

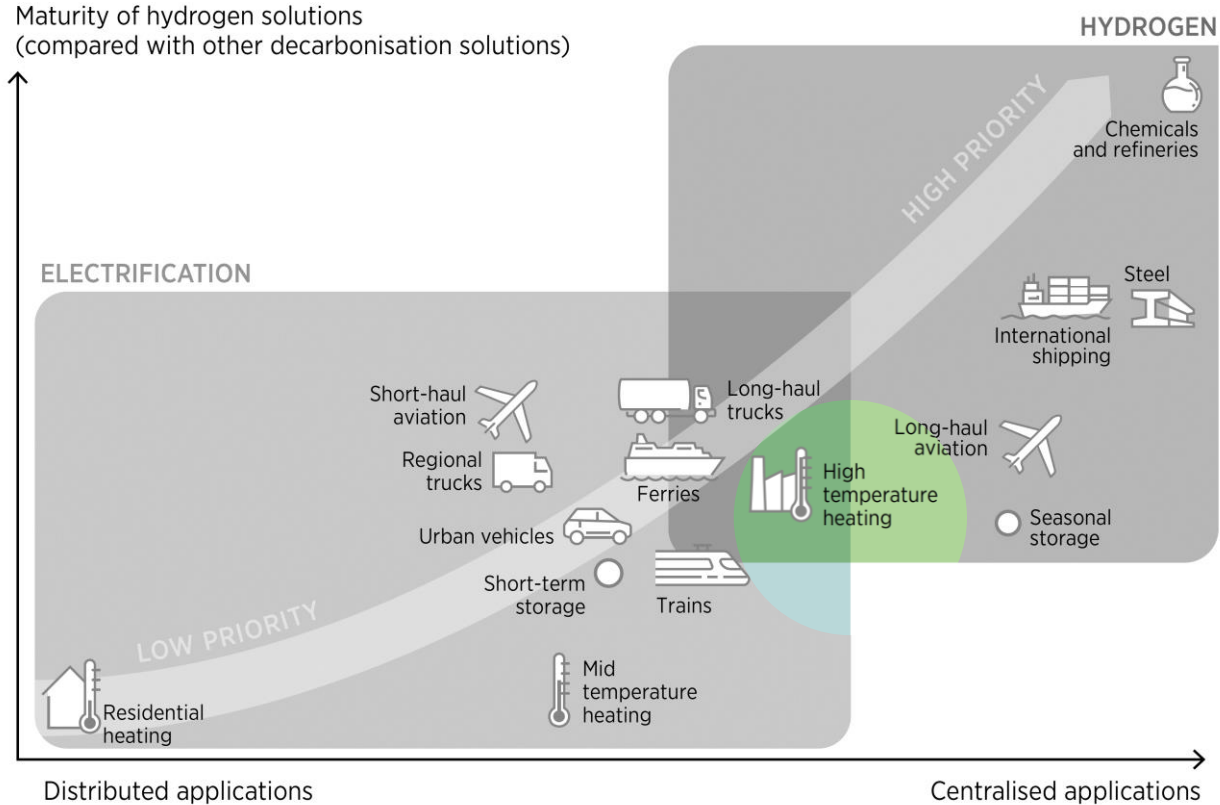
Die Zukunft der Thermoprozesstechnik: Erneuerbare Gase vs. Strom

Keynote

Deutscher Flammentag 2025

Prof. Dr.-Ing. Christoph Wieland, Dr.-Ing. Jörg Leicher, Dr.-Ing. Anne Giese

...warum ist das so spannend?



Quelle: [5]

1. Thermoprozessindustrie – Status Quo

2. Strategien zur Dekarbonisierung

- CO2 Emissionen
- Wirkungsgradkette
- Produkt- und Technologiesicht

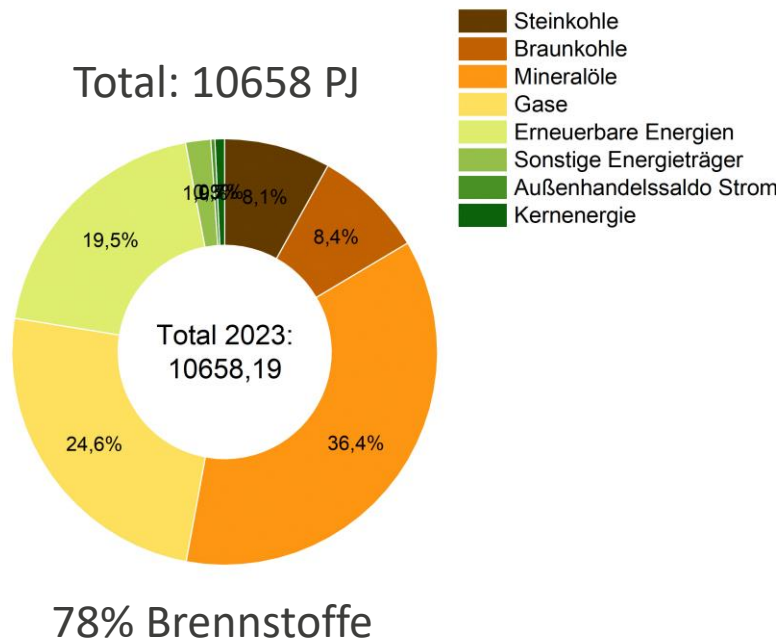
3. Die Zukunft der Moleküle

4. Zusammenfassung und Ausblick

Thermoprozessindustrie – Status Quo

Energie-Statistik der deutschen Industrien* (2023)

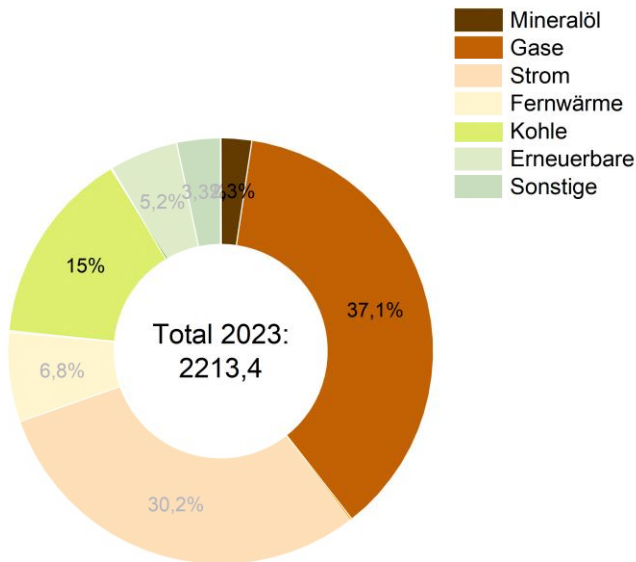
PEV nach Energieträgern in D



* Verarbeitendes Gewerbe und
übriger Bergbau

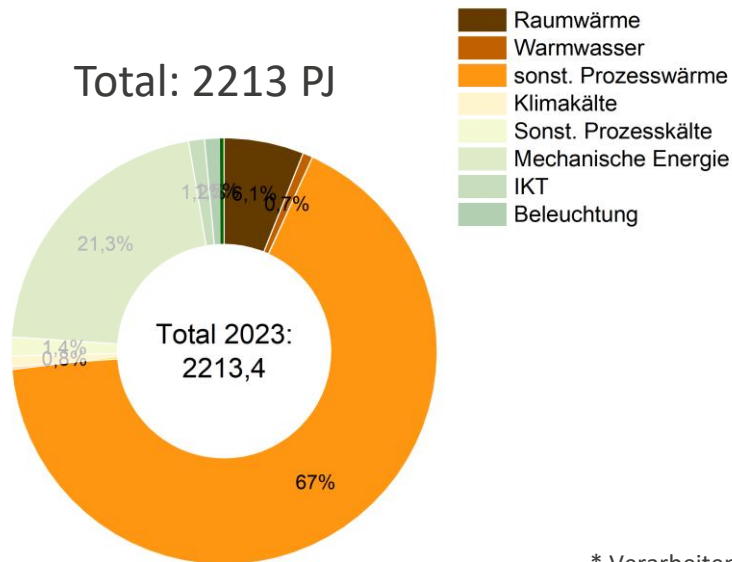
Energie-Statistik der deutschen Industrien* (2023)

Endenergieverbrauch nach Energieträger



Quelle: [3]

Endenergieverbrauch nach Anwendung



67% Prozesswärme
73% Wärme

Quelle: [3]

* Verarbeitendes Gewerbe und
übriger Bergbau

„Industrial heat decarbonisation is a Cinderella challenge: it has been severely neglected so far and urgently needs addressing.“ (Reuters)

Ca. 20% des deutschen Endenergiebedarfs fließt in die industrielle Prozesswärme. Prozesswärme ist damit die größte Quelle an industriellen Treibhausgasemissionen. Ähnlich sieht es auch in anderen Industrieländern in Europa und weltweit aus.

be und

67% Prozesswärme

übriger Bergbau

73% Wärme

Quelle: [3]

Quelle: [3]

Definition der Thermoprozesstechnik

DIN EN ISO 13577

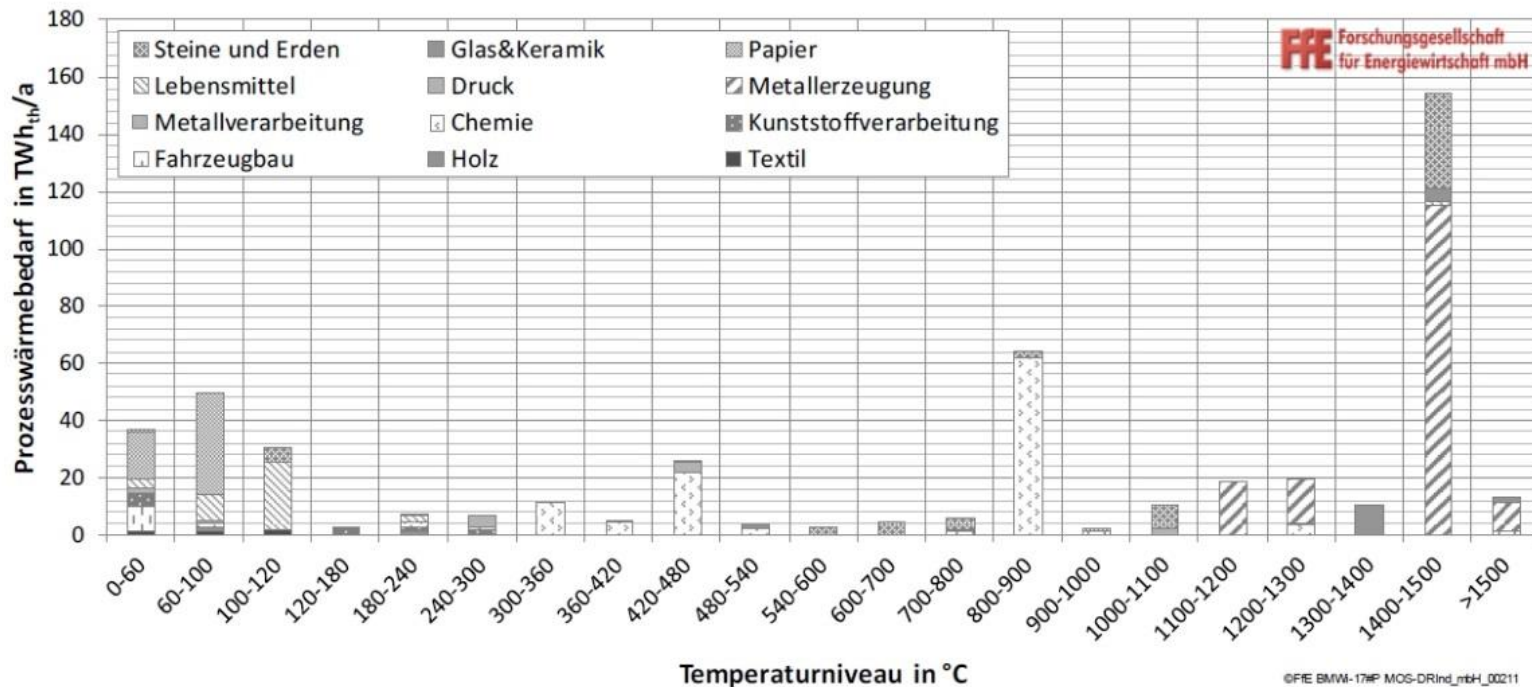
Thermoprozesstechnische Anlagen sind industrielle Anlagen, in denen Stoffe durch die Zufuhr von Wärme behandelt werden.

Herausforderungen für die Zukunft:

In der modernen industriellen Anwendung steht die **Produktqualität**, die **Prozesseffizienz**, die **Emissionsreduzierung** und **Prozessautomatisierung** im Fokus der Thermoprozesstechnik. Hierzu zählen auch Ansätze wie **Wärmerückgewinnung**, **Brennstoffoptimierung** und digitale **Prozessüberwachung**.

Konkret bedeutet das: **CO₂-reduzierte Hochtemperaturprozesse** und Einsatz **regenerativer Energien** in Thermoprozessen

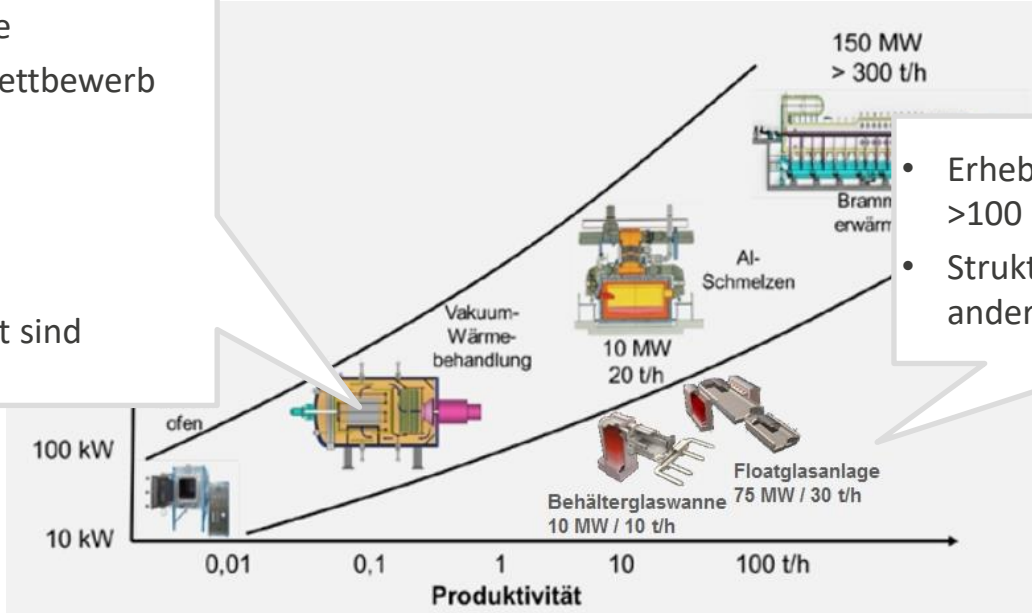
Einige Besonderheiten, die es bei der Thermoprozessindustrie zu beachten gilt:



→ Das Temperaturniveau bestimmt die Möglichkeiten zur Dekarbonisierung...

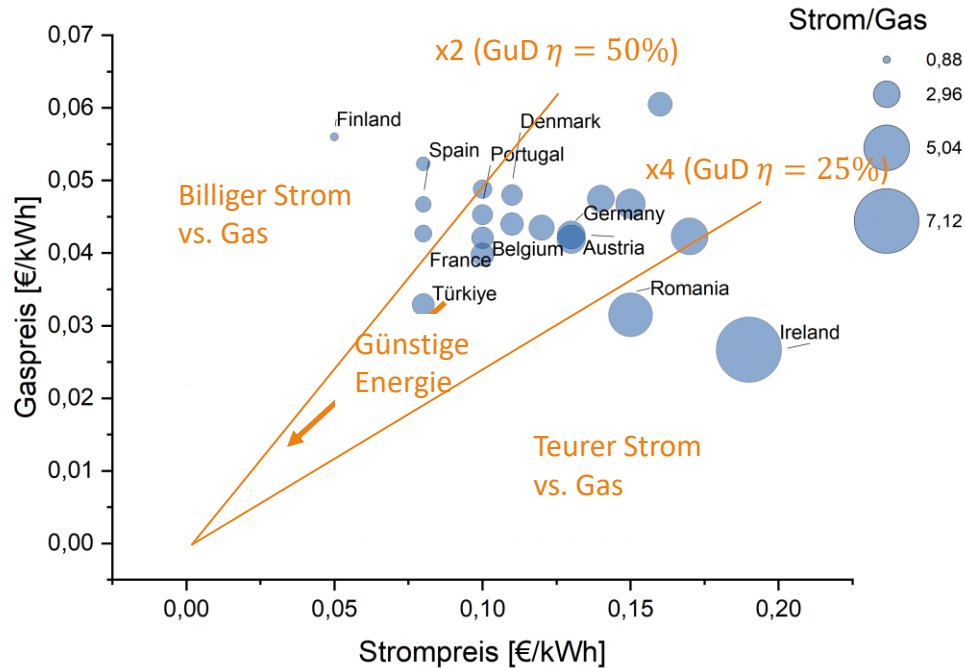
Einige Besonderheiten, die es bei der Thermoprozessindustrie zu beachten gilt:

- Sehr heterogene, hoch spezialisierte Prozesse
- Im internationalen Wettbewerb
- Teil von komplexen Fertigungsketten
- Produktqualität
- Energiekosten und Versorgungssicherheit sind Standortfaktoren



- Erheblicher Energiebedarf (tw. >100 MW)
- Struktureller Unterschied zu anderen Sektoren

Ein Blick auf die Energiekosten



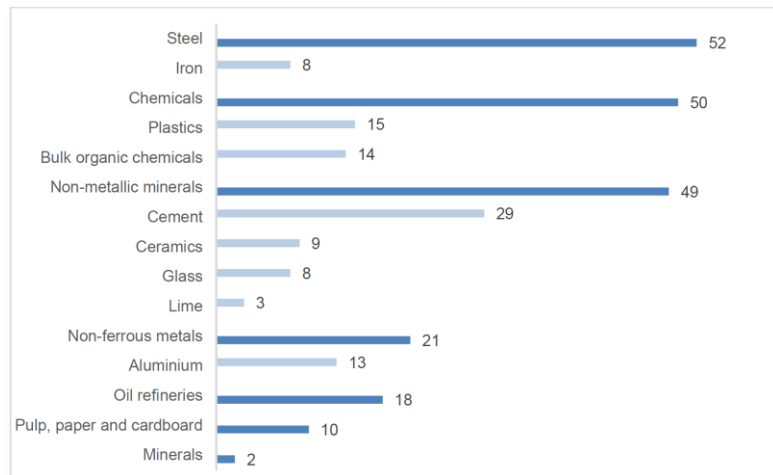
- Strom für die Industrie in Deutschland ist teuer
- Das Gas ist es aber leider auch
- Die Transformation wird bestimmt von
 - Stromkosten
 - Neue Ofenkonzepte
 - Vorhandene Infrastruktur

Quelle: [8], Zahlen aus 2024, Stromverbraucher >150'000 MWh, Gas >4'000'000 GJ

Welche Strategien gibt es für die Dekarbonisierung?

Technologieübersicht EU-Forschungsförderung

Forschungsprojekte nach Sektor



Ausgewählte Sektoren nach Technologien

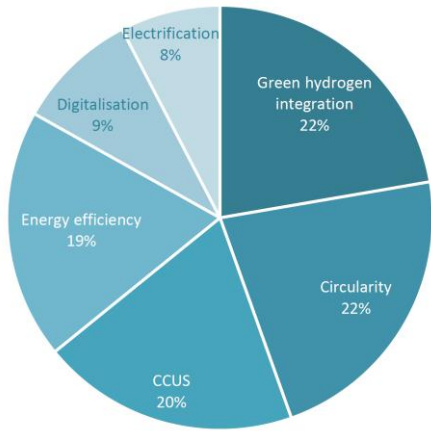
| | Green hydrogen integration | Circularity | CCUS | Energy efficiency | Digitalisation | Electrification |
|---------------------------|----------------------------|-------------|------|-------------------|----------------|-----------------|
| Steel | 12 | 11 | 6 | 9 | 10 | 4 |
| Chemicals | 11 | 20 | 7 | 3 | 3 | 6 |
| Cement | 2 | 3 | 14 | 8 | 2 | |
| Aluminium | 1 | 5 | | 4 | 2 | 1 |
| Other non-ferrous metals | | 2 | | 3 | 3 | |
| Oil refineries | 9 | 1 | 5 | 3 | | |
| Multiple | 3 | 2 | 6 | | | |
| Pulp, paper and cardboard | 3 | | 2 | 5 | | |
| Glass | 1 | | 1 | 2 | 1 | 3 |
| Ceramics | 1 | | 1 | 5 | | 2 |
| Other minerals | | | 1 | 1 | | |

- FuE Projekte finden sich zu H2 und Elektrifizierung in allen energieintensiven Industrien
- Eindeutige Technologie-Trends lassen sich nur bedingt feststellen (Chemie, Zement)

Quelle: [1]

Technologieübersicht EU-Forschungsförderung

Projekte & Themen



Themen nach Reifegrad

| | TRL 6 | TRL 7 | TRL 8 | TRL 9 | Unknown | Total |
|----------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|------------|
| Green hydrogen integration | 4 | 4 | 6 | 26 | 1 | 41 |
| Circularity | 1 | 30 | 6 | 3 | 1 | 41 |
| CCUS | 4 | 12 | 5 | 13 | 2 | 36 |
| Energy efficiency | 1 | 25 | 2 | 4 | 3 | 35 |
| Digitalisation | | 16 | | | 1 | 17 |
| Electrification | 7 | 1 | | 6 | | 14 |
| Total | 17 | 88 | 19 | 52 | 8 | 184 |

- Geförderte Projekte adressieren alle relevanten Themen zur Transformation...
- ...allerdings in unterschiedlichen Reifegraden der jeweiligen Technologie.

Quelle: [1]

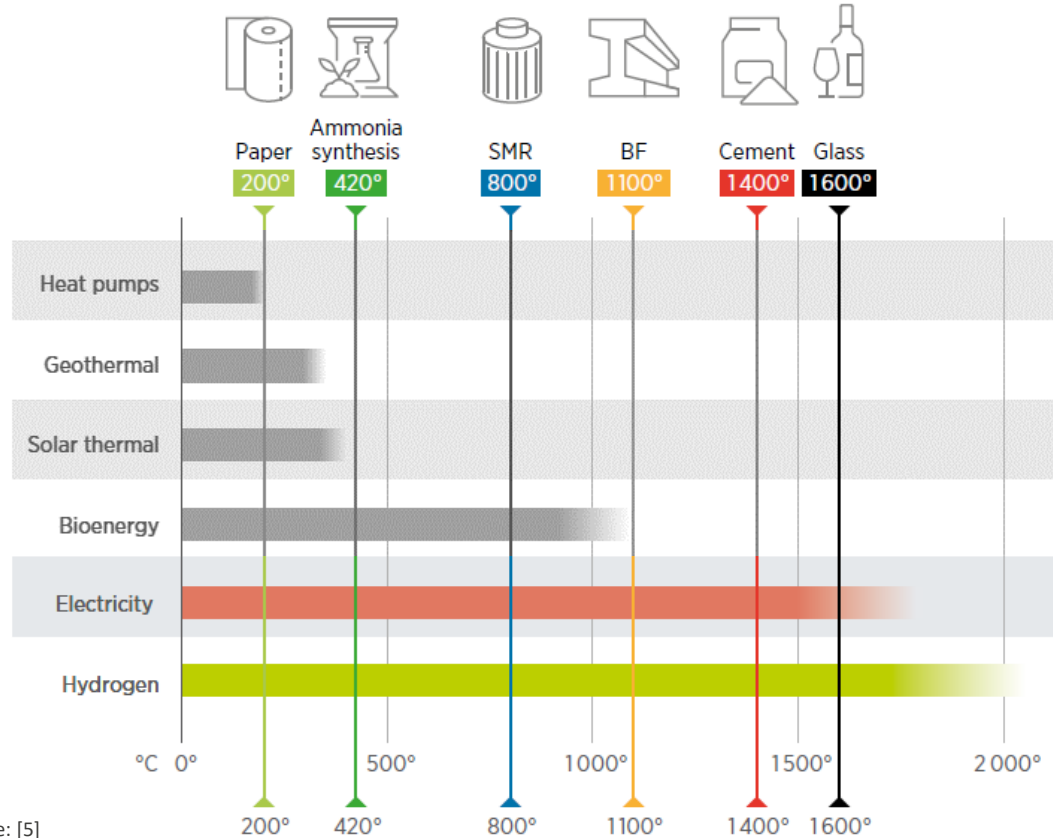
Entwicklungspfade für die Dekarbonisierung

- Es gibt mehrere Optionen zur Dekarbonisierung der Prozesswärme:
 1. **Effizienzsteigerung** (keine Lösung für sich allein, aber ein Ausgangspunkt!)
 2. **Carbon Capture and Storage (CCS)** oder **Carbon Capture and Utilization (CCU)**
 3. **Elektrifizierung** der Prozesswärme (mit erneuerbarem Strom)
 4. **Kohlenstoffneutrale** (z. B. Biomasse, Biogas) oder **kohlenstofffreie Brennstoffe** (z. B. H_2 , NH_3)...

Lange Zeit wurde erwartet, dass ein Großteil der industriellen Prozesswärme elektrifiziert würde – ähnlich wie in anderen Sektoren (die „All-Electric World“).

→ Es wächst das Bewusstsein, dass die Dinge möglicherweise nicht so einfach sind – insbesondere dort, wo hohe Prozesstemperaturen erforderlich sind.

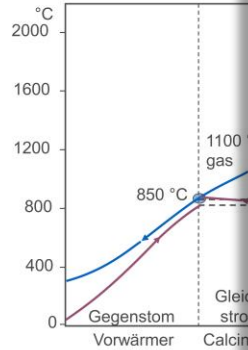
Optionen für dekarbonisierte Prozesswärme



Quelle: [5]

Wärme- und Stoffübergang (am Beispiel der Zementindustrie)

Temperaturprofil



Quelle: [14]

Alternativbrennstoffe - Herausforderungen und Möglichkeiten



Carbon Capture, (Transport,) Utilization and Storage



- Die Zementindustrie auf dem Weg zur Müllverbrennungsanlage
- Staubförmiges Gut (optisch dicht) muss gleichmäßig erwärmt werden → Direktkontakt WÜ
- Auch zukünftig in der Zementindustrie: feste Brennstoffe mit CO₂-Abscheidung gesehen

Elektrische Beheizung vs. Verbrennung

Gasgefeuerte Strahlrohr-Brenner mit Luftvorwärmung



$\eta \approx 80 \%$



Image: GWI

Elektrisches Heizelement mit Strahlrohr

$\eta \approx 95 \%$



Vertical and horizontal Tubothermal elements.

Image: Kanthal

CO₂-Emissionen in Europas Strommix

gCO₂e/kWh

600

500

400

300

200

100

0

1990

2000

2010

2020

2030

2040

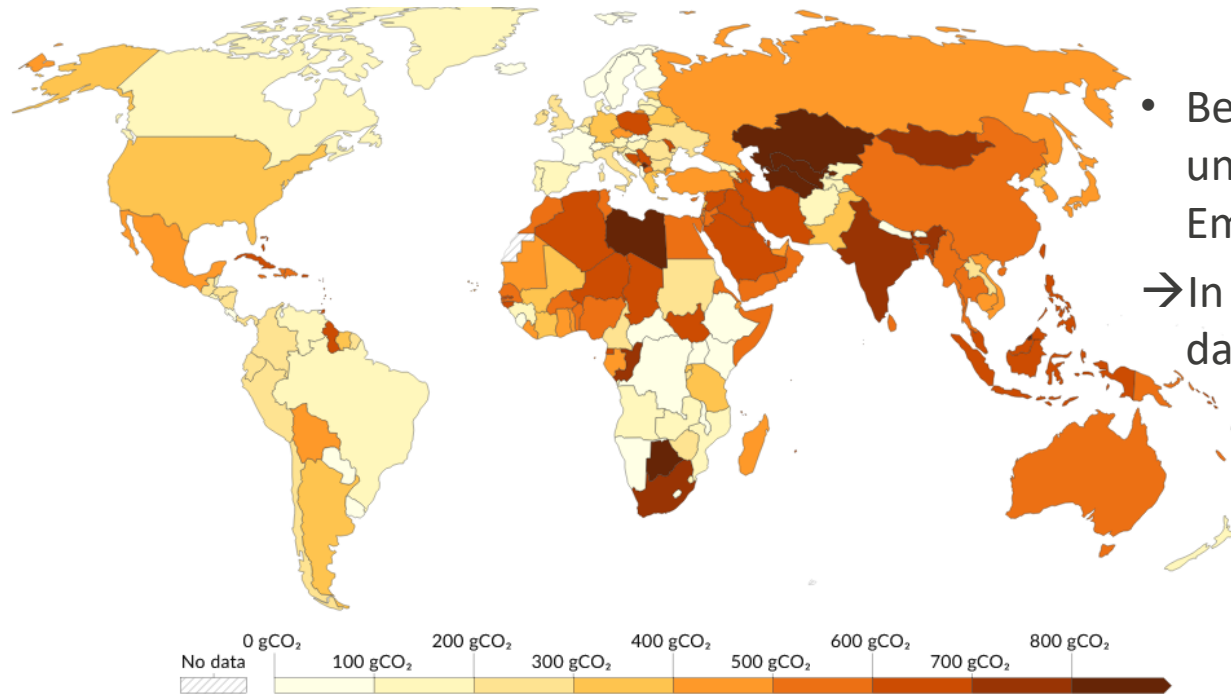
— Greenhouse gas (GHG) emission intensity — — Indicative level high — — Indicative level low

- Der Strommix wird grüner, aber...
→ Bei der Elektrifizierung hängen noch ordentlich CO₂-Emissionen dran.

Quelle: [7]

Carbon intensity of electricity generation, 2024

Carbon intensity is measured in grams of carbon dioxide-equivalents emitted per kilowatt-hour of electricity generated.

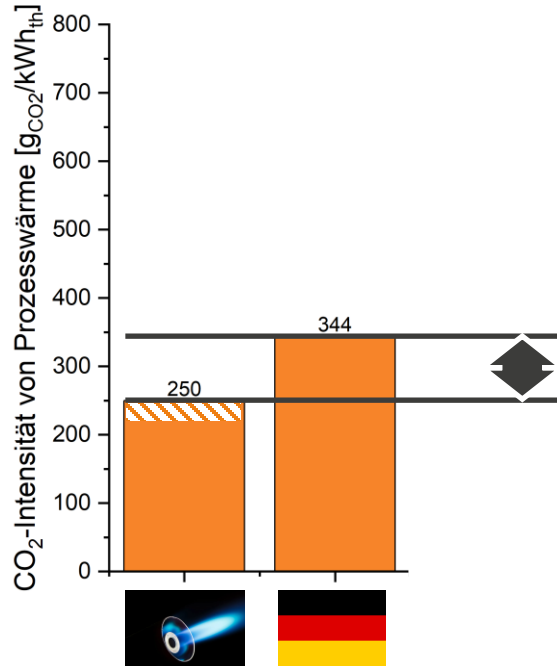


- Bei uns wird der Strom grüner und die spezifischen CO₂-Emissionen nehmen ab, aber...
→ In anderen Regionen wird sich das so schnell nicht ändern.

Ist die Elektrifizierung immer die klimafreundlichste Lösung?

Das hängt von ein paar Faktoren ab...

Spezifische $\text{CO}_{2\text{eq}}$ Emissionen für Hochtemperatur Prozess-Wärme ($T = 1.000\text{ °C}$) (2024)



$$\Delta\text{CO}_{2,\text{eq}} = 94 \text{ g/kWh}_{\text{th}} \text{ bzw. } \Delta \approx 40\%$$

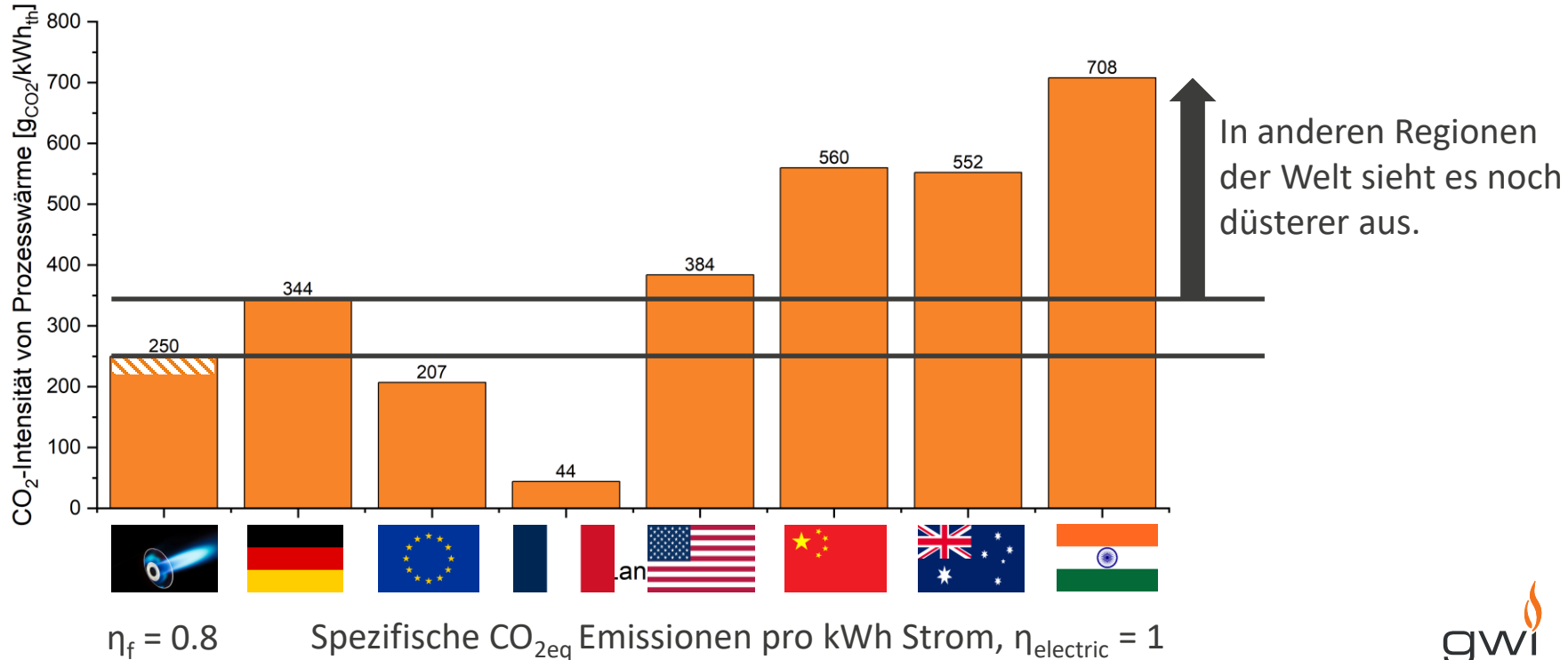
$\eta_f = 0.8$

Spezifische $\text{CO}_{2\text{eq}}$ Emissionen pro kWh Strom, $\eta_{\text{electric}} = 1$

Ist die Elektrifizierung immer die klimafreundlichste Lösung?

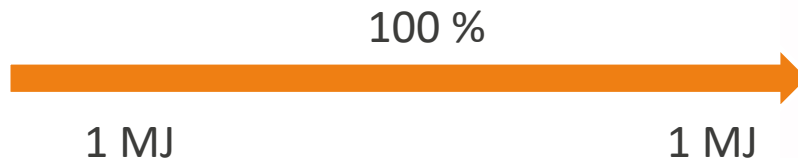
Das hängt von ein paar Faktoren ab...

Spezifische $\text{CO}_{2\text{eq}}$ Emissionen für Hochtemperatur Prozess-Wärme bei ($T = 1.000\text{ }^{\circ}\text{C}$)

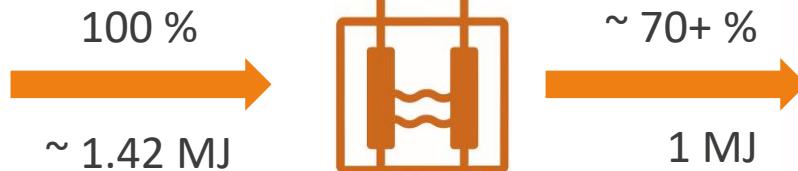


Elektrische Beheizung vs. Wasserstoffverbrennung: Die Wirkungsgradkette

„grüner“ Strom:

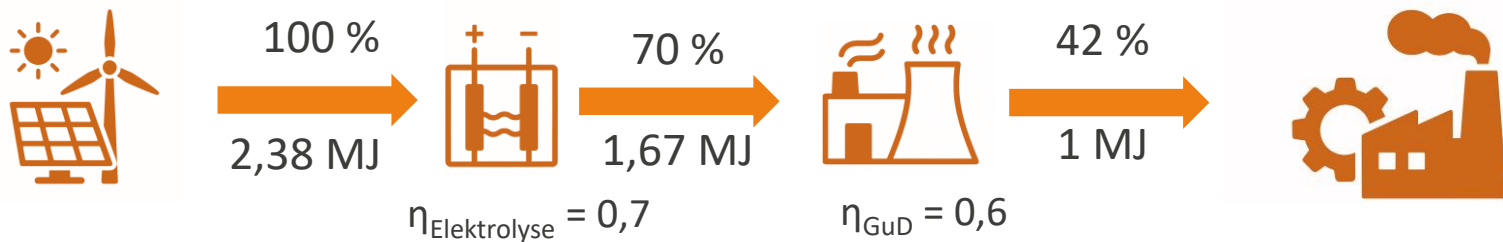


„grüner“ Wasserstoff:

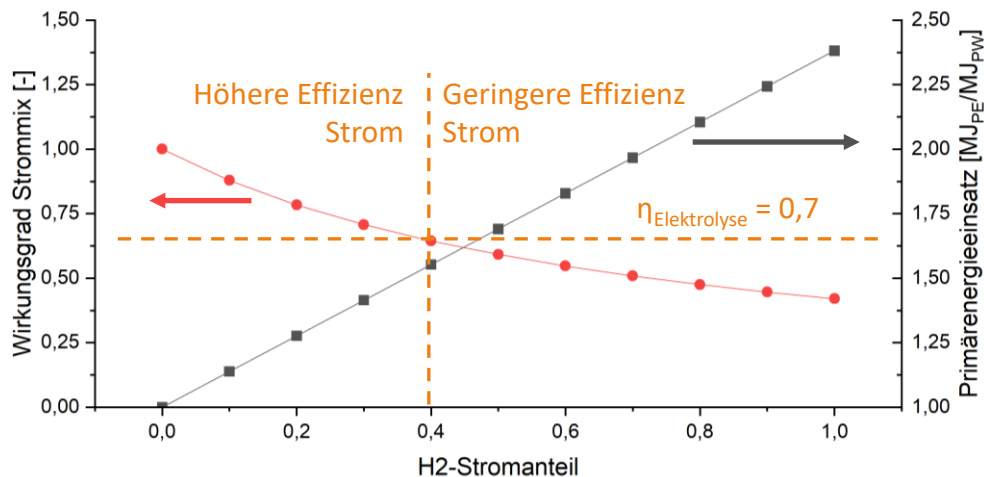


Vereinfachte Betrachtung: Transportverluste nicht berücksichtigt

Wie effizient ist eine elektrisch beheizte Thermoprozessanlage in der berüchtigten Dunkelflaute?



Annahme:
konstanter Prozess-
wärmebedarf



Wirkungsgrad und Kosten sind nicht alles

Der Wirkungsgrad war schon immer wichtig, es ist aber nicht der einzige Aspekt:

- Die „**Qualität der Wärme**“ muss stimmen
 - **Wärmestromdichten, Temperaturen** und der **Wärmeeintrag** können Auswirkungen auf die Produktivität, die Produktqualität und die Anlagengrößen haben
- **Produkteigenschaften** müssen für die Elektrifizierung berücksichtigt werden
 - Leitfähigkeit des Produktes
 - Wärmeübertragung bei Granulat oder Stückgut
- Gleichmäßiger **Temperatureintrag** und Einfluss der **Ofenatmosphäre**
- **Nachrüstbarkeit** bei bestehenden Anlagen, Lebensdauer und etwaige Risiken
- Verfügbarkeit der **Infrastruktur** und der Versorgungssicherheit.

Konkrete Beispiele

Die **Glasindustrie** nutzt bereits **elektrische Schmelzöfen**, aber ihre Produktionsraten sind begrenzt (~250 t/Tag). Es gibt physikalische Grenzen wie viel Glas elektrisch geschmolzen werden kann, zumindest mit den heutigen elektrischen Ofendesigns. **Hybride Öfen** mit Wasserstoff könnten eine Option zur Dekarbonisierung sein.

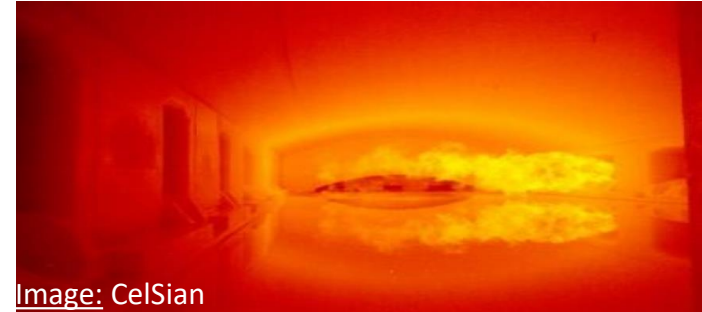


Image: CelSian

Elektrische Öfen können für **Aluminiumschrott-Recycling** eingesetzt werden, benötigen jedoch sehr **sauberen Schrott**, da die Produktqualität durch organische Verunreinigungen im Schrott leiden kann. Elektrische **Öfen** sind in der Regel **deutlich kleiner** (maximale Tonnage: 16 t vs. 120 t).



Image: Tenova

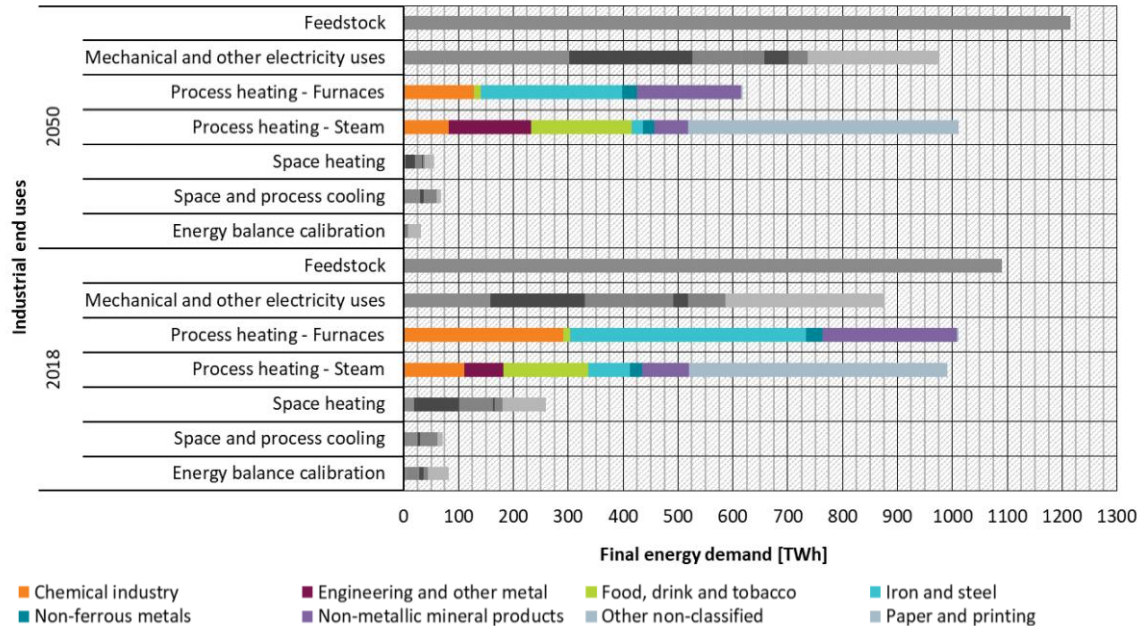
Moderne Elektrolichtbogenöfen in der **Stahlindustrie** sind oft **hybrid**, bei denen **30–40 %** des Energieeinsatzes durch **Gasbrenner** gedeckt werden um (1) die Gesamteffizienz zu erhöhen, (2) Temperaturverteilungen zu homogenisieren und (3) den Elektrodenverbrauch zu senken. OEMs arbeiten daran, die Brenner auf H₂ umzurüsten.



Image: Steel Supply LP

Welche Moleküle für welche Zukunft?

Prozesswärmebedarfe in 2050

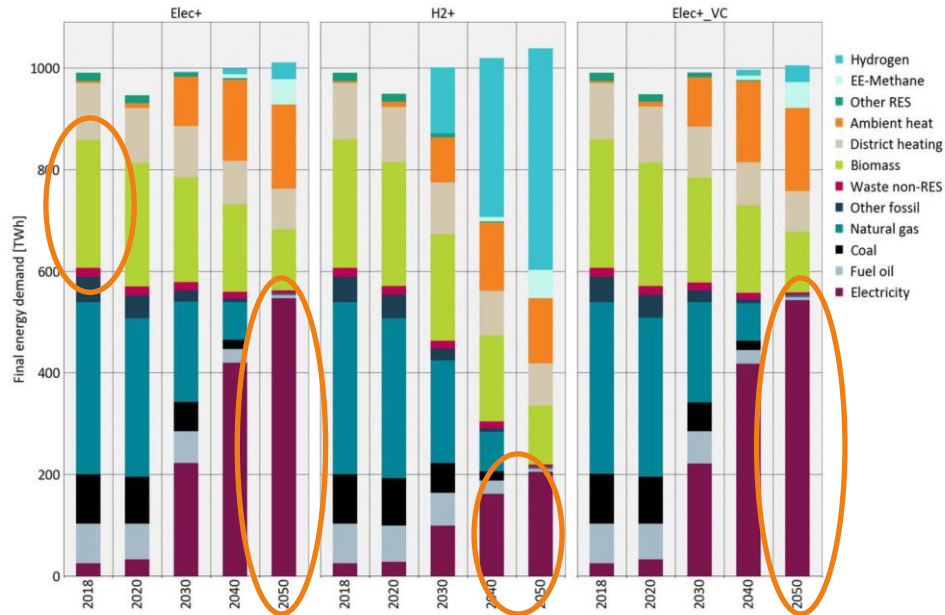


- Brennertechnologien in der Hochtemperatur-Prozesswärme auch noch 2050
- Energiebedarf bei den Verbrennungstechnologien reduziert sich von 1000 TWh auf ca. 600 TWh

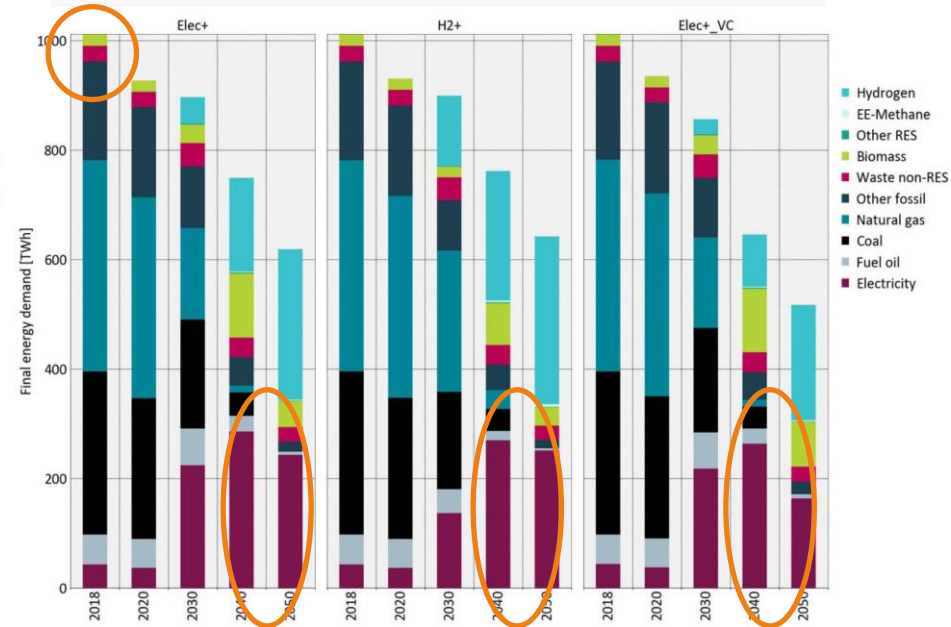
Quelle: [9], ELEC+ Szenario based on Eurostat data

Prozesswärmebedarf und Energieträger: Szenarien für die EU 2018 – 2050

Niedertemperatur-Anwendungen (<300°C)



Hochtemperatur-Anwendungen (>300 °C)

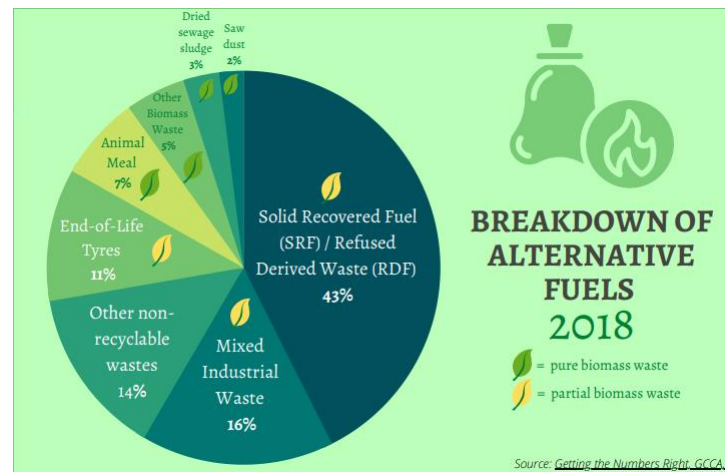


- Strom wird an Bedeutung gewinnen, bei HT-Anwendungen unabhängig vom Szenario
- Biomasseanwendungen bei NT-Anwendungen

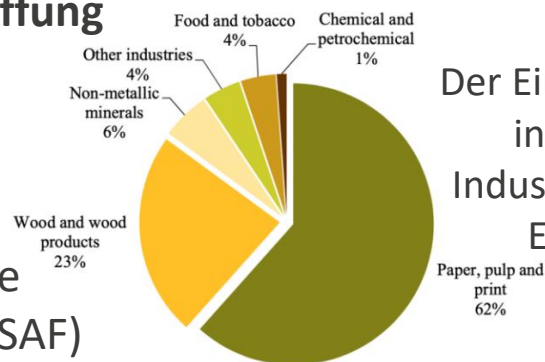
Quelle: [9], Elec+: focus on electrification for decarbonization; Elec+VC: energy intense raw materials are sourced from outside EU; H2+: focus on hydrogen for decarbonization

Biomasse, Biogas und Biomethan

- Der Einsatz von **Biomasse** ist in einigen Industrien bereits gängige Praxis. **Biomethan** wird ebenfalls für Prozesswärme genutzt. Beispielsweise wird heute etwa 1 % des deutschen Erdgasbedarfs durch Biomethan gedeckt.
- F&E-Projekte zeigen, dass selbst nur grob vorbehandeltes **Biogas** für die Prozesswärme direkt genutzt werden kann.
- Die **Herausforderungen** bei Biomasse und Biogas liegen in der **Skalierbarkeit, Logistik, Beschaffung und den Kosten**. Darüber hinaus
 - „Tank oder Teller“-Diskussion
 - Flächennutzungskonkurrenz
- Biomasse als **begrenzte Ressource** für andere schwer zu dekarbonisierende Sektoren (z.B. SAF)

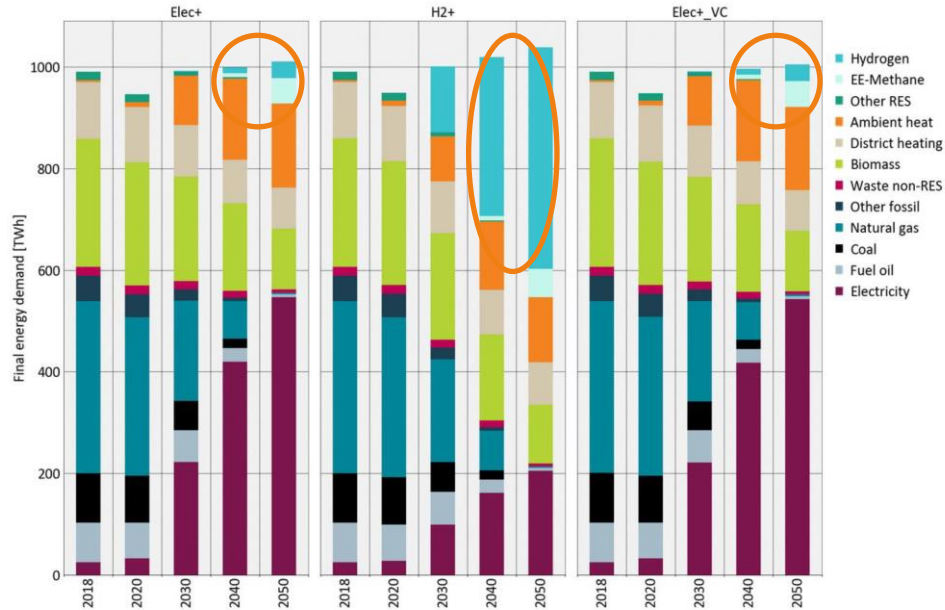


Source: Cembureau

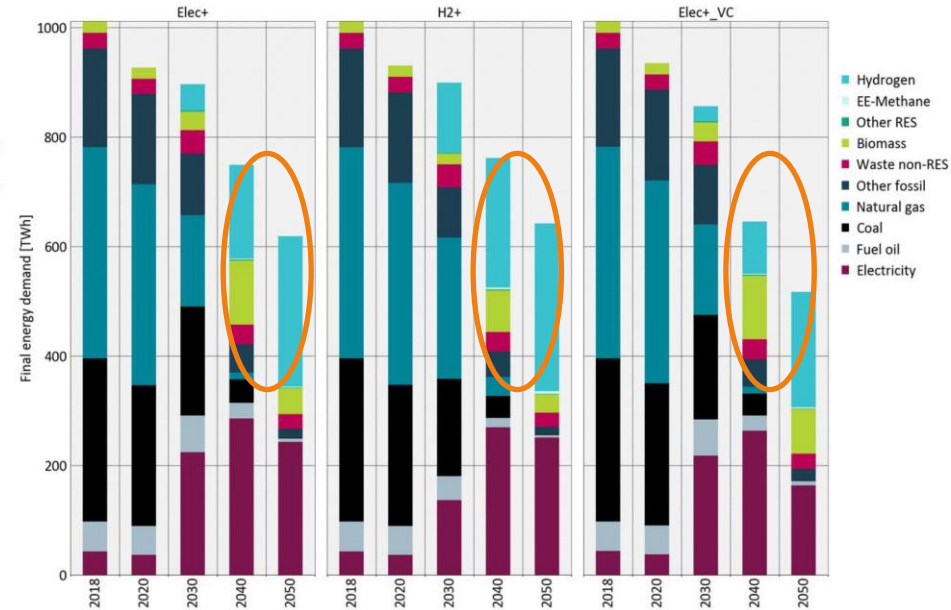


Prozesswärmebedarf und Energieträger: Szenarien für die EU 2018 – 2050

Niedertemperatur-Anwendungen (<300°C)



Hochtemperatur-Anwendungen (>300 °C)

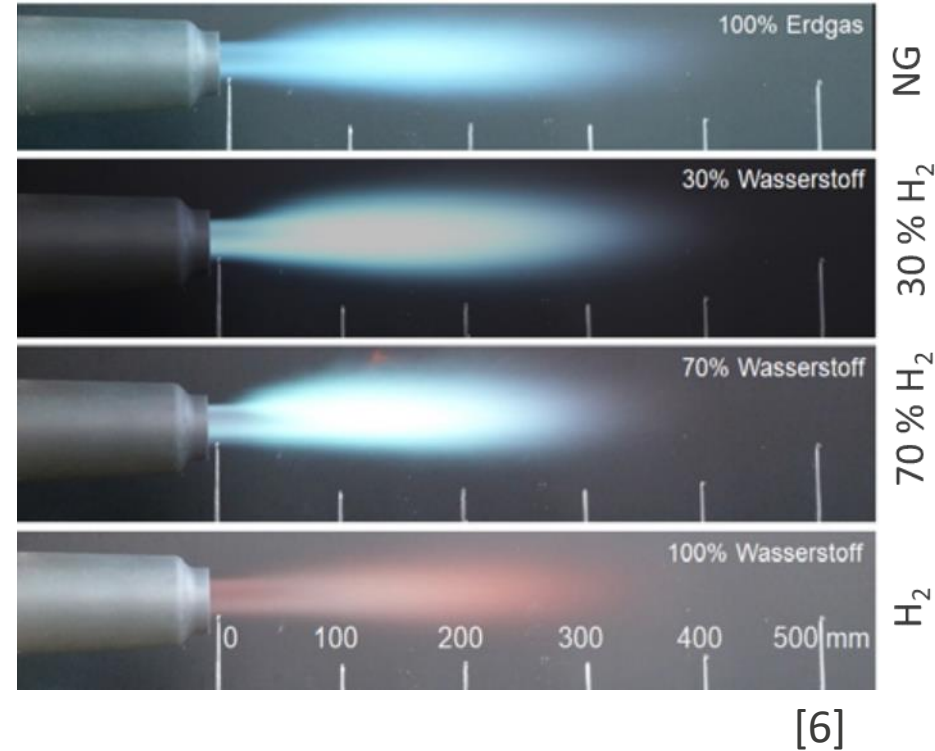


- Wasserstoff und Derivate werden bei HT-Anwendungen auch in Strom-Szenarien präsent sein
- Bei moderaten Temperaturen wird eher eine untergeordnete Rolle gesehen

Quelle: [9], Elec+: focus on electrification for decarbonization;
H2+: focus on hydrogen for decarbonization

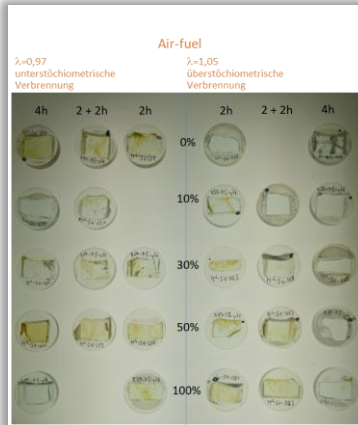
Wasserstoff und seine Derivate

- Viele energieintensive Industrien sehen **Wasserstoff** als vielversprechende Option für die Dekarbonisierung, insbesondere zur Substitution von Erdgas.
- Bei der **nicht-vorgemischten Verbrennung** ist der Wechsel auf H_2 tendenziell einfacher als bei vorgemischter Verbrennung (Gasturbinen oder Haushaltsgeräten)
- Forschungsfragen ergeben sich zu
 - **Produktqualität und Feuerfest-Materialien**
 - **NO_x -Emissionen**
 - **Verfügbarkeit und Preis**

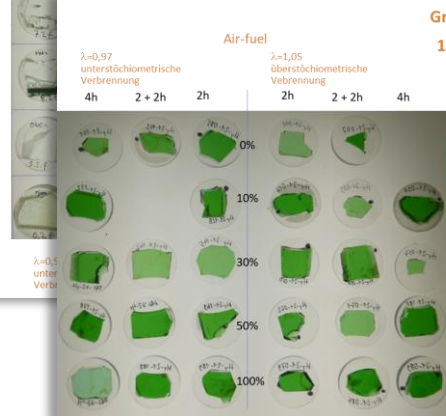
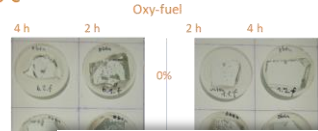


Bildquelle:[11]

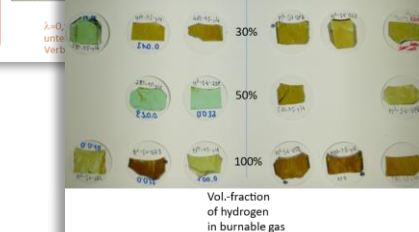
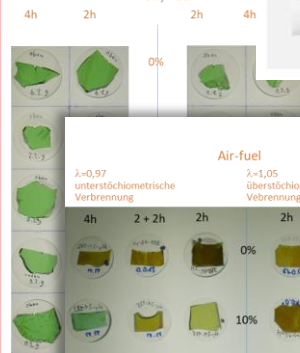
Wasserstoff und seine Derivate: Einfluss auf die Produkteigenschaften



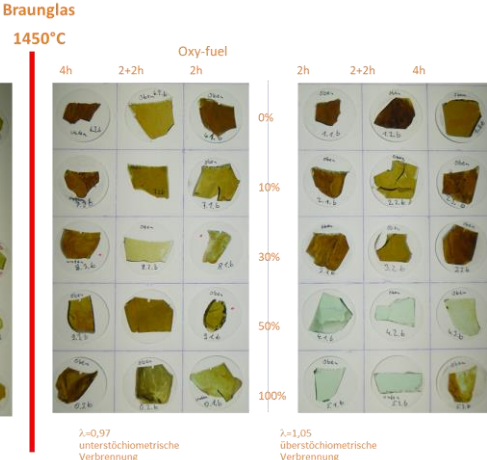
Vol.-fraction
of hydrogen
in burnable gas



Vol.-fraction
of hydrogen
in burnable gas

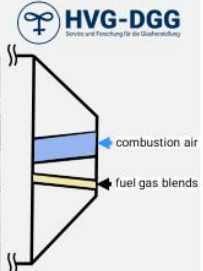


Vol.-fraction
of hydrogen
in burnable gas



Vol.-fraction
of hydrogen
in burnable gas

TESTOFEN (AIR-FUEL)



Wasserstoff und seine Derivate: Erste Versuche im Industriemaßstab laufen

Press release, March 2023

kuepper solutions
Power. Innovation. Responsibility.

Aktuelles Produkte Mischheiten iRecu®

iRecu ins Spiel. Werden diese Anlagen auf unsere wasserstofffähigen Brenner umgerüstet, kann der Anlagenbetrieb je nach durch Wasserstoff erfolgen. Diese hybride Funktionsweise der Anlagen sorgt also für Flexibilität in der Wahl der Brennstoffe. In anderen Worten: Unser Dual-Fuel-Brenner macht Anlagen H₂-ready.



„Aus dem Schornstein kam statt CO₂ Wasserdampf“

World's first batch of recycled aluminium using hydrogen fueled production

Hydro has produced the world's first successful batch of aluminium using green hydrogen as an energy source. The test is another step towards carbon-free aluminium.

Press release, June 2023

AGC
Your Dreams, Our Challenge

AGC Achieves Success in Demonstration Test of Glass Production Using Hydrogen as Fuel

SAINT-GOBAIN ACHIEVES THE FIRST FLAT GLASS PRODUCTION USING MORE THAN 30% HYDROGEN



Press release, March 2023

EU project, started 01/2024



H 2 A L

DECARBONISING ALUMINIUM RECYCLING WITH HYDROGEN

Press release, October 2023

OVAKO

INDUSTRY SOLUTIONS STEEL PORTFOLIO PRODUCT FORMS SERVICES SUSTAINABILITY

You are here: [Decarbonisation](#) / [Steel](#) / First in the world to heat steel using hydrogen

First in the world to heat steel using hydrogen



EU project, started 01/2023

NEWS RELEASE

NSG
GROUP

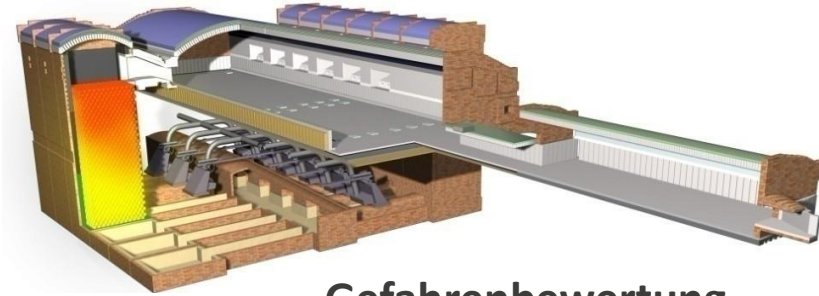
3 September 2021
Nippon Sheet Glass Co., Ltd.

Architectural Glass Production Powered by Hydrogen in World First

H₂-Versuche im industriellen Maßstab*

- Untersuchungen über den Einfluss von H₂ an einer 50 MW-Float-Glas-Wanne in UK
- 3 Test-Wochen (à 6 h) an **1 Port**, 20 % - **100 % H₂**. Tests mit 15 % H₂ an allen Ports.
- Allein die **Logistik** ist eine Herausforderung: bei 100 % H₂ musste alle 40 min der Trailer gewechselt werden. Es müssen ausreichend H₂ (und Trailer!) zur Verfügung stehen für Untersuchungen im industriellen Maßstab!
- Der **sichere Umgang** mit großen Mengen H₂ zu Testzwecken in einem Industriebetrieb ist nicht trivial.

Image: CGE Glass



Gefahrenbewertung

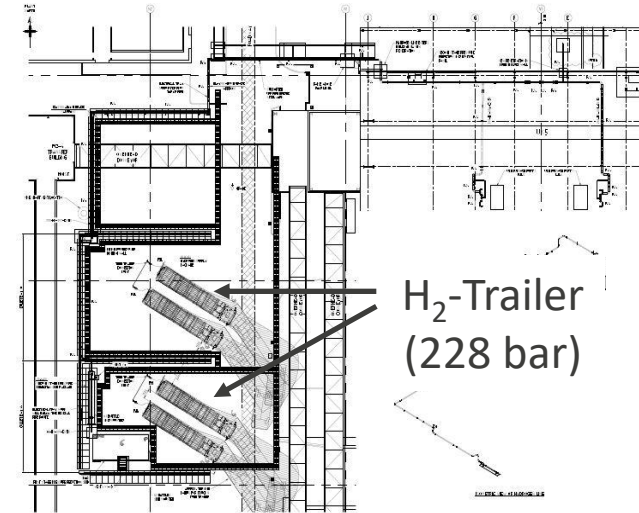
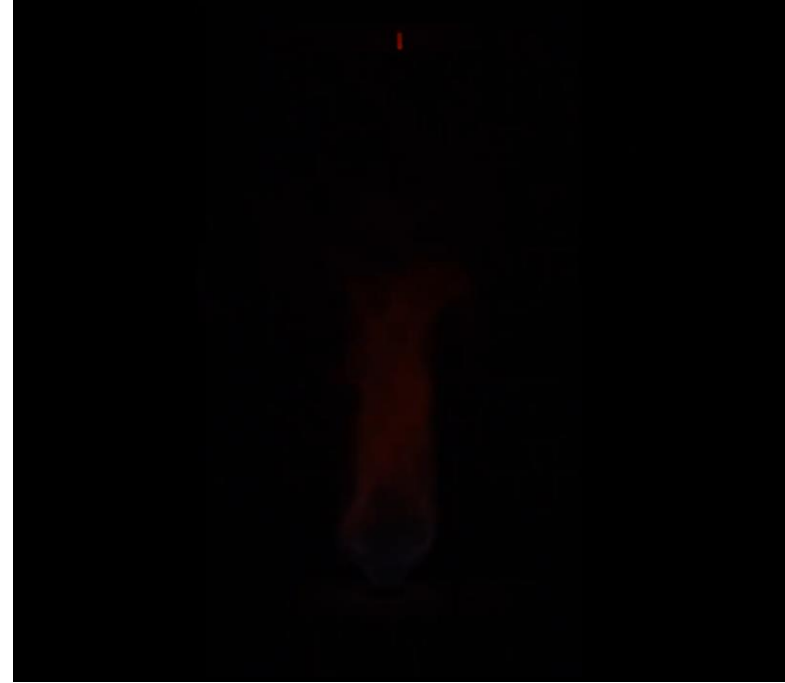


Image: NSG

*Keeley, A., Hydrogen Combustion on a Float Glass Furnace, ICG 2022, Berlin, Germany

Wasserstoff und seine Derivate: Ammoniak

- **Ammoniak** (NH_3) wird voraussichtlich eine wichtige Rolle im interkontinentalen Transport von H_2 spielen.
- NH_3 könnte auch eine interessante Option für Industriestandorte sein, die **nicht am Kernnetz** liegen
- NH_3 als Brennstoff ist herausfordernd
 - **Flammenstabilisierung**
 - **NO_x -Emissionen**
 - **Toxisch und korrosiv.**
- Weltweit sind F&E Experimente bis hin zum großtechnischen Einsatz im Gange, jedoch überwiegend zur Stromerzeugung und meist auch nur für die Mitverbrennung



Experimente mit NH_3/H_2
Flammen am GWI im Labormaßstab [12]

Zusammenfassung und Ausblick

- Angesichts der **hochspezialisierten Anforderungen** an die Prozesswärme in den jeweiligen Industrien müssen spezifische Lösungen für die Dekarbonisierung entwickelt und angepasst werden.
- Es gibt keine Standard-Antwort, aber **Elektrifizierung** und **Wasserstoff** werden voraussichtlich eine große Rolle spielen.
- Es gibt **viele F&E-Aktivitäten**.
- **Technologische Lösungen** sind bereits verfügbar oder werden derzeit entwickelt, aber großtechnische Erfahrungen sind jedoch noch rar.
 - Die **Industrie** ist in der Regel **risikoscheu**, insbesondere wenn es um neue, potenziell disruptive Technologien geht: „The desperate race to be second“ (J. Ancheyta, [8]).
 - Energieintensive Industrien sind **abhängig von** zukünftiger dekarbonisierter **Energieinfrastrukturen**



*

* Oscillating NH_3 combustion in GWI's semi-industrial test rig
GWI/KIT Project AmOszi (IGF-No. 21858 N, 2023)

Die Frage wird nicht sein, ob wir Brennstoffe immer noch einsetzen werden, sondern welche Brennstoffe es sein werden.

Referenzen

- [1] European Commission: Directorate-General for Research and Innovation, Scaling up innovative technologies for climate neutrality – Mapping of EU demonstration projects in energy-intensive industries, Publications Office of the European Union, 2023, <https://data.europa.eu/doi/10.2777/926968>
- [2] AG Energiebilanzen e.V.: Auswertungstabelle zur Energiebilanz Deutschland, Stand Juni 2025 <https://ag-energiebilanzen.de/daten-und-fakten/auswertungstabellen/>
- [3] Fraunhofer ISI: Erstellung von Anwendungsbilanzen für die Jahre 2021 bis 2023, 24.3.2025, https://ag-energiebilanzen.de/wp-content/uploads/2024/11/Anwendungsbilanz_Industrie_2023_final_20250324.pdf
- [4] Gruber, A., Biedermann, F., von Roon, S., “Industrielles Power-to-Heat Potenzial”, 9. Internationale Energiewirtschaftstagung an der TU Wien, Vienna, Austria, 2015
- [5] IRENA (2022), Green hydrogen for industry: A guide to policy making, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. https://h2.pe/uploads/IRENA_Green_Hydrogen_Industry_2022_-1.pdf
- [6] Pfeifer, H., Schwotzer, C., Echthor, T., „Hybrid beheizte Öfen als Beitrag zur Energiewende“, Prozesswärme, Nr. 04, S. 71–81, 2019
- [7] Quelle: https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/greenhouse-gas-emission-intensity-of-1?utm_source=chatgpt.com&activeAccordion=309c5ef9-de09-4759-bc02-802370dfa366
- [8] <https://ec.europa.eu/eurostat/cache/visualisations/energy-prices/enprices.html>
- [9] Fleiter, T., al-Dabbas, K., Clement, A., Rehfeldt, M., METIS 3 - Study S5: The impact of industry transition on a CO2-neutral European energy system, Fraunhofer ISI, 2023
- [10] Decarbonizing industrial process heat: the role of biomass, International Energy Agency, Paris, France, 2022
- [11] Gitzinger, H.-P. et al., Veränderungen durch Wasserstoff beim Betrieb von Rekuperator-, Impuls- und Flachflammenbrennern, Prozesswärme, No. 01, pp. 40-45, 2022
- [12] Biebl, M., Leicher, J., Giese, A., Görner, K., Experimental investigations of the combustion of ammonia for decarbonized process heat, 14th European Conference on Industrial Furnaces and Boilers, Algarve, Portugal, 2024
- [13] Ancheyta, J., The Handicap of New Technologies: Nobody Wants to Be the First for Commercial Application, processes, Vol. 12, Issue 3, 2024, doi: 10.3390/pr12030467
- [14] Vorlesung “Energieintensive Industrien im Wandel”, Universität Duisburg-Essen, Sommersemester 2025

Die Zukunft der Thermoprozesstechnik: Erneuerbare Gase vs. Strom

Keynote

Deutscher Flammentag 2025

Prof. Dr.-Ing. Christoph Wieland, Dr.-Ing. Jörg Leicher, Dr.-Ing. Anne Giese