, Kammeröfen, Bolzenerwärmungsanlage
Beheizungstechnologie(n)	Erdgasbeheizung
<b>Referenztechnik</b>	
Definition	kontinuierlicher Wärmebehandlungsöfen Alu-Band mit Erdgasbeheizung
Anwendung	kontinuierliche Wärmebehandlung Alu-Band ( $T_{\text{Werkstück,max}} \approx 400^\circ\text{C}$ )
Thermoprozessanlage(n)	Schwebeförderöfen, Durchlauföfen
Beheizungstechnologie(n)	Erdgasbeheizung

# Definition von Alternativtechniken

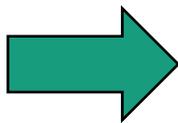
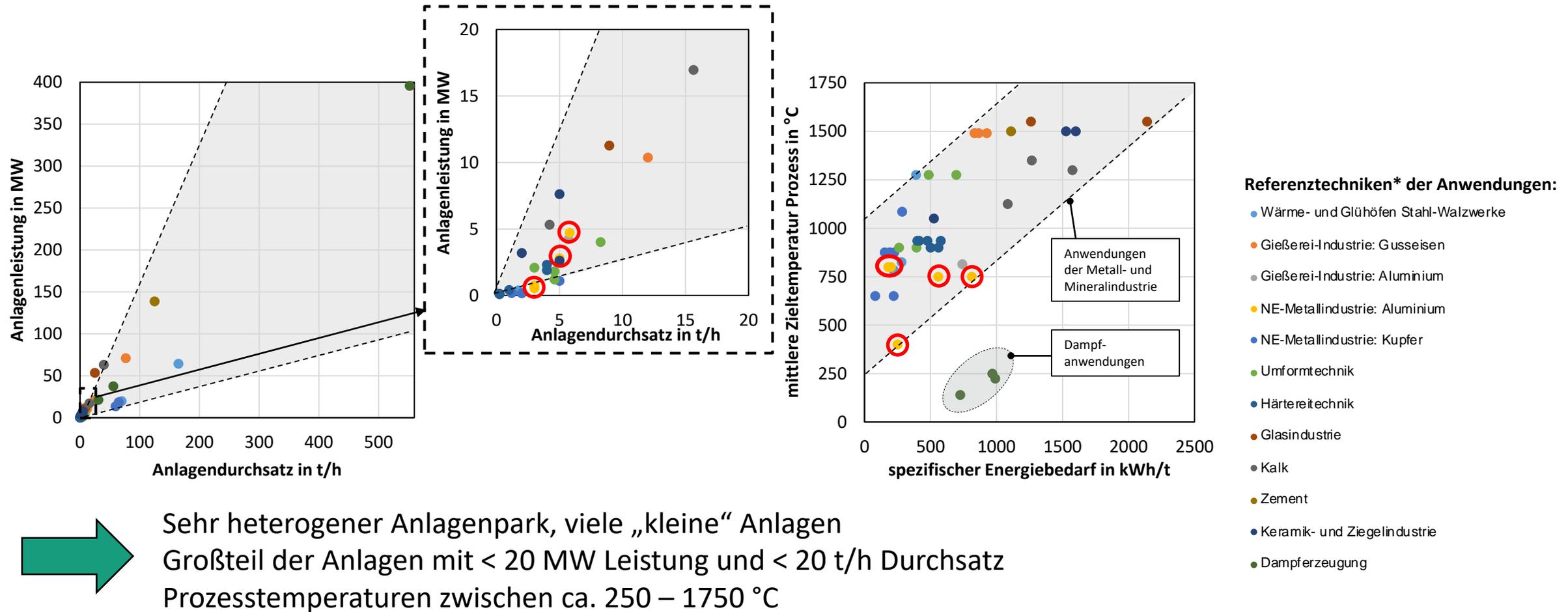
<b>Technik und Technologie</b>	
<i>Referenztechnik</i>	<i>diskontinuierlicher Schmelz-/Warmhalteofen Halbzeugguss Aluminium mit Erdgasbeheizung</i>
Alternative Beheizungstechnologie(n)	Elektrifizierung (Induktionstiegelofen) Wasserstoffbeheizung
Alternativtechnik(en)	diskontinuierlicher Schmelz-/Warmhalteofen Halbzeugguss Aluminium mit elektrischer Beheizung diskontinuierlicher Schmelz-/Warmhalteofen Halbzeugguss Aluminium mit Wasserstoffbeheizung
<b>Technik und Technologie</b>	
<i>Referenztechnik</i>	<i>kontinuierlicher Homogenisierungs-/Erwärmungsofen Alu-Band/Profil mit Erdgasbeheizung</i>
Alternative Beheizungstechnologie(n)	Elektrifizierung (Widerstandsbeheizung) Wasserstoffbeheizung
Alternativtechnik(en)	kontinuierlicher Homogenisierungs-/Erwärmungsofen Alu-Band/Profil mit elektrischer Beheizung kontinuierlicher Homogenisierungs-/Erwärmungsofen Alu-Band/Profil mit Wasserstoffbeheizung
<b>Technik und Technologie</b>	
<i>Referenztechnik</i>	<i>diskontinuierlicher Homogenisierungs-/Erwärmungsofen Alu-Band/Profil mit Erdgasbeheizung</i>
Alternative Beheizungstechnologie(n)	Elektrifizierung (Widerstandsbeheizung) Wasserstoffbeheizung
Alternativtechnik(en)	diskontinuierlicher Homogenisierungs-/Erwärmungsofen Alu-Band/Profil mit elektrischer Beheizung diskontinuierlicher Homogenisierungs-/Erwärmungsofen Alu-Band/Profil mit Wasserstoffbeheizung
<b>Technik und Technologie</b>	
<i>Referenztechnik</i>	<i>Kontinuierlicher Wärmebehandlungsofen Alu-Band mit Erdgasbeheizung</i>
Alternative Beheizungstechnologie(n)	Elektrifizierung (Widerstandsbeheizung) Wasserstoffbeheizung
Alternativtechnik(en)	kontinuierlicher Wärmebehandlungsofen Alu-Band mit elektrischer Beheizung kontinuierlicher Wärmebehandlungsofen Alu-Band mit Wasserstoffbeheizung

# Erhebung von Kenndaten: Anwendung „diskontinuierliches Schmelzen/Warmhalten Halbzeugguss Aluminium“

Technik	Referenztechnik	Alternativtechnik 1	Alternativtechnik 2	Einheit	Quellen
Beheizungstechnologie	Erdgasbeheizung	Elektrifizierung	Wasserstoffbeheizung		
Thermoprozessanlagen	Kammerherdofen	Induktionstiegelofen	Kammerherdofen		
Produkt	Aluminiumschmelze				
Investition Neubau	49,6	43,5	20,0	EUR/t <sub>Kap.</sub>	nach [1]
Investition Modernisierung	7,4	6,5	3,0	EUR/t <sub>Kap.</sub>	nach [1]
Minimale Investition Neubau	49,6	43,5	20,0	EUR/t <sub>Kap.</sub>	nach [1]
Min. Investition Modernisierung	7,4	6,5	3,0	EUR/t <sub>Kap.</sub>	nach [1]
TRL	9	9	< 4	-	nach [2]
Energieträger 1	Erdgas	Strom	EE-Wasserstoff	-	[2]
Energieträger 2	keiner	keiner	keiner	-	
Energieträger 3	keiner	keiner	keiner	-	
Spezifischer Energiebedarf 1	0,813	0,558	0,813	MWh/t <sub>Pr.</sub>	[2, 4]
Spezifischer Energiebedarf 2	0,000	0,000	0,000	MWh/t <sub>Pr.</sub>	
Spezifischer Energiebedarf 3	0,000	0,000	0,000	MWh/t <sub>Pr.</sub>	
Min. spezifischer Energiebedarf	0,550	0,558	0,813	MWh/t <sub>Pr.</sub>	[2, 4]
Prozessbedingte Emissionen	0,000	0,000	0,000	t <sub>CO2</sub> /t <sub>Pr.</sub>	
Betriebs- und Wartungskosten	1,5	3,8	1,0	EUR/t <sub>Kap.</sub>	nach [1]
Abschreibungszeitraum	8	8	8	a	[3]
Lebensdauer	30	30	30	a	nach [1]
Repräsentative Kapazität	50.000	30.000	40.000	t <sub>Jahresleistung</sub>	[2, 5]
Auslastung	0,90	0,90	0,90	1,00	nach [1]
Anteil Bestand 2020	80 %	20 %	0 %	%	nach [1, 4]
Verfügbar ab	2020	2020	2030		
Verfügbar bis	2050	2050	2050		

Annahmen, Legende und Quellen siehe Bericht

# These 1: Der Anlagenpark der Industrieöfen ist heterogen



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.

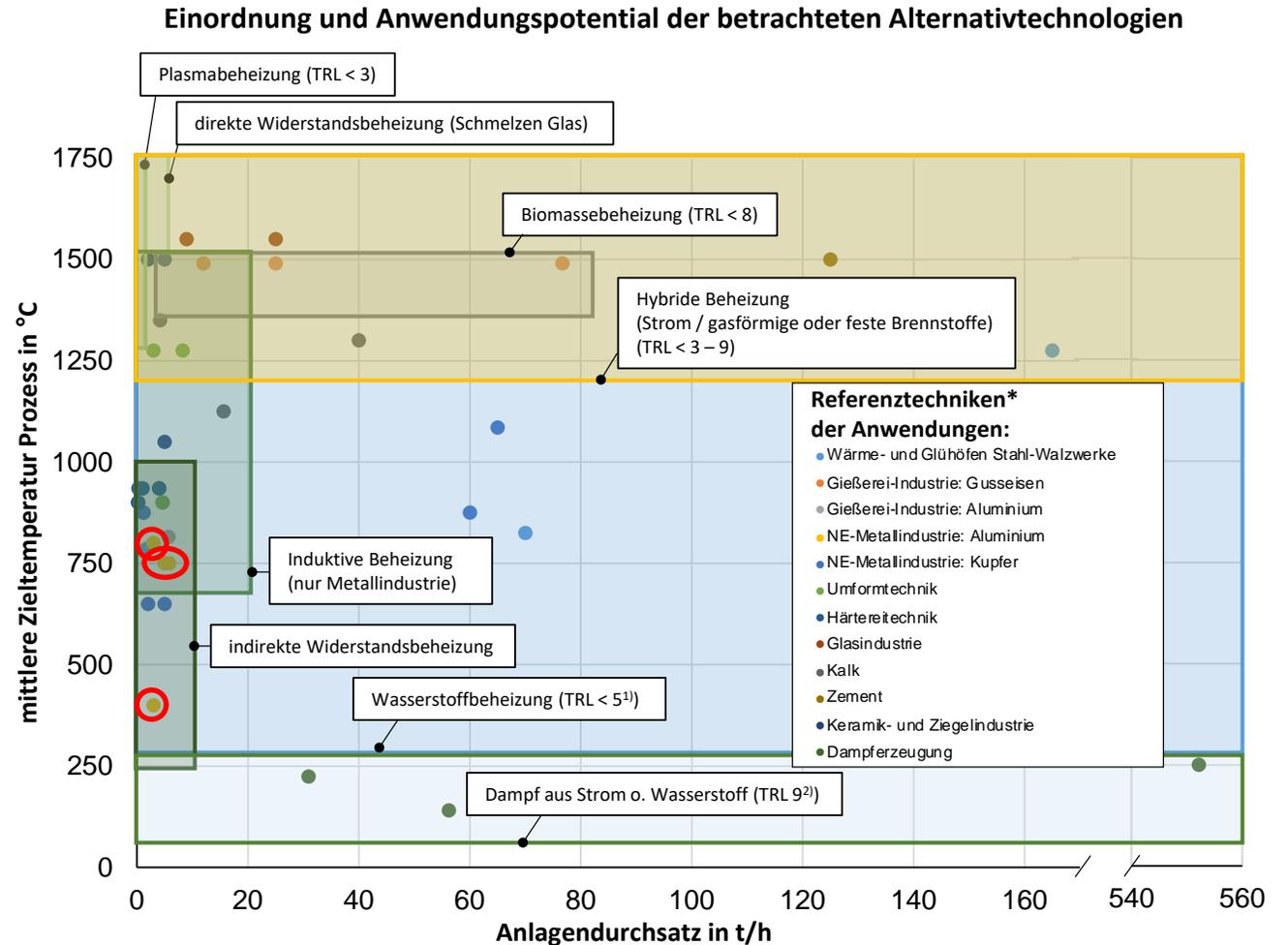
„n.b.“: Anwendung wurde nicht betrachtet. Das TRL der Technologiekombination wird gleich oder geringer als das der Technologie mit jeweils geringeren TRL eingeschätzt.

Weitere Anmerkungen siehe Bericht.

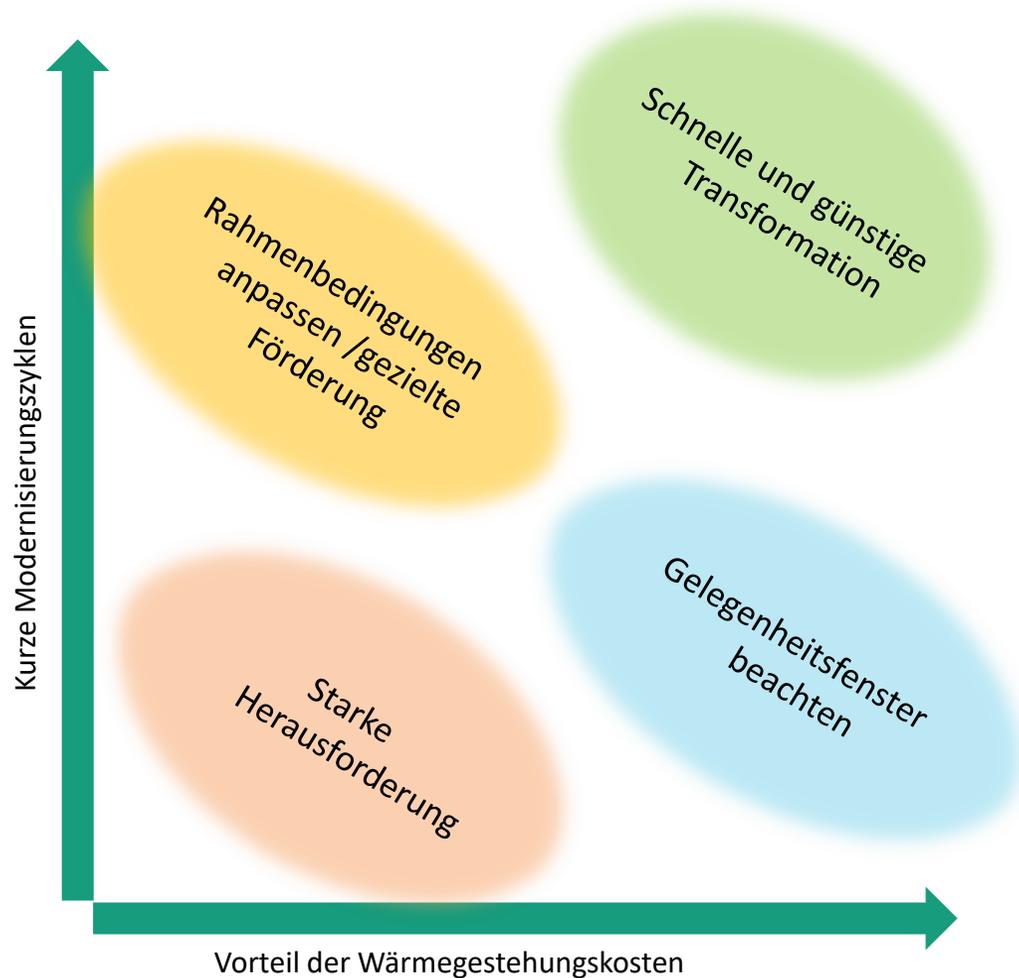
		Branche und Anwendung (zusammengefasst)																																					
		Aluminium: Schmelzen, Erwärmen und Wärmebehandlung				Gießerei-Industrie: Schmelzen Al-Formguss		Kupfer: Schmelzen, Erwärmen und Wärmebehandlung		Gießerei-Industrie: Schmelzen Gusseisen		Härterechnik: Aufkohlen und Austenitisieren		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 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	< 3	< 2	< 2	< 2	9 <sup>7)</sup>																				
	Wasserstoffbeheizung	< 4	< 5	< 5	< 5	< 4	< 5	< 4	< 5	< 4	< 4	< 4	< 4	< 4	< 5	< 5	< 4	< 2	9																				
	Biomassebeheizung	n.v.	n.v.	n.v.	< 8 <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.																				

# 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.



# Wir untersuchen zwei Dimensionen der wirtschaftlichen Bewertung

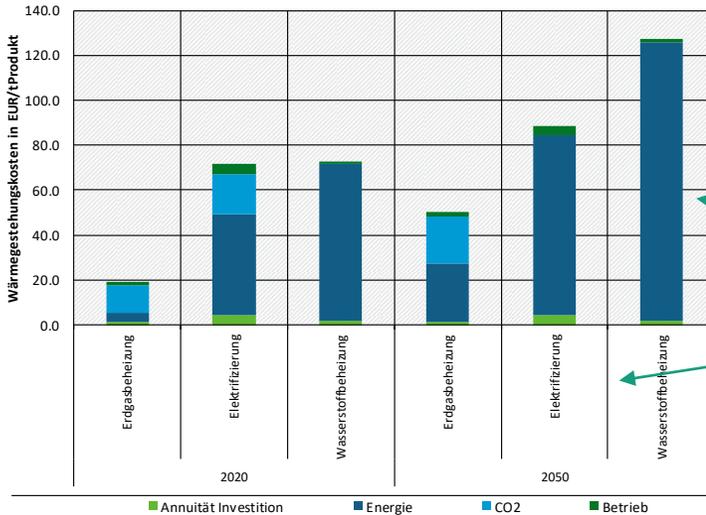


- Modernisierungszyklen
  - Orientieren sich an Abschreibungszeiträumen
  - Vorzeitiger Austausch von Anlagen ist eine Option (und in vielen Fällen notwendig)
- Wärmegestehungskosten
  - Investition, Energie, CO<sub>2</sub>, Betrieb und Wartung
  - Differenz zu Referenztechnologie ist maßgeblich

# Dimension 1: Wärmegestehungskosten bestimmen die Attraktivität der Techniken

## NE-Metallindustrie: Aluminium

Diskontinuierliches Schmelzen/Warmhalten Halbzeugguss Aluminium



Eigene Berechnung Fraunhofer ISI

Referenzfall

Transformation

Kostenkomponenten

Techniken

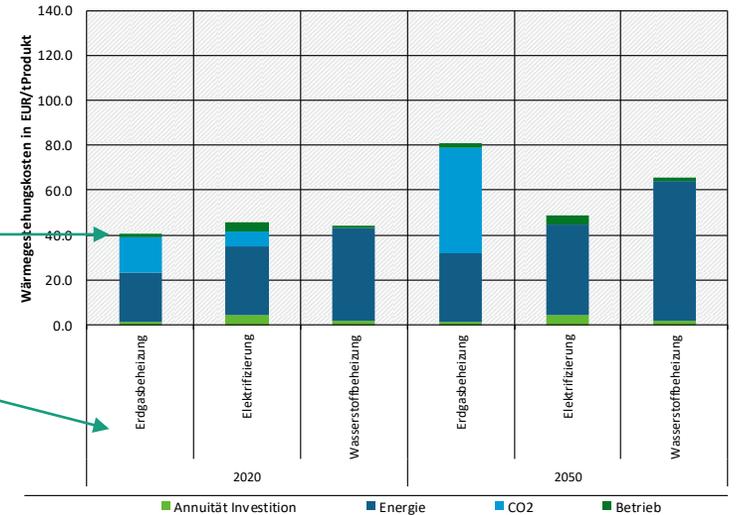
Gas: 30€/MWh  
 Strom: 124 €/MWh  
 CO<sub>2</sub>: 125€/t

Gas: 37€/MWh  
 Strom: 62 €/MWh  
 CO<sub>2</sub>: 300€/t

Angenommene, nicht der aktuellen Realität entsprechende Rahmenbedingungen!

## NE-Metallindustrie: Aluminium

Diskontinuierliches Schmelzen/Warmhalten Halbzeugguss Aluminium



Eigene Berechnung Fraunhofer ISI

- Konventionelle Technik (Erdgas) ist auch bis 2050 im Referenzfall am wirtschaftlichsten.
- CO<sub>2</sub>-Preise können Energieträger-Kostendifferenz nicht vollständig ausgleichen.
- Anteil der Elektrifizierung sinkt sogar leicht.

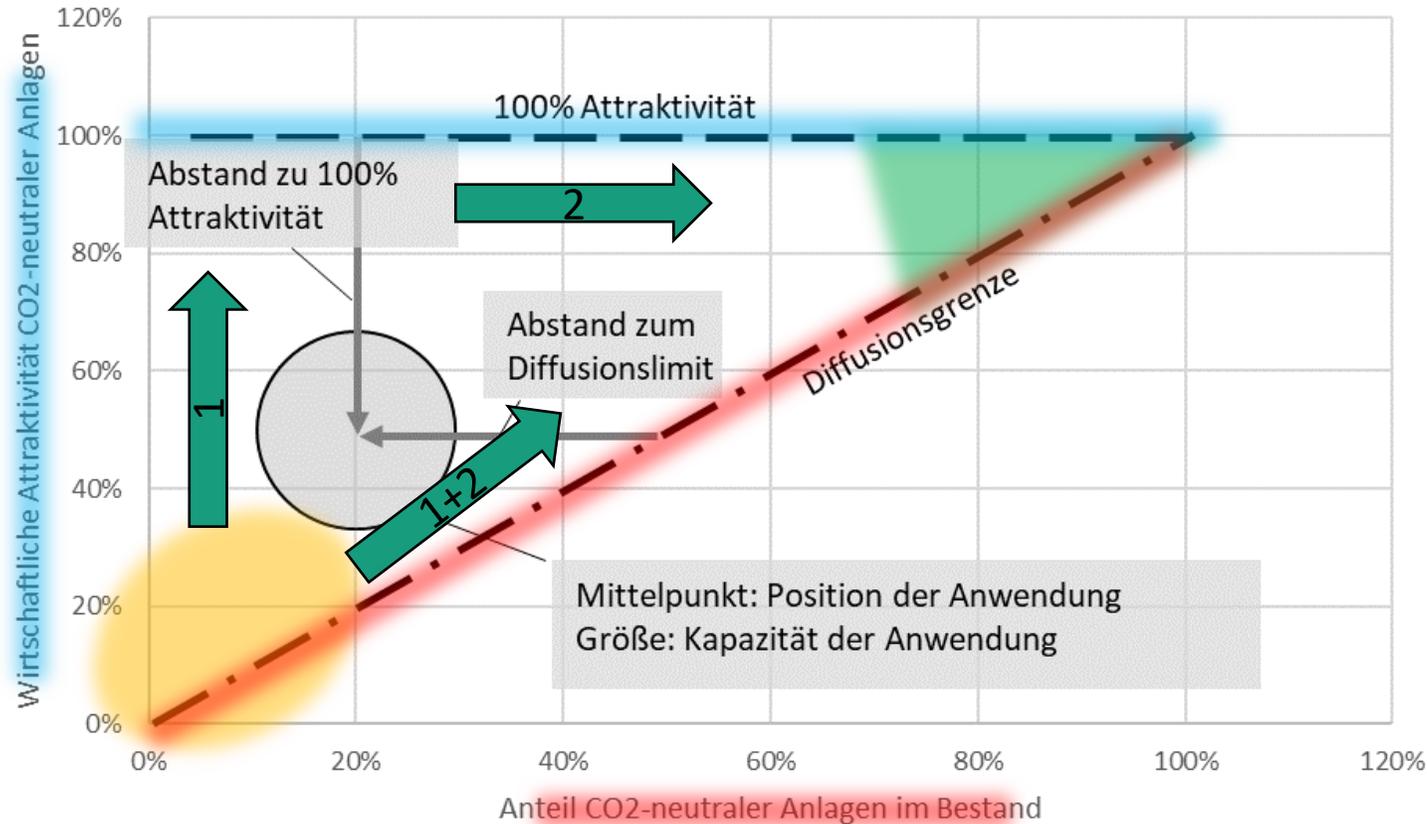
- Im Transformationsfall (hohe CO<sub>2</sub>-Preise!) wird die Referenztechnik unwirtschaftlich.
- Direkte Elektrifizierung und Wasserstoff sind attraktiv.
- CO<sub>2</sub>-Preise kompensieren höhere Energieträgerpreise, zusätzliche Investitionen und andere Betriebskosten.

# Dimension 2: Modernisierungszyklen bestimmen die Austauschrate der Anlagen

#	Anwendung	Lebensdauer	Lebensende bei Invest 2020	Lebensende														
				2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050	2055	2060	2065	2070	2075			
1	Milchpulverherstellung	20	2040															
2	Papiertrocknung	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															

- Investitionen in fossile Anlagen werden nicht das Ende ihrer technischen Lebensdauer erreichen.
- Bestandsanlagen von 2010+ sind gefährdet.
- Für ältere Anlagen existiert **genau eine Gelegenheit** für Reinvestition.
  
- Damit stehen diese Anwendungen bei Weitem nicht allein.
- Niedrigschwelligem Brennstoffwechsel kommt daher besondere Bedeutung zu.
  - Aber: Verfügbarkeit von Wasserstoff ist fraglich.
  
- Empfehlung:
  - Standortspezifisch Verfügbarkeit prüfen.
  - Elektrifizierung ernsthaft berücksichtigen.
  - NICHT in fossil investieren und auf Wasserstoff hoffen.

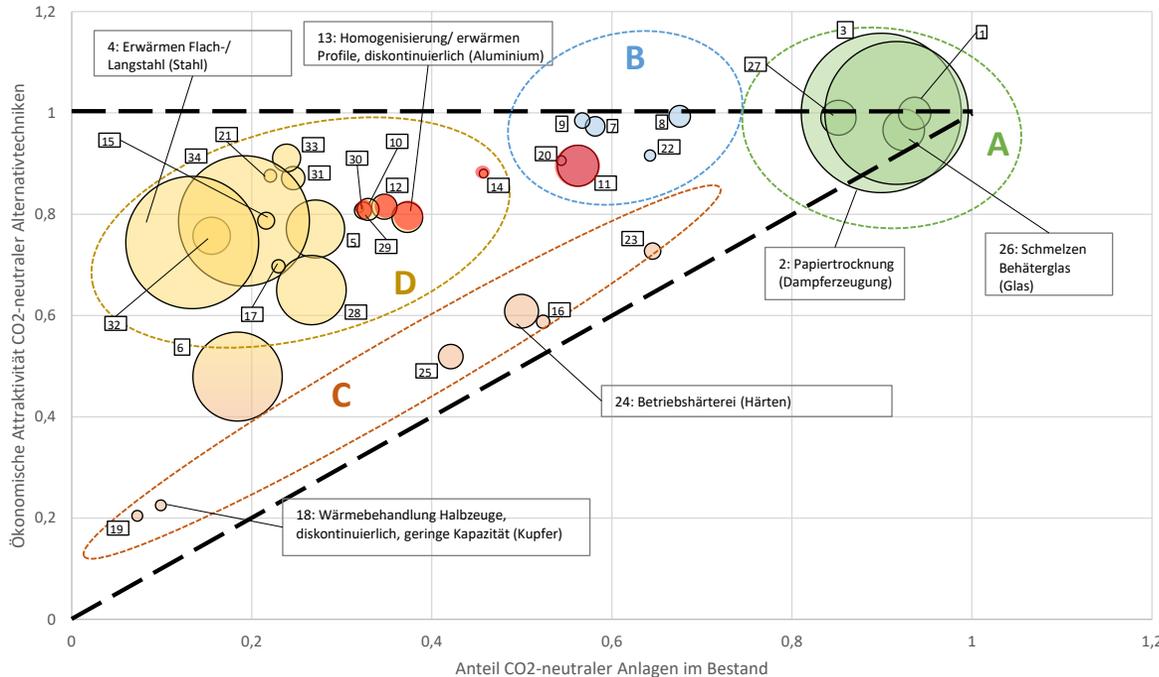
# Erläuterung Diffusionsabbildung



## ■ Kernbotschaften

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

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



## Transformationszenario, 2040

- 300€/t CO<sub>2</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.

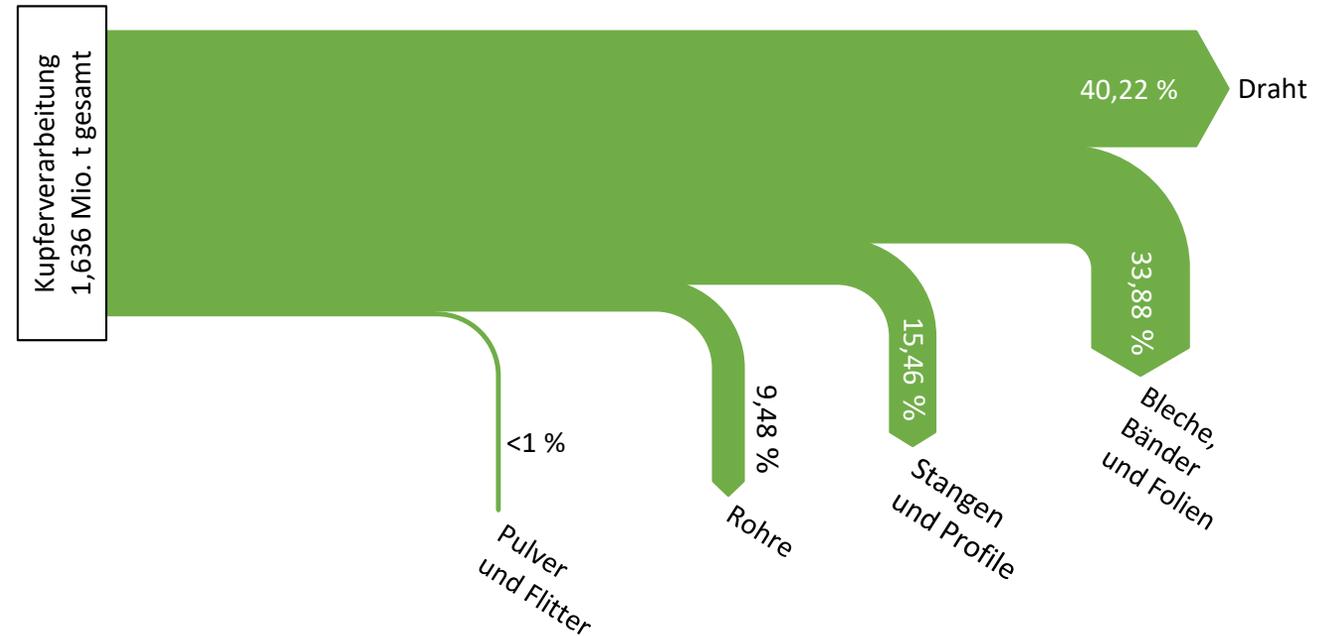
■ D ("Delayed": verzögert): Eine Mischung der Merkmale der Gruppen B und C. Es mangelt sowohl an wirtschaftlichen CO<sub>2</sub>-neutralen Techniken (die fossile Techniken vollständig verdrängen könnten) als auch einer schnellen Diffusion. Obwohl eine Verbesserung beider Aspekte für Anwendungen dieser 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.

---

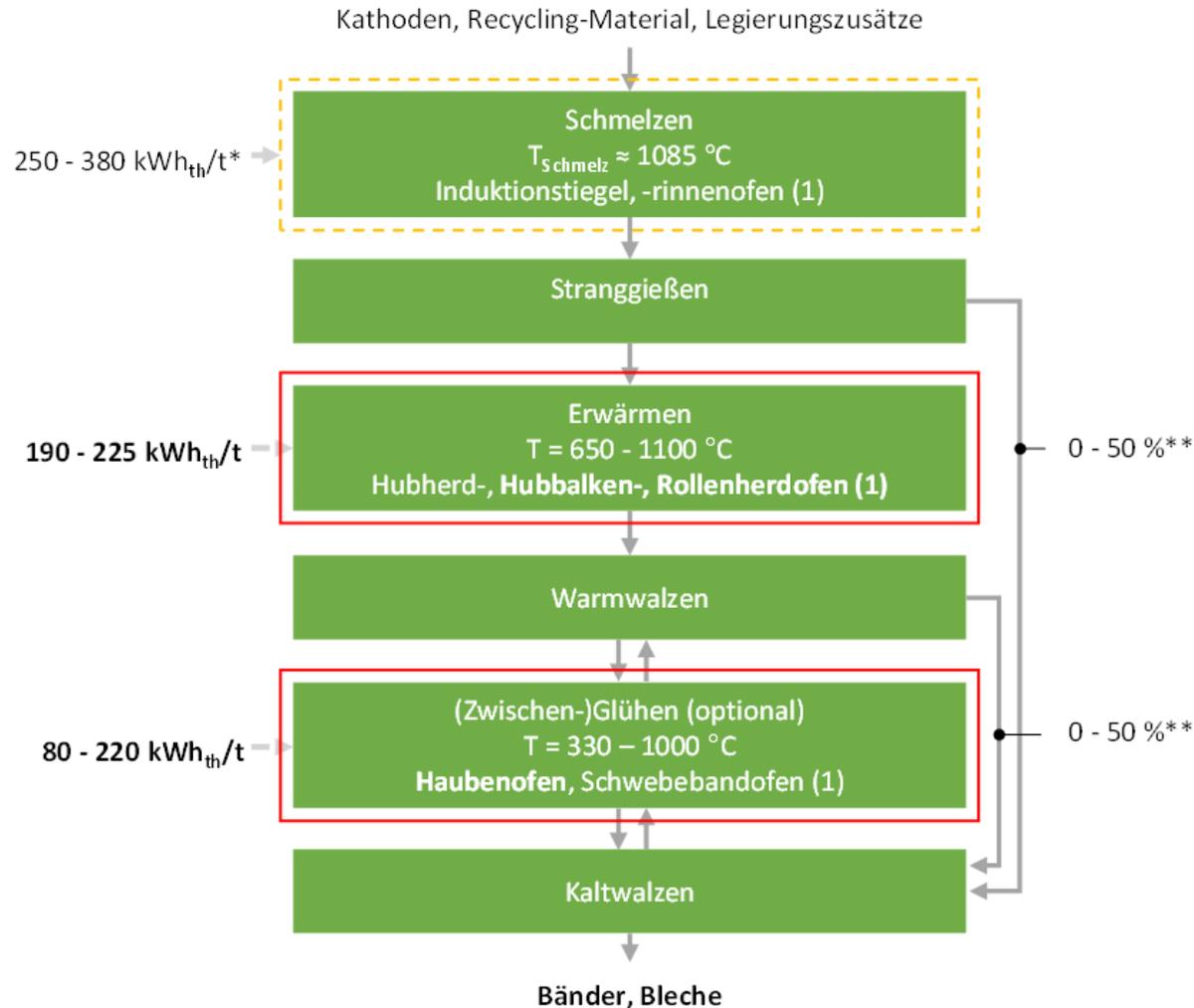
## Ergebnisse Teil III: Branche Kupfer

# Kurzbeschreibung der Branche und Fokus der Studie

- Hohe Vielfalt an unterschiedlichen Legierungen und dadurch besonders großes Spektrum an Thermoprozessanlagen und Prozessparameter
- 2019 wurden in Deutschland 628.000 Tonnen raffiniertes Kupfer und Kupferlegierungen hergestellt
- Der Recyclinganteil liegt bei circa 50 %
- Größte Absatzmärkte sind mit 57 % die Kabel- und Elektro-, mit 15 % die Bau-, mit 9 % die Automobil- und 8% die Maschinenbauindustrie



# Prozessketten und Produkte: Herstellung von Kupfer Bändern und Blechen



## Legende:

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

## Anmerkungen:

Die beschriebene Prozesskette stellt den Standard dar. Darüber hinaus existiert das seltener betriebene kontinuierliche Gießbandwalzen, das nicht im Fokus der Betrachtungen innerhalb dieser Studie steht.

Die Darstellung zeigt den Wertebereich der Kennzahlen der unterschiedlichen Anlagentypen für die Herstellung von Kupfer und Kupfer-Legierungen. Die Kennzahlen variieren anlagen- und werkstoffspezifisch.

## Annahmen:

\*\*Annahme der Verteilung

(1) Gleichverteilung der Anlagen angenommen

fett gedruckt:

Daten für „Vor Warmumformung z. B. Rollenherdofen, Hubbalkenofen“ vom DKI verwendet,

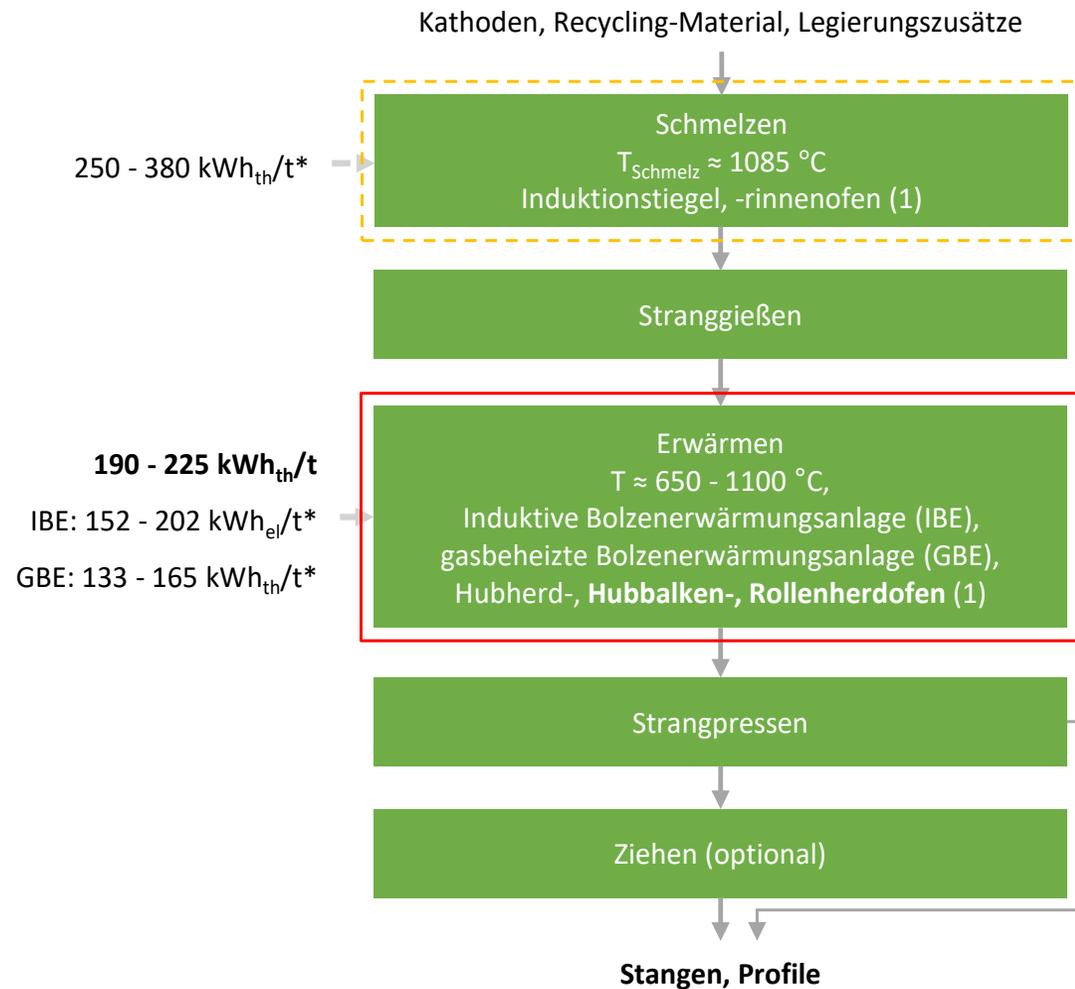
$T_{\text{Prozess}} = 650 - 1100^{\circ}\text{C}$ , mittlerer Energieeinsatz = 190 – 225 kWh<sub>th</sub>/t

Daten für „Konditionierung Coils und Wicklungen z. B. Haubenofen“ vom DKI verwendet,

$T_{\text{Prozess}} = 330 - 1000^{\circ}\text{C}$ , mittlerer Energieeinsatz = 80 – 220 kWh<sub>th</sub>/t

Quellen: \*Schmelzprozess: (Köhlhofer und Leutloff 2011); Wertermittlung des Energieverbrauchs: Spannbreiten angegebener Energieverbräuche von Rinnen- und Tiegelöfen zusammengefügt

# Prozessketten und Produkte: Herstellung von Kupfer Stangen und Profilen



## Legende:

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

## Anmerkungen:

Die Darstellung zeigt den Wertebereich der Kennzahlen der unterschiedlichen Anlagentypen für die Herstellung von Kupfer und Kupfer-Legierungen. Die Kennzahlen variieren anlagen- und werkstoffspezifisch.

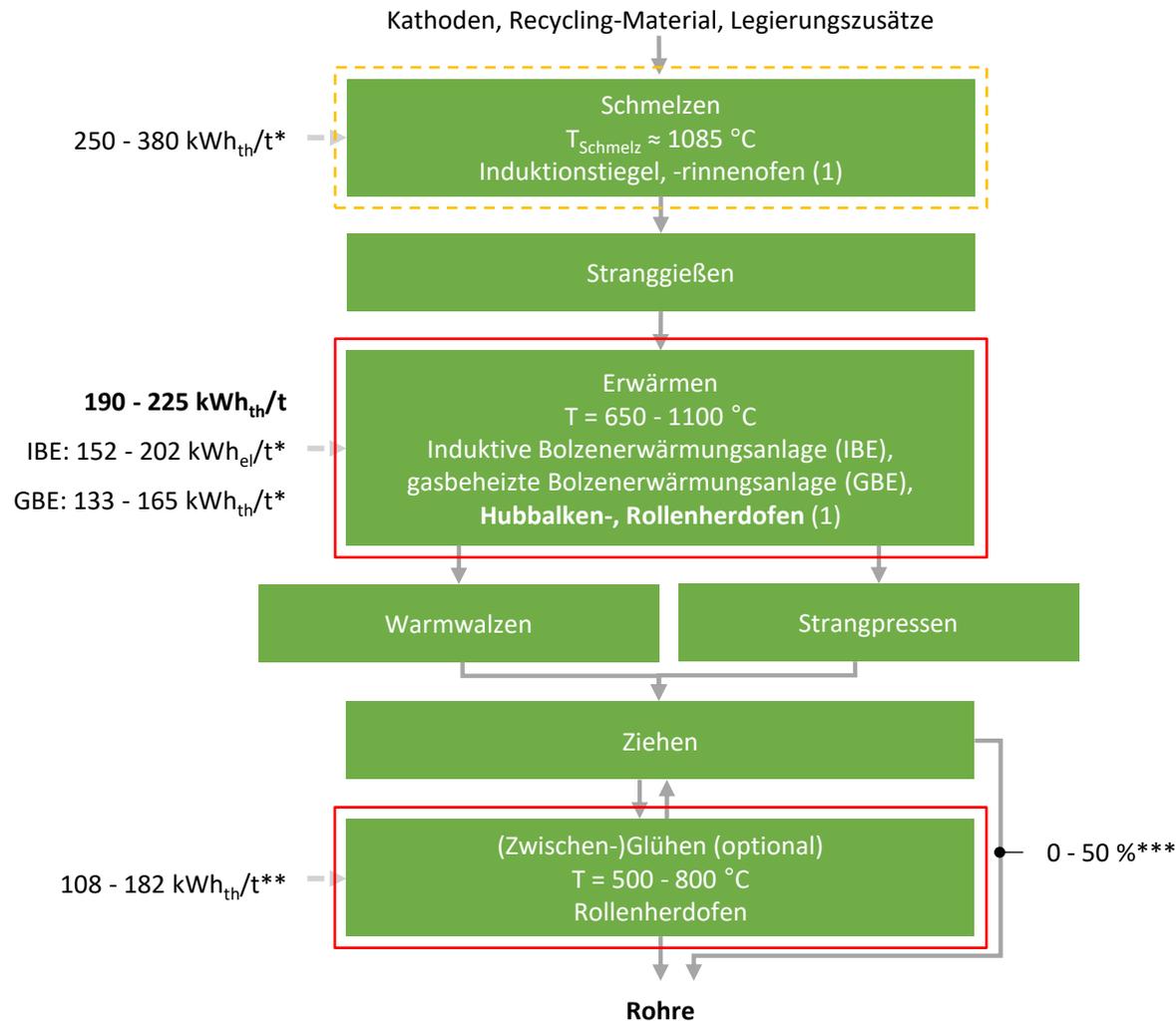
## Annahmen:

(1) Gleichverteilung der Anlagen angenommen

fett gedruckt: Daten für Rollenherdofen, Hubbalkenofen vom DKI verwendet,  $T_{\text{Prozess}} = 650 - 1100^{\circ}\text{C}$ , mittlerer Energieeinsatz = 190 - 225 kWh<sub>th</sub>/t

Quellen: \*Schmelzprozess: (Köhlhofer und Leutloff 2011); Wertermittlung des Energieverbrauchs: Spannweiten angegebener Energieverbräuche von Rinnen- und Tiegelöfen zusammengefügt; Werte IBE und GBE: (Valder 2011a)

# Prozessketten und Produkte: Herstellung von Kupfer Rohren



## Legende:

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

## Anmerkungen:

Die Darstellung zeigt den Wertebereich der Kennzahlen der unterschiedlichen Anlagentypen für die Herstellung von Kupfer und Kupfer-Legierungen. Die Kennzahlen variieren anlagen- und werkstoffspezifisch.

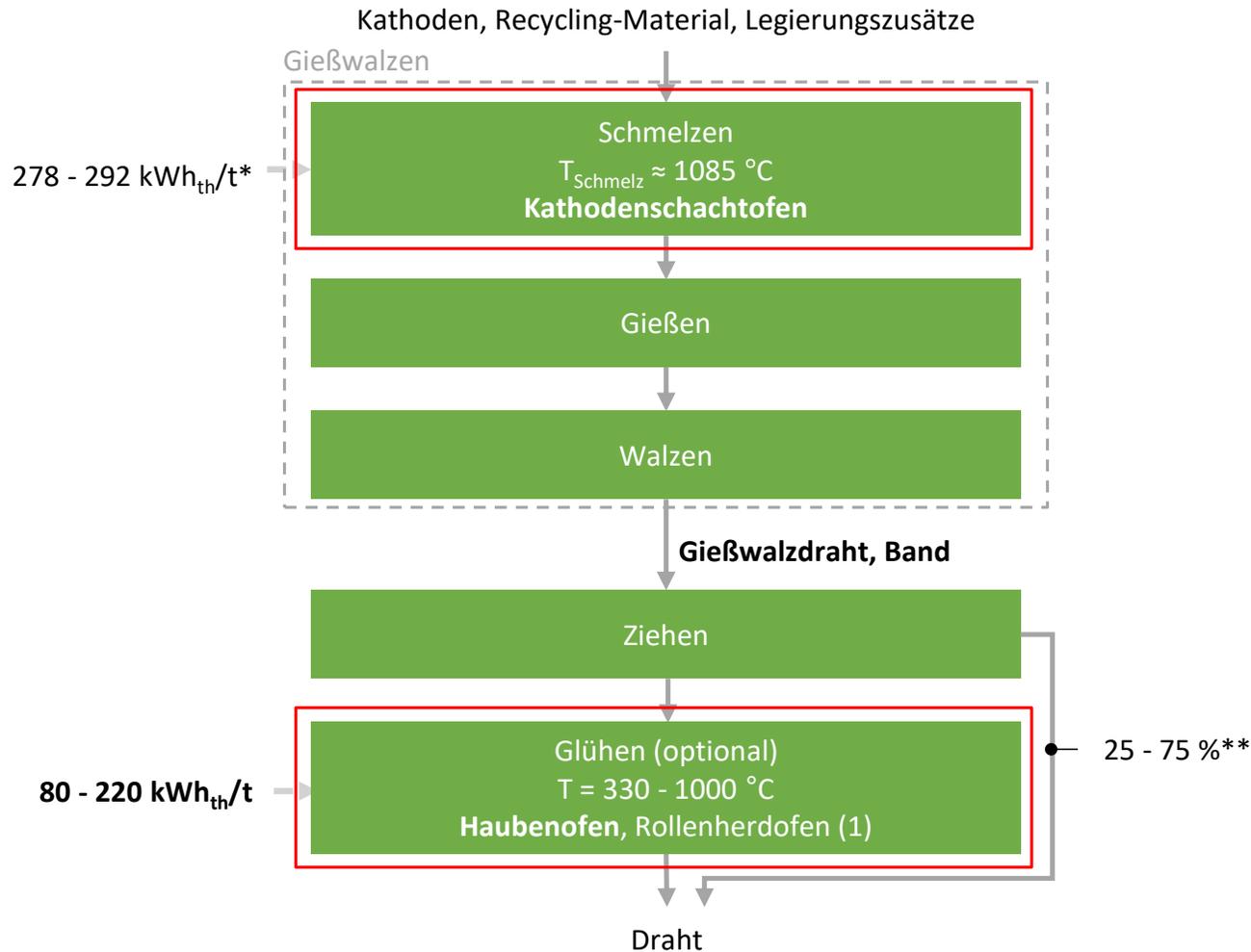
## Annahmen:

\*\*Annahme: Wirkungsgrad 0,6 – 0,7

\*\*\*Annahme der Verteilung

Quellen: \*Schmelzprozess: (Köhlhofer und Leutloff 2011); Wertermittlung des Energieverbrauchs: Spannweiten angegebener Energieverbräuche von Rinnen- und Tiegelöfen zusammengefügt; Werte IBE und GBE: (Valder 2011a)

# Prozessketten und Produkte: Herstellung von Kupfer Gießwalzdraht



## Legende:

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

## Anmerkungen:

Die Darstellung zeigt den Wertebereich der Kennzahlen der unterschiedlichen Anlagentypen für die Herstellung von Kupfer und Kupfer-Legierungen. Die Kennzahlen variieren anlagen- und werkstoffspezifisch.

## Annahmen:

\*\*Annahme der Verteilung

(1) Gleichverteilung der Anlagen angenommen

fett gedruckt: Daten für „Konditionierung Coils und Wicklungen z. B. Haubenofen“ vom DKI verwendet,

$T_{\text{Prozess}} = 330 - 1000 \text{ °C}$ , mittlerer Energieeinsatz =  $80 - 220 \text{ kWh}_{\text{th}}/\text{t}$

Quellen: (Aurubis AG 2021)

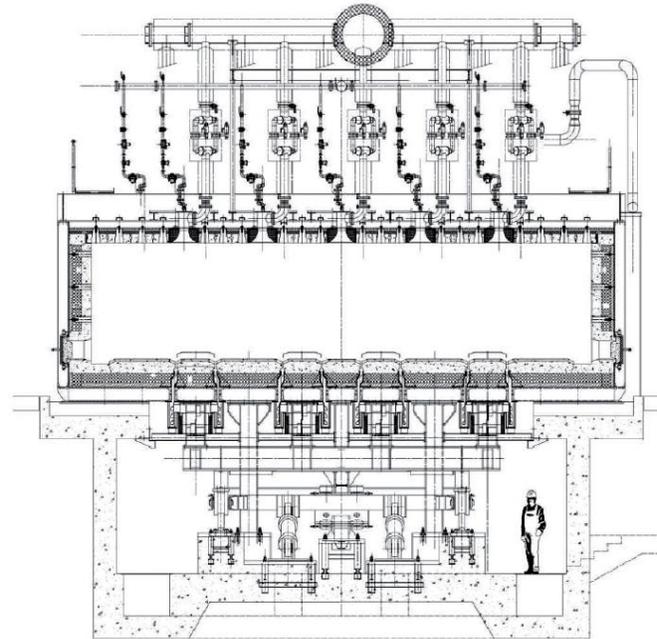
# Thermoprozessanlagen (exemplarisch, nicht maßstabsgetreu)

Kathodenschachtofen



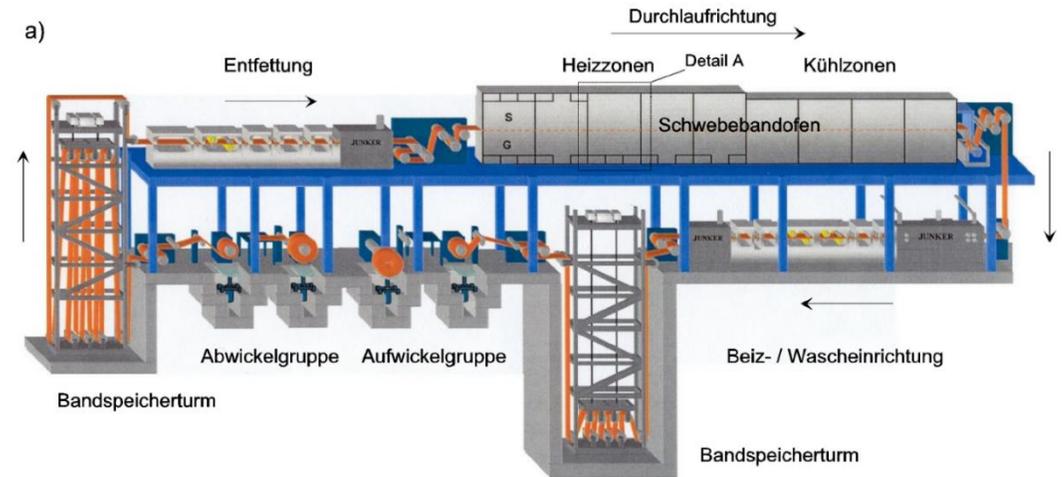
Quelle: (Köhlhofer und Leutloff 2011)

Hubherdofen



Quelle: (Sprung 2011)

Banddurchlaufanlage mit Schwebebandofen



Quelle: (Odenthal et al. 2003)

# Auswahl der Anwendungen und Referenztechniken anhand von Energieverbrauch und CO<sub>2</sub>-Emissionen

## Abschätzung charakteristischer Anlagenkennzahlen zur Auswahl der betrachteten Anwendungen und Referenztechniken „NE-Metallindustrie Kupfer“ in DE

Anlagentypen	Jährlicher Anlagendurchsatz*		Jährlicher Energieverbrauch		Energiebedingte CO <sub>2</sub> -Emissionen	
	3,8 Mio. t	Anteil	750 - 957 GWh	Anteil	240 - 293 Tsd. t	Anteil
<b>Kathodenschachtofen (fossil)</b>	658 Tsd. t	18 %	183 - 192 GWh	20 - 24 %	37 - 39 Tsd. t	13 - 15 %
<b>Hubbalken-, Rollenherdöfen Erwärmung (fossil)</b>	750 Tsd. t	20 %	142 - 169 GWh	17 - 19 %	29 - 34 Tsd. t	12 %
<b>Haubenofen (fossil)</b>	520 Tsd. t	14 %	42 - 114 GWh	6 - 12 %	8 - 23 Tsd. t	4 - 8 %
Rollenherdofen WB (fossil)	402 Tsd. t	11 %	43 - 73 GWh	6 - 8 %	9 - 15 Tsd. t	4 - 5 %
Bandschwebeofen (fossil)	273 Tsd. t	7 %	30 - 57 GWh	4 - 6 %	6 - 12 Tsd. t	3 - 4 %
Gasbeheizte Bolzenerwärmung	102 Tsd. t	3 %	14 - 17 GWh	2 %	3 - 3 Tsd. t	< 1 %
Induktive Bolzenerwärmung	102 Tsd. t	3 %	16 - 21 GWh	2 %	8 - 10 Tsd. t	3 - 4 %
Rinneninduktionsofen	477 Tsd. t	13 %	119 - 134 GWh	14 - 16 %	60 - 67 Tsd. t	23 - 25 %
Tiegelinduktionsofen	477 Tsd. t	13 %	162 - 181 GWh	19 - 22 %	81 - 91 Tsd. t	31 - 34 %
<b>Verteilung</b>						
Anteil Anlagen mit elektrischer Energie beheizt				35 - 40 %		57 - 62 %
Anteil Anlagen mit fossiler Energie beheizt				60 - 64 %		38 - 43 %
<b>Davon im Rahmen der Studie betrachteten Anlagentypen (fett)</b>				<b>76 - 81 %</b>		<b>76 - 81 %</b>

\* Der Anlagendurchsatz entspricht der Produktionsmenge eines Anlagentyps für den jeweiligen Prozessschritt. Durchläuft ein Produkt mehrere Prozessschritte entlang der Prozesskette, kann der kumulierte Anlagendurchsatz die branchenspezifische Produktionsmenge um ein Vielfaches überschreiten.

Legende: fettgedruckt: Anlagentypen, die im Rahmen der Studie weiter betrachtet werden

Quellen: (European Commission 2017b); (Pfeifer et al. 2011c); Produktionsmengen 2019 Kupfer und Kupferhalbzeug ( (Statistisches Bundesamt (Destatis) 2019a))

# Betrachtete Anwendungen und Referenztechniken

Referenztechnik	
Definition	kontinuierlicher Schmelzofen Kupfer Gießwalzdraht mit Erdgasbeheizung
Anwendung	kontinuierliches Schmelzen Kupfer Gießwalzdraht ( $T_{\text{Prozess,max}} \approx 1200^{\circ}\text{C}$ )
Thermoprozessanlage(n)	Kathodenschachtofen
Beheizungstechnologie(n)	Erdgasbeheizung

Referenztechnik	
Definition	kontinuierlicher Erwärmungssofen Kupfer-Halbzeug mit Erdgasbeheizung
Anwendung	konti. Erwärmen Kupfer-Halbzeug für Warmumformung ( $T_{\text{Prozess,max}} \approx 1.100^{\circ}\text{C}$ )
Thermoprozessanlage(n)	Hubherdofen, Hubbalkenofen, Rollenherdofen
Beheizungstechnologie(n)	Erdgasbeheizung

Referenztechnik	
Definition	diskonti. Wärmebehandlungssofen Kupfer-Halbzeug mit Erdgasbeheizung
Anwendung	diskontinuierliche Wärmebehandlung Kupfer-Halbzeug ( $T_{\text{Prozess,max}} \approx 1.000^{\circ}\text{C}$ )
Thermoprozessanlage(n)	Haubenofen
Beheizungstechnologie(n)	Erdgasbeheizung

# Definition Alternativtechniken

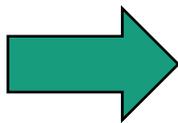
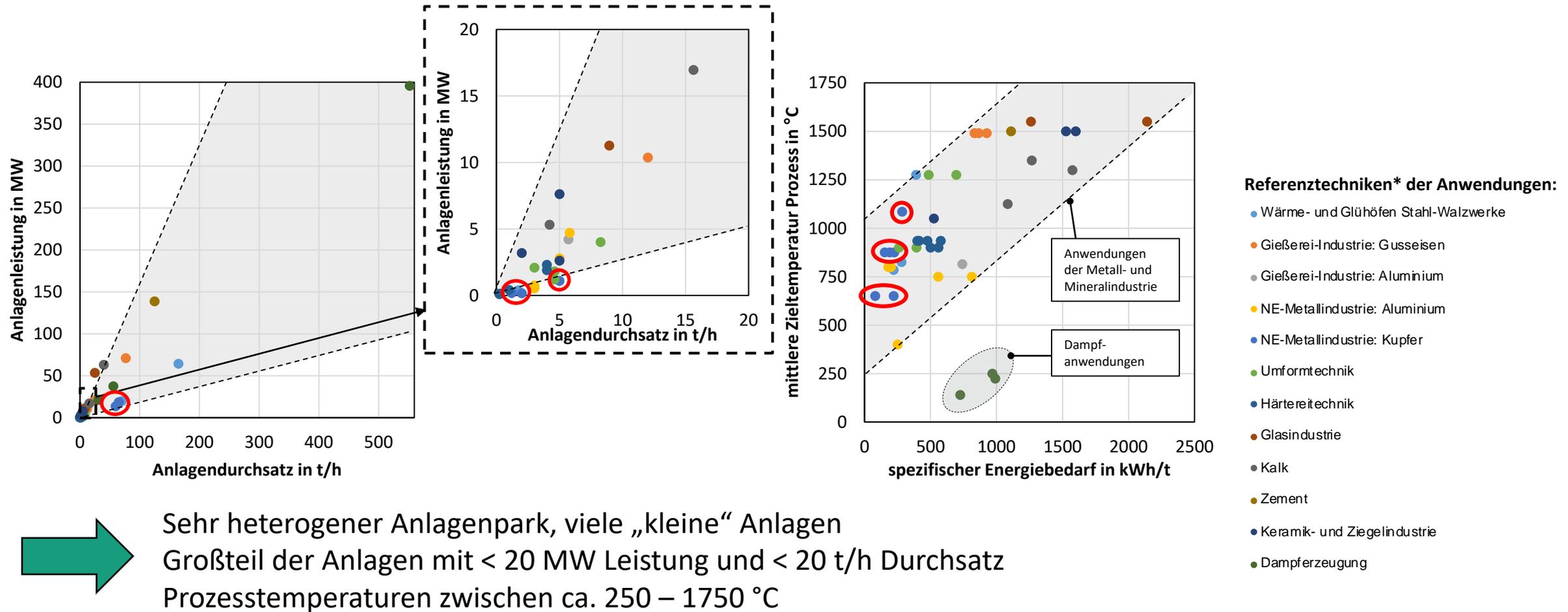
<b>Technik und Technologie</b>	
<i>Referenztechnik</i>	<i>kontinuierlicher Schmelzofen Kupfer Gießwalzdraht mit Erdgasbeheizung</i>
Alternative Beheizungstechnologie(n)	Elektrifizierung (Rinneninduktionsofen) <sup>1)</sup> Wasserstoffbeheizung
Alternativtechnik(en)	kontinuierlicher Schmelzofen Gusseisen mit elektrischer Beheizung kontinuierlicher Schmelzofen Gusseisen mit Wasserstoffbeheizung <sup>1)</sup>
<b>Technik und Technologie</b>	
<i>Referenztechnik</i>	<i>kontinuierlicher Erwärmungsofen Kupfer-Halbzeug mit Erdgasbeheizung</i>
Alternative Beheizungstechnologie(n)	Elektrifizierung (Induktion, Widerstandsbeheizung)* Wasserstoffbeheizung
Alternativtechnik(en)	kontinuierlicher Erwärmungsofen mit elektrischer Beheizung kontinuierlicher Erwärmungsofen mit Wasserstoffbeheizung
<b>Technik und Technologie</b>	
<i>Referenztechnik</i>	<i>diskonti. Wärmebehandlungsofen Kupfer-Halbzeug mit Erdgasbeheizung</i>
Alternative Beheizungstechnologie(n)	Elektrifizierung (Widerstandsheizung, kontinuierlich) Wasserstoffbeheizung
Alternativtechnik(en)	diskontinuierlicher Wärmebehandlungsofen mit elektrischer Beheizung diskontinuierlicher Wärmebehandlungsofen mit Wasserstoffbeheizung

# Erhebung von Kenndaten: „kontinuierliches Schmelzen Kupfer Gießwalzdraht“

Technik	Referenztechnik	Alternativtechnik 1	Alternativtechnik 2	Einheit	Quellen
<b>Beheizungstechnologie</b>	<b>Erdgasbeheizung</b>	<b>Elektrifizierung</b>	<b>Wasserstoffbeheizung</b>		
<b>Thermoprozessanlagen</b>	<b>Kathodenschachtofen</b>	<b>Rinneninduktionsofen</b>	<b>Kathodenschachtofen</b>		
Produkt	Gießwalzdraht				
Investition Neubau	38,5	65,9	38,5	EUR/t <sub>Kap.</sub>	[6]
Investition Modernisierung	9,6	7,1	9,6	EUR/t <sub>Kap.</sub>	
Minimale Investition Neubau	38,5	36,2	38,5	EUR/t <sub>Kap.</sub>	[6]
Min. Investition Modernisierung	9,6	0,3	9,6	EUR/t <sub>Kap.</sub>	
TRL	9	9	< 5	-	
Energieträger 1	Erdgas	Strom	EE-Wasserstoff	-	[1]
Energieträger 2	keiner	keiner	keiner	-	
Energieträger 3	keiner	keiner	keiner	-	
Spezifischer Energiebedarf 1	0,285	0,265	0,285	MWh/t <sub>Pr.</sub>	[2]; [3]
Spezifischer Energiebedarf 2	0,000	0,000	0,000	MWh/t <sub>Pr.</sub>	
Spezifischer Energiebedarf 3	0,000	0,000	0,000	MWh/t <sub>Pr.</sub>	
Min. spezifischer Energiebedarf	0,285	0,265	0,285	MWh/t <sub>Pr.</sub>	[4]
Prozessbedingte Emissionen	0,000	0,000	0,000	t <sub>CO2</sub> /t <sub>Pr.</sub>	
Betriebs- und Wartungskosten	1,9	3,3	1,9	EUR/t <sub>Kap.</sub>	[5]
Abschreibungszeitraum	25	25	25	a	
Lebensdauer	50	50	50	a	[6]
Repräsentative Kapazität	520.000	80.000	520.000	t <sub>Jahresleistung</sub>	[7]
Auslastung	0,90	0,90	0,90	1,00	[6]
Anteil Bestand 2020	100 %	0 %	0 %	%	
Verfügbar ab	2020	2020	2030		
Verfügbar bis	2050	2050	2050		

Annahmen, Legende und Quellen siehe Bericht

# These 1: Der Anlagenpark der Industrieöfen ist heterogen



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

Detaillierte Annahmen, Legende und Quellen siehe Bericht

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

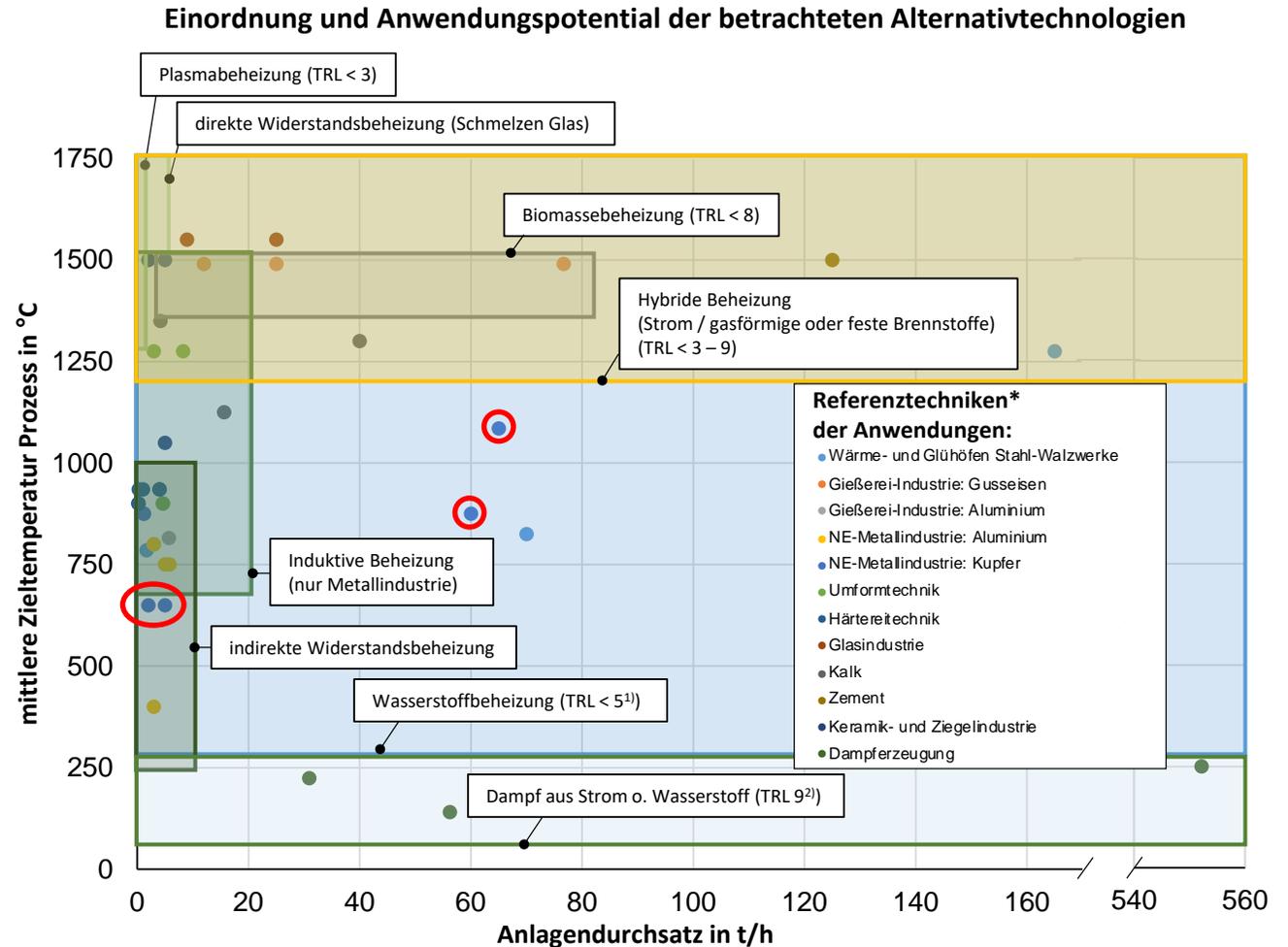
- **Elektrische Beheizungstechnologien** sind für einige Anwendungen der **Metallindustrie** bereits Stand der Technik (TRL = 9), sie werden im Anlagenpark in Deutschland jedoch vielfach nicht eingesetzt.
- **Elektrische Beheizungstechnologien** sind in für die Anwendungen der **Mineralindustrie** nicht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

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

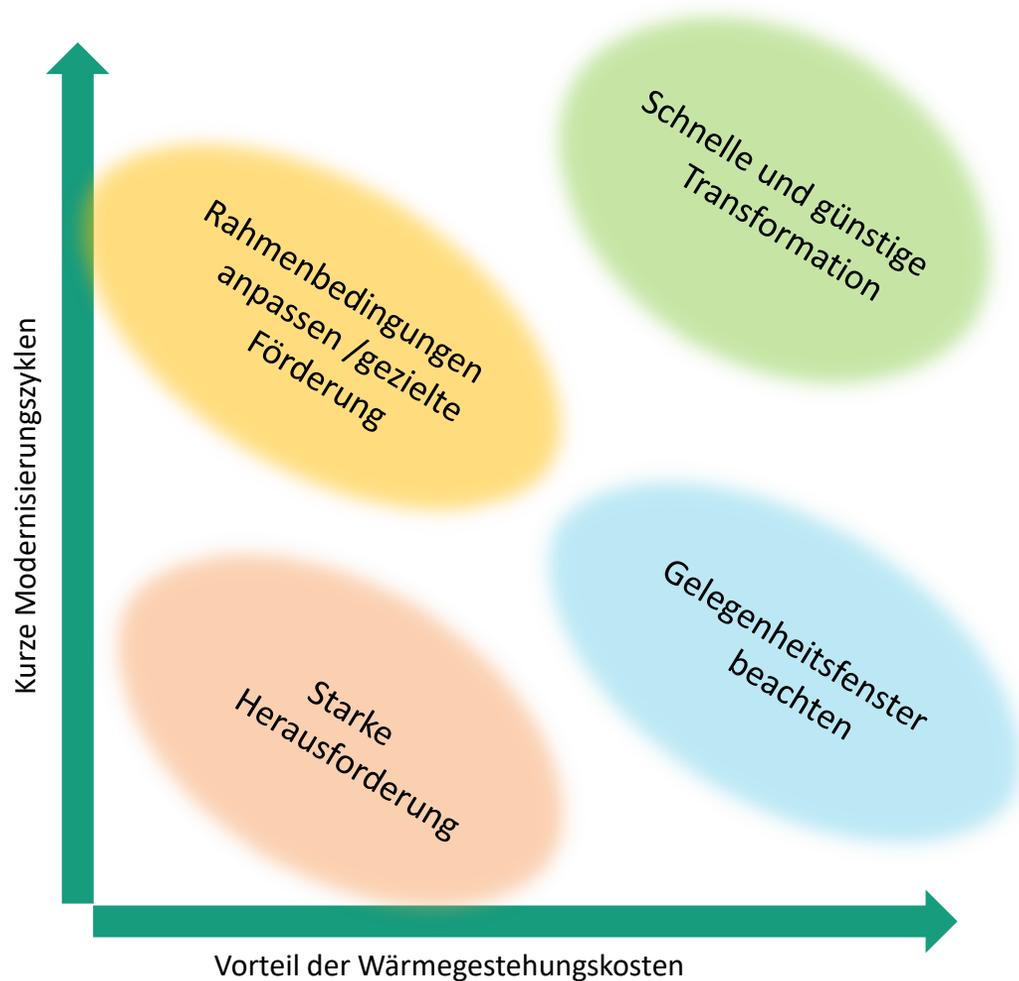
		Branche und Anwendung (zusammengefasst)																	
		Aluminium: Schmelzen, Erwärmen und Wärmebehandlung	Gießerei-Industrie: Schmelzen Al-Formguss	Kupfer: Schmelzen, Erwärmen und Wärmebehandlung	Gießerei-Industrie: Schmelzen Gusseisen	Härtereitechnik: Aufkohlen und Austenitisieren	Umformtechnik: Erwärmung Stahlblechzuschnitte	Stahl-Walzwerke: Wärmebehandlung	Keramik- und Ziegelindustrie: Brennen Ziegel und Feuerfest	Glasindustrie: Schmelzen Behälterglas	Glasindustrie: Schmelzen Flachglas	Kalk: Brennen im GGR-Ofen	Kalk: Brennen im Drehrohrföfen	Zement: Brennen Zementklinker	Umformtechnik: Diskont. Erwärmung	Umformtechnik: Konti. Erwärmung	Stahl-Walzwerke: Konti. Erwärmung	Kalk: Brennen im Schachtofen	Dampferzeugung
Energieträger Referenztechnik		Gas	Gas	Koks	Gas	Gas	Gas	Gas	Gas	Gas	Gas	BS-Mix	Gas	Gas	Gas	Gas	Gas	Gas	Gas
TRL der Alternativtechnologie	Elektrifizierung	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>
	Wasserstoffbeheizung	< 4	< 5	< 5	< 5	< 4	< 5	< 4	< 5	< 4	< 4	< 4	< 4	< 4	< 5	< 5	< 4	< 2	9
	Biomassebeheizung	n.v.	n.v.	n.v.	< 8 <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.

# 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.



# Wir untersuchen zwei Dimensionen der wirtschaftlichen Bewertung

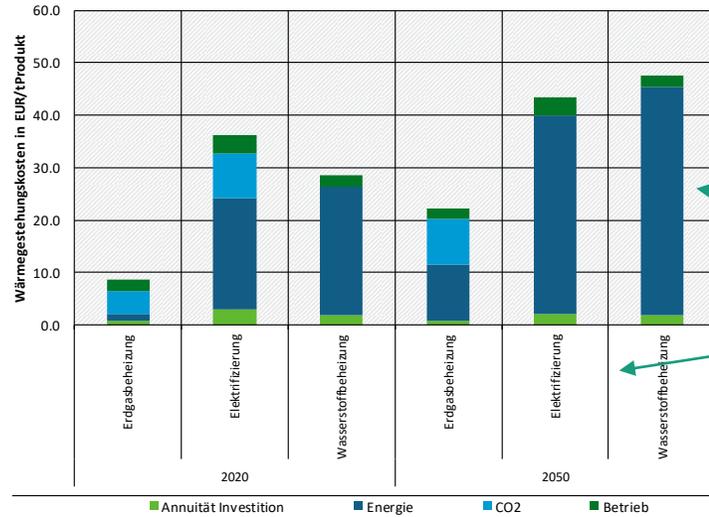


- Modernisierungszyklen
  - Orientieren sich an Abschreibungszeiträumen
  - Vorzeitiger Austausch von Anlagen ist eine Option (und in vielen Fällen notwendig)
- Wärmegestehungskosten
  - Investition, Energie, CO<sub>2</sub>, Betrieb und Wartung
  - Differenz zu Referenztechnologie ist maßgeblich

# Dimension 1: Wärmegestehungskosten bestimmen die Attraktivität der Techniken

## NE-Metallindustrie: Kupfer

Kontinuierliches Schmelzen Kupfer Gießwalzdraht



Eigene Berechnung Fraunhofer ISI

- Konventionelle Technik (Erdgas) ist auch bis 2050 im Referenzfall sehr deutlich am wirtschaftlichsten.
- CO<sub>2</sub>-Preise können Energieträger-Kostendifferenz nicht ausgleichen.
- Energieträgerpreisdifferenz ist extrem (Sonderfall 2020 – Schlussfolgerung davon aber unbeeinflusst).

Referenzfall

Transformation

Kostenkomponenten

Techniken

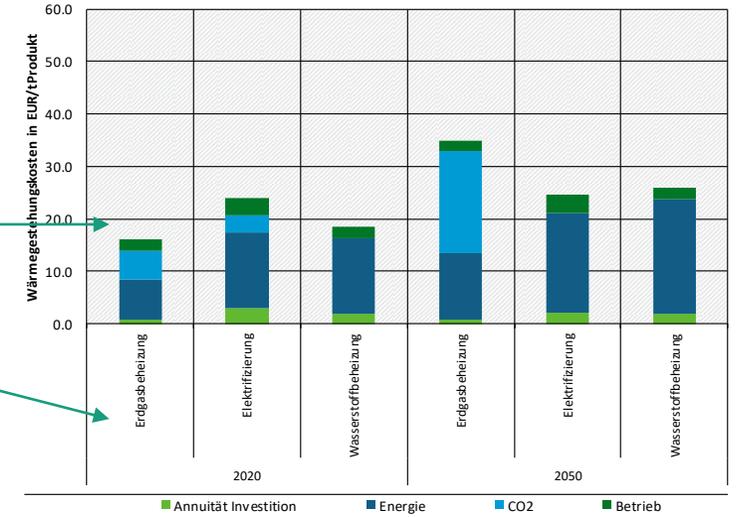
Gas: 30€/MWh  
Strom: 124 €/MWh  
CO<sub>2</sub>: 125€/t

Gas: 37€/MWh  
Strom: 62 €/MWh  
CO<sub>2</sub>: 300€/t

Angenommene, nicht der aktuellen Realität entsprechende Rahmenbedingungen!

## NE-Metallindustrie: Kupfer

Kontinuierliches Schmelzen Kupfer Gießwalzdraht



Eigene Berechnung Fraunhofer ISI

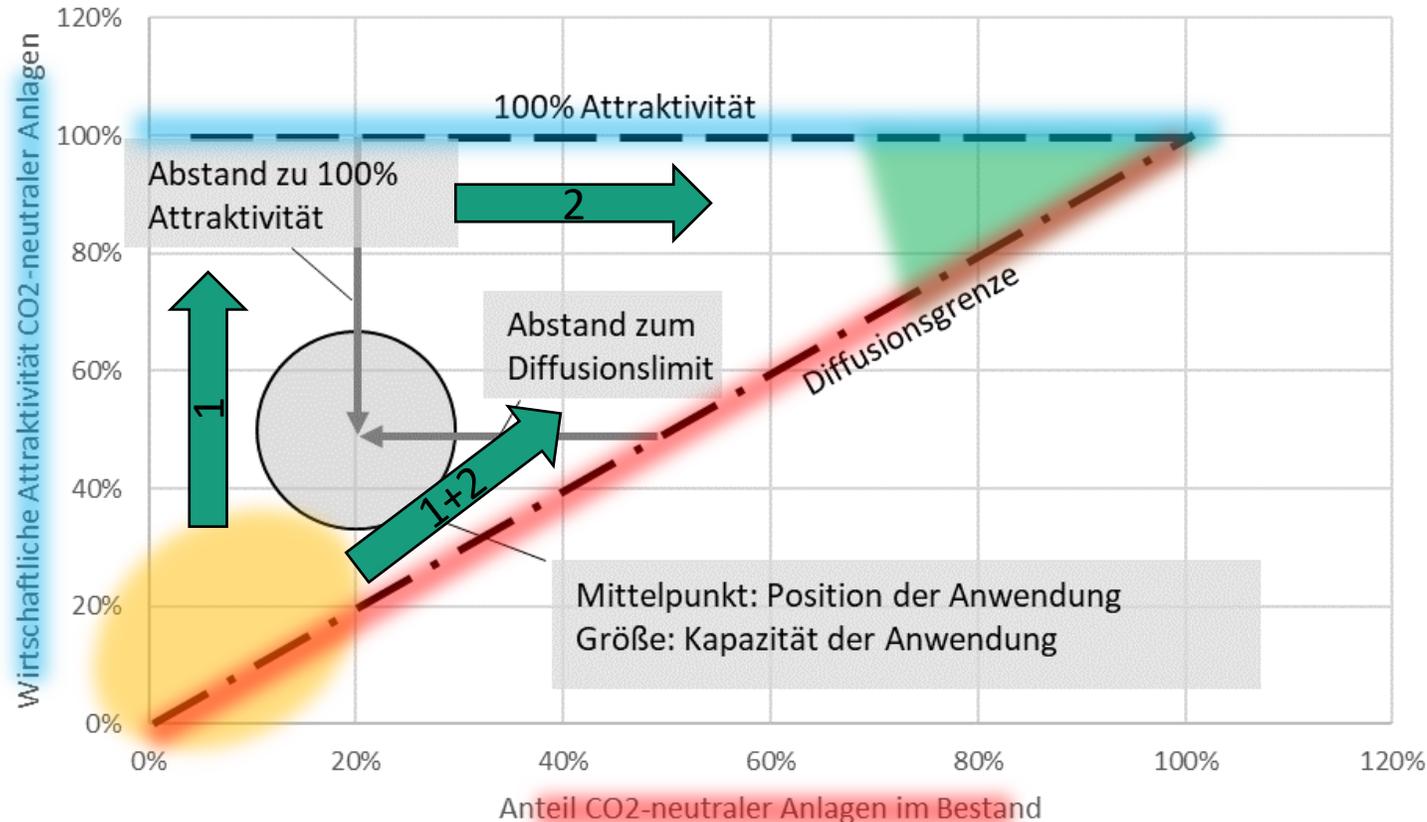
- Im Transformationsfall (hohe CO<sub>2</sub>-Preise!) wird die Referenztechnik unwirtschaftlich.
- Direkte Elektrifizierung und Wasserstoff sind attraktiv, Erdgas wird teurer.
- CO<sub>2</sub>-Preise kompensieren noch leicht höhere Energieträgerpreise, zusätzliche Investitionen und andere Betriebskosten.

# Dimension 2: Modernisierungszyklen bestimmen die Austauschrate der Anlagen

#	Anwendung	Lebensdauer	Lebensende bei Invest	Lebensende														
				2020	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															

- Investitionen in fossile Anlagen werden nicht das Ende ihrer technischen Lebensdauer erreichen.
  - Ausnahme: Geringe Lebensdauer bei kleinen Anlagen Warmumformung
- Bestandsanlagen ab 2000/2010 sind gefährdet.
- Für ältere Anlagen existiert **genau eine Gelegenheit** für Reinvestition.
- Damit stehen diese Anwendungen bei Weitem nicht allein.
- Niedrigschwelligem Brennstoffwechsel kommt daher besondere Bedeutung zu.
  - Aber: Verfügbarkeit von Wasserstoff ist fraglich.
- Empfehlung:
  - Standortspezifisch Verfügbarkeit prüfen.
  - Elektrifizierung ernsthaft berücksichtigen.
  - NICHT in fossil investieren und auf Wasserstoff hoffen.

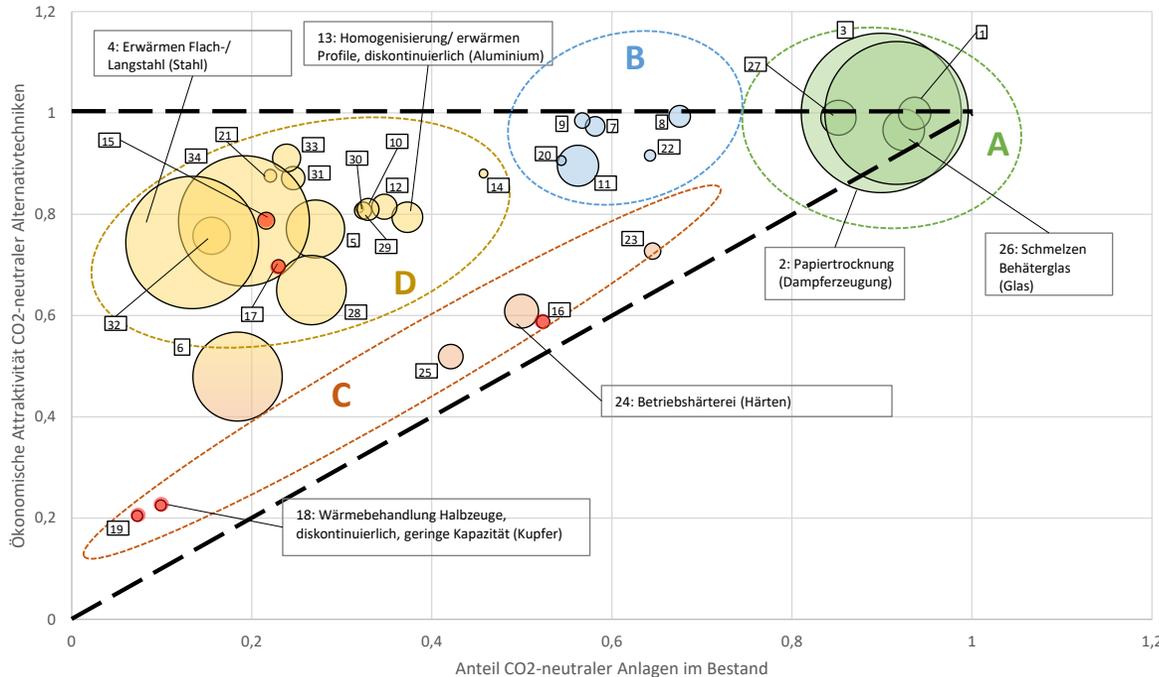
# Erläuterung Diffusionsabbildung



## ■ Kernbotschaften

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

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



## Transformationszenario, 2040

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

Wärmebehandlung und Erwärmen Halbzeuge:

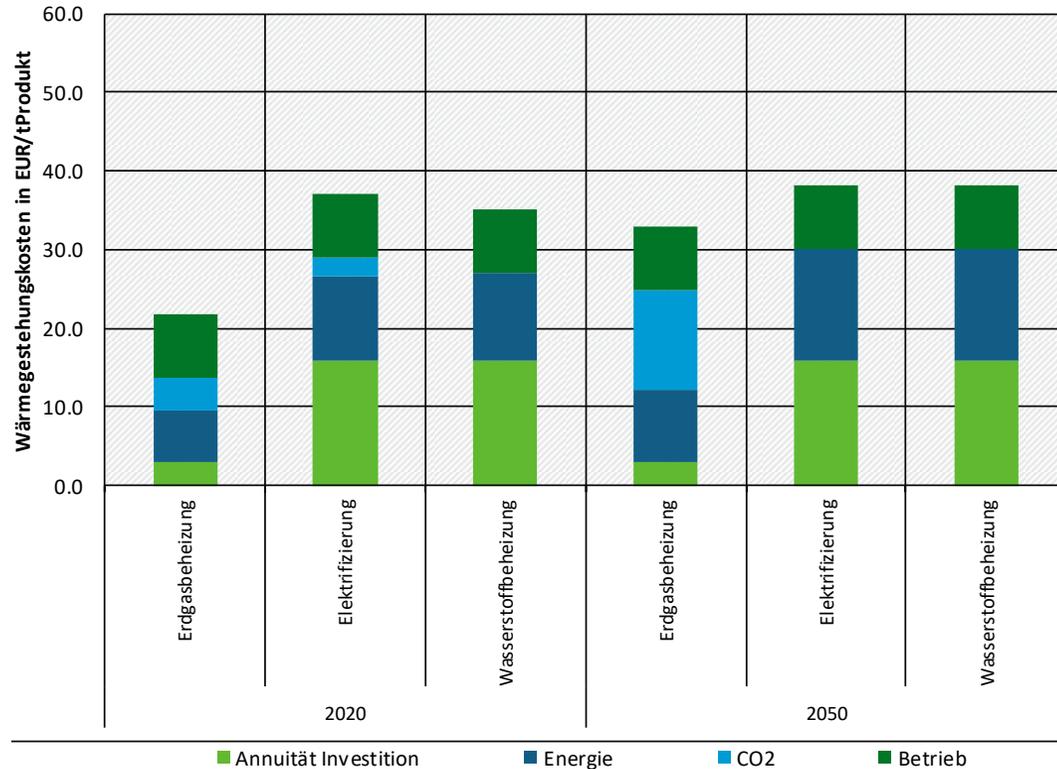
Hohe Investitionen  
Hohe Betriebskosten

- 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.

# Besonderheit Kupfer-Halbzeug: Kostenkomponenten Investition und Betrieb

## NE-Metallindustrie: Kupfer

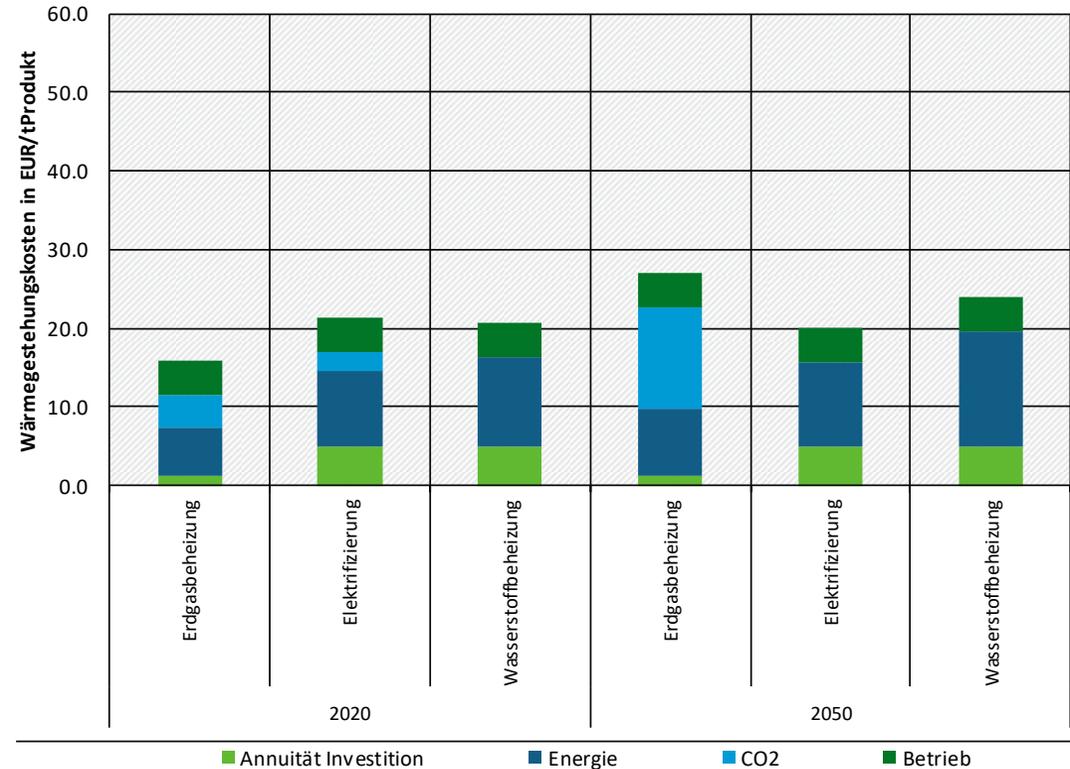
Diskontinuierliche Wärmebehandlung Kupfer-Halbzeug (hohe Kapazität)



Eigene Berechnung Fraunhofer ISI

## NE-Metallindustrie: Kupfer

Kontinuierliches Erwärmen Kupfer-Halbzeug für Warmumformung (hohe Kapazität)



Eigene Berechnung Fraunhofer ISI

---

# Methodik des Workshops

# Ziel des Workshops: Transformationspfade und Rahmenbedingungen für CO<sub>2</sub>-neutrale Prozesswärmeerzeugung erarbeiten



# Schritt 1: Identifizierung F&E-Bedarf, Hindernissen, notwendigen Rahmenbedingungen und Partnern für CO2-neutrale Prozesswärme

	Elektrifizierung		Wasserstoff		Hybrid		Andere Energieträger	
	F&E-Bedarf	Hindernisse	F&E-Bedarf	Hindernisse	F&E-Bedarf	Hindernisse	F&E-Bedarf	Hindernisse
Anwendung 1								
Anwendung 2								
Anwendung ...								
	Notw. Rahmenbedingungen		Notw. Rahmenbedingungen		Notw. Rahmenbedingungen		Notw. Rahmenbedingungen	
	Politisch	Wirtschaftlich	Politisch	Wirtschaftlich	Politisch	Wirtschaftlich	Politisch	Wirtschaftlich
	Notwendige Partner		Notwendige Partner		Notwendige Partner		Notwendige Partner	

# Schritt 2: Zeitliche Einordnung externer Faktoren für eine Umsetzung CO2-neutraler Prozesswärmeerzeugung

	Elektrifizierung		Wasserstoff		Hybrid		Andere Energieträger	
	Wo stehen wir?	Wo wollen wir hin?	Wo stehen wir?	Wo wollen wir hin?	Wo stehen wir?	Wo wollen wir hin?	Wo stehen wir?	Wo wollen wir hin?
Technologie		2020 2030 2040 2050		2020 2030 2040 2050		2020 2030 2040 2050		2020 2030 2040 2050
Preise/ Wirtschaftlichkeit		2020 2030 2040 2050		2020 2030 2040 2050		2020 2030 2040 2050		2020 2030 2040 2050
Flexibilität		2020 2030 2040 2050		2020 2030 2040 2050		2020 2030 2040 2050		2020 2030 2040 2050
Infrastruktur		2020 2030 2040 2050		2020 2030 2040 2050		2020 2030 2040 2050		2020 2030 2040 2050
Weiteres		2020 2030 2040 2050		2020 2030 2040 2050		2020 2030 2040 2050		2020 2030 2040 2050

---

miro board

[https://miro.com/app/board/uXjVNM92hPA=/?share\\_link\\_id=246901263116](https://miro.com/app/board/uXjVNM92hPA=/?share_link_id=246901263116)

*siehe auch Link im Chat*

---

Pause – 10 Minuten

---

# Gemeinsame Diskussion und interaktives Arbeiten

# Ergebnisse Gießerei (Auszug)

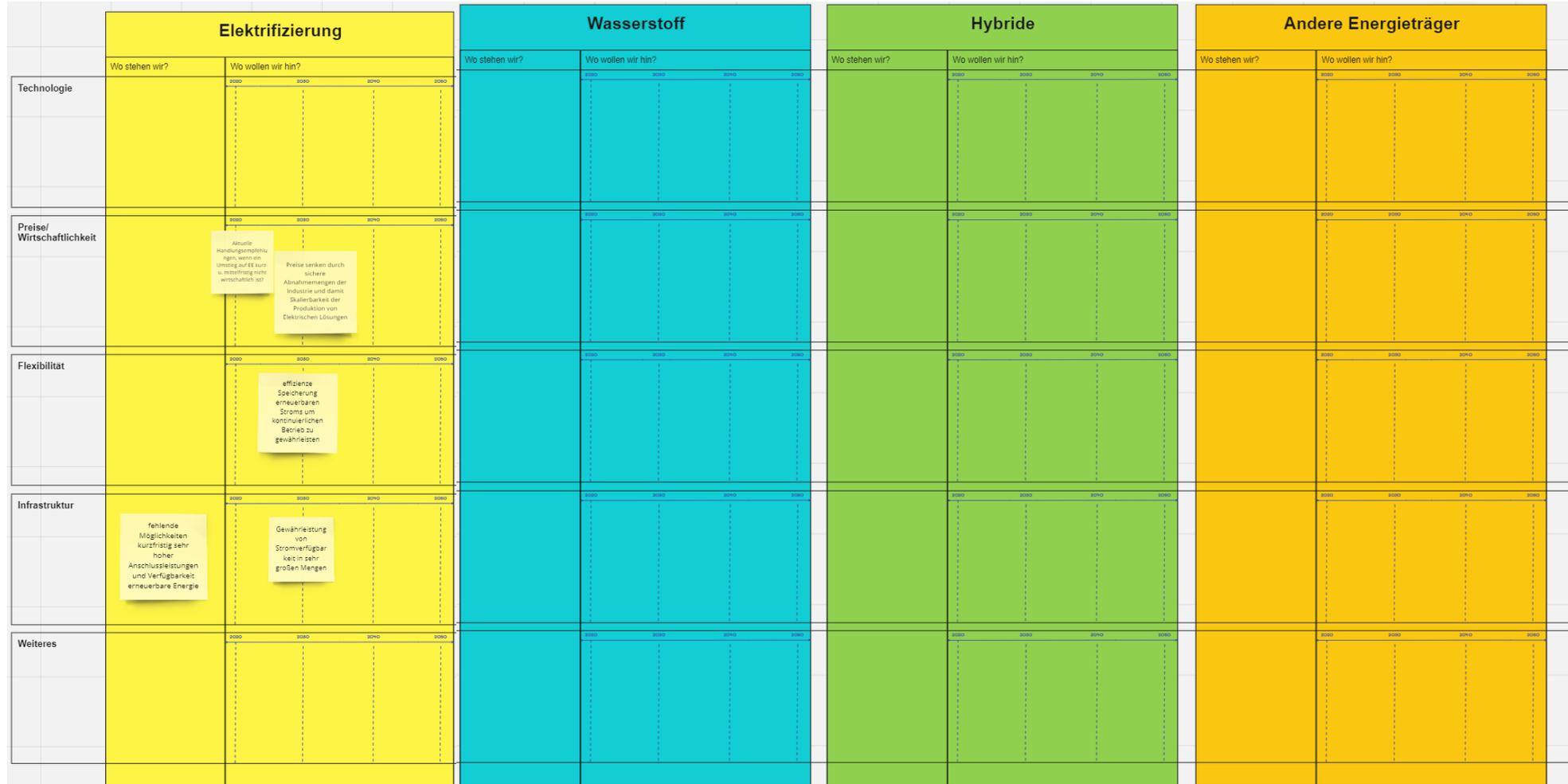
	Elektrifizierung		Wasserstoff		Hybrid		Sonstige Energieträger	
	F&E-Bedarf	Hindernisse	F&E-Bedarf	Hindernisse	F&E-Bedarf	Hindernisse	F&E-Bedarf	Hindernisse
<b>Kontinuierliches Schmelzen Gusseisen</b>	Im Bereich der Pfannenvorwärmung bedarf es weiterer Anbieter für die Anwendung im Eisen- und Stahlguss.	fehlende Infrastruktur zur Stromversorgung, insbes. bei Standorten mit Kabindrucklopfen im ländlichen Bereich. Die Kosten für das Legen der notwendigen Leitungen ist extrem teuer und wird nicht gefördert. Lokale Energieversorger beteiligen sich in der Regel nicht.	Einfluss von H <sub>2</sub> auf den metallischen Werkstoff und Feuerfestmaterial bedarf noch der Klärung bzw. Erforschung.	Hohe Kosten; geringe Verfügbarkeit; kaum Infrastruktur. Bei Abnahme großer Mengen ist eine Pipeline-Anbindung erforderlich. Oder dezentrale Elektrolyseure wirtschaftlich sind, ist derzeit fraglich; evtl. sinnvoll als "Speicher" für überschüssigen Grünstrom.	Bislang keine Erfahrungen hinsichtlich Brennen- und Schmelzaggregateignetheit			Biokolz (Karbonisat aus hochwertiger Biomasse) ist politisch durch die Restriktionen der Erneuerbare-Energie-Richtlinie (RED III) der EU und der nationalen Biomassestrategie der Bundesregierung gefördert bzw. fraglich. Hinsichtlich der Problematik der Verfügbarkeit.
<b>Kontinuierliches Schmelzen Aluminium Formguss</b>		Investitionskosten  Umbau vorhandener Prozessstrukturen	Interessant für alle endgasbetriebenen Anwendungen; Teil sollte schnell erbracht werden durch entsprechende F&E-Projekte					
	<b>Notwendige Rahmenbedingungen</b>		<b>Notwendige Rahmenbedingungen</b>		<b>Notwendige Rahmenbedingungen</b>		<b>Notwendige Rahmenbedingungen</b>	
	Politisch INDUSTRIE-STROMPREIS!!!	Wirtschaftlich Umbaukosten für mittelständische Unternehmen INDUSTRIE-STROMPREIS!!!	Politisch Wird interessant, sobald die Bezugskosten auf Level von elektrischer Energie sind		Politisch	Wirtschaftlich	Politisch Ausnahme für Biokolz Anwendung in der Gießerei Industrie im Rahmen der RED ist wasser möglich sein	Wirtschaftlich
	<b>Notwendige Partner</b>		<b>Notwendige Partner</b>		<b>Notwendige Partner</b>		<b>Notwendige Partner</b>	
	Energieversorger		Forschungseinrichtungen / Industriepartner  IOB, können Gießerei-Produktion Magdeburg, THM, DLR, DLR beschäftigen sich mit Gießerei-Produktion					

# Ergebnisse Gießerei (Auszug)

	Elektrifizierung		Wasserstoff		Hybride		Andere Energieträger	
	Wo stehen wir?	Wo wollen wir hin?	Wo stehen wir?	Wo wollen wir hin?	Wo stehen wir?	Wo wollen wir hin?	Wo stehen wir?	Wo wollen wir hin?
<b>Technologie</b>	für fast alle Thermoprozessanwendungen stehen elektrische Lösungen zur Verfügung	<p>80% (in Abhängigkeit von politisch/wirtschaftl. Rahmenbedingungen)</p> <p>70% (in Abhängigkeit von politisch/wirtschaftl. Rahmenbedingungen)</p> <p>50% (in Abhängigkeit von politisch/wirtschaftl. Rahmenbedingungen)</p>	ganz am Anfang; erste Forschungsprojekte laufen		ganz am Anfang; erste Forschungsprojekte laufen; z.T. auch hybride Brennertechnologien schon erprobt im Technikmaßstab		Beispiel ist z.T. Dampfer, aber Dampfer im weiteren Raum, aber nicht nur für Dampfer, der nachherigen Herstellungsstufe politischer Zulassung	
<b>Preise/ Wirtschaftlichkeit</b>	mit den derzeitigen Strompreisen ist eine Umstellung vom Kupfellofen auf Induktion betriebswirtschaftlicher Selbstmord. Nie würde eine Gießerei einen ROI erzielen.							
<b>Flexibilität</b>	Switch von Kupfellofen auf Induktion bedingt völligen Umbau des Schmelzbetriebes mit erheblichen Stoppland. Gefahr, dass in der Zeit die Kupfer abwandern. Ohne finanzielle Förderung ist nicht zu machen.							
<b>Infrastruktur</b>	Vielfach nicht vorhanden - Schaffung extrem teuer		mus geschaffen werden, Pipelineanbindung oder Elektrolyseure (betrieben durch Energieversorger) erforderlich					
<b>Weiteres</b>							CO <sub>2</sub> sollte im Zusammenhang mit Einsatz geprüft werden, um diese Anwendung zu einer CO <sub>2</sub> -Quelle machen zu können	



# Ergebnisse Aluminium (Auszug)



# Ergebnisse Kupfer (Auszug)

	Elektrifizierung		Wasserstoff		Hybrid		Sonstige Energieträger	
	F&E-Bedarf	Hindernisse	F&E-Bedarf	Hindernisse	F&E-Bedarf	Hindernisse	F&E-Bedarf	Hindernisse
Kontinuierlicher Schmelzofen Kupfer	Technik ist vorhanden	operative Kosten für Induktorwechsel und Feuerfestwechsel Investitionskosten und Energiekosten						
Kontinuierlicher Erwärmungs- ofen Kupfer-Halbzeug	Überführung alternativer elektrischer Beheizungen in die Praxis, z.B. Plasmabeheizung	Notwendige Leistungsdichte bei großen und mittelgroßen Anlagen Qualifikation für Anwendung alternativer Erwärmungstechnologien	Einfluss des hohen Wasserdampfgehalts auf das Wärmegut	Verfügbarkeit und Preisentwicklung bei H2		Möglicherweise erhöhte Investitionskosten durch doppelte Energie-Infrastruktur		
Diskonti. Wärmebehandlungs- ofen Kupfer-Halbzeugofen	Technik ist vorhanden	Bereitstellung der zusätzlichen Versorgung mit Elektroenergie						
	Notwendige Rahmenbedingungen		Notwendige Rahmenbedingungen		Notwendige Rahmenbedingungen		Notwendige Rahmenbedingungen	
	Politisch Senkung der Stromkosten	Wirtschaftlich	Politisch	Wirtschaftlich	Politisch	Wirtschaftlich	Politisch	Wirtschaftlich
	Notwendige Partner		Notwendige Partner		Notwendige Partner		Notwendige Partner	

# 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)

