



Dekarbonisierte Prozesswärme in der Ziegelindustrie

Rigo Giese; Eckhard Rimpel

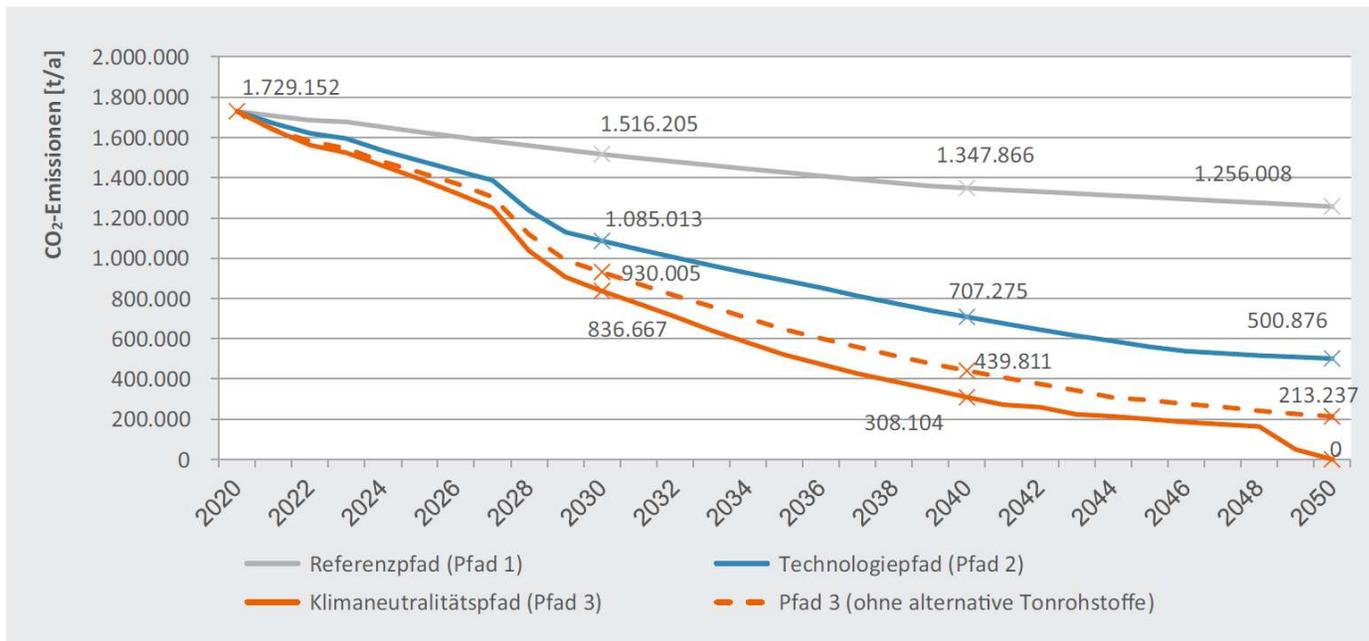
Institut für Ziegelforschung Essen e. V.
Am Zehnthof 197
45307 Essen

Feuerfest-Symposium 26.-27.04.2022; Freiberg

Dekarbonisierte Prozesswärme

Wege zur Senkung der CO₂-Emissionen

- Prozesseffizienz erhöhen → Senkung Brennstoffbedarf
- Brennstoffe mit niedrigem CO₂-Footprint (Erdgas-Biogas Mischung)
- Prozesse auf regenerative Gase umstellen → Biogas/-methan; grüner Wasserstoff
- Elektrifizierung → nur sinnvoll aus erneuerbaren Quellen

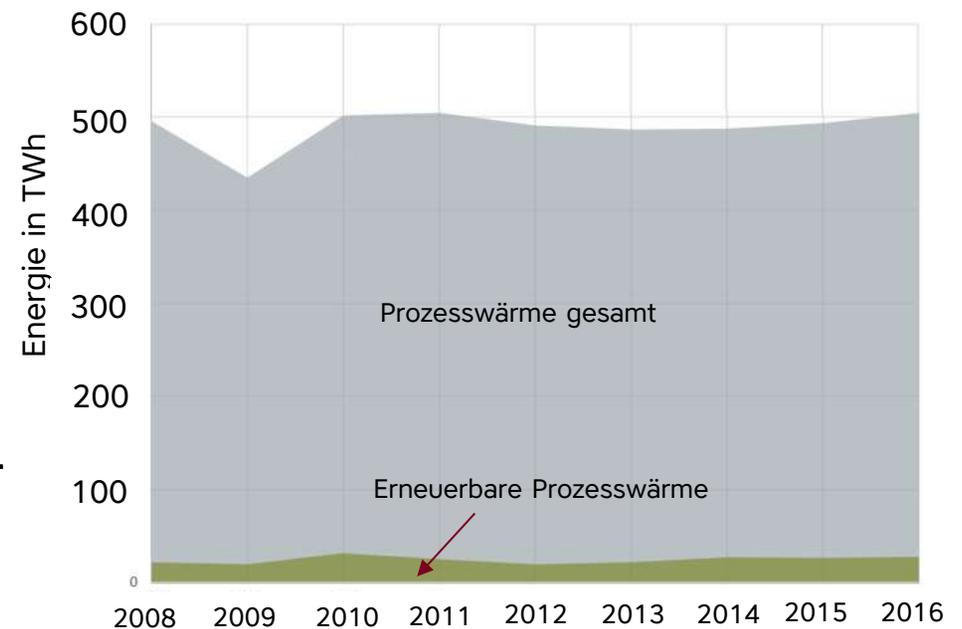


Quelle: Roadmap für eine treibhausgasneutrale Ziegelindustrie in Deutschland, 2021

Dekarbonisierte Prozesswärme

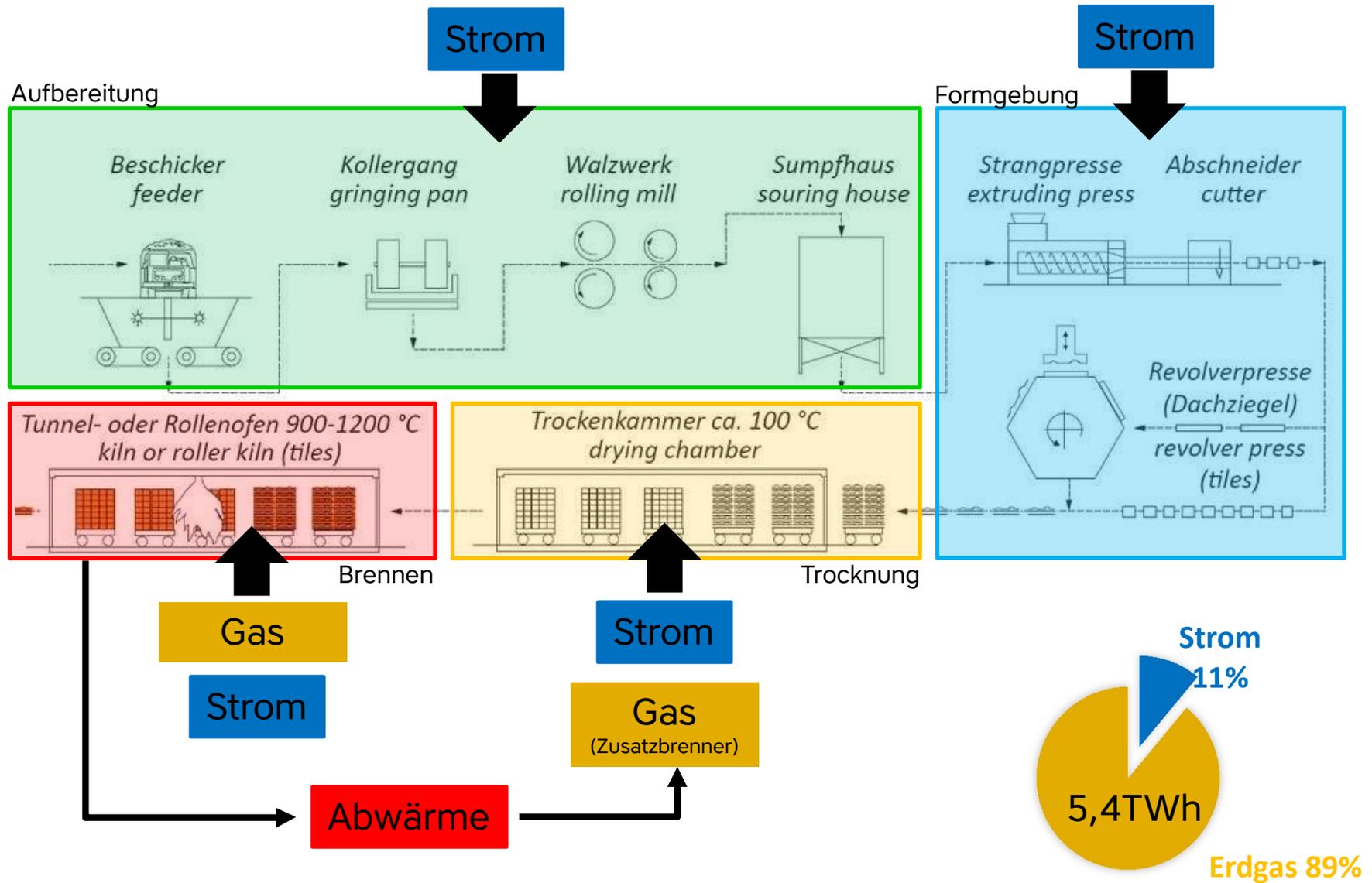
- In Deutschland benötigte die Industrie ca. **28 %** des Endenergiebedarfes und verursachte ca. **23 %** der THG-Emissionen;
- Die **Prozesswärme** spielt eine zentrale Rolle in der Industrie;
- Bisher ist der Einsatz **Erneuerbarer Energien** in diesem Bereich kaum vollzogen.

Prozesswärme und erneuerbarer Anteil in Industrie und Gewerbe



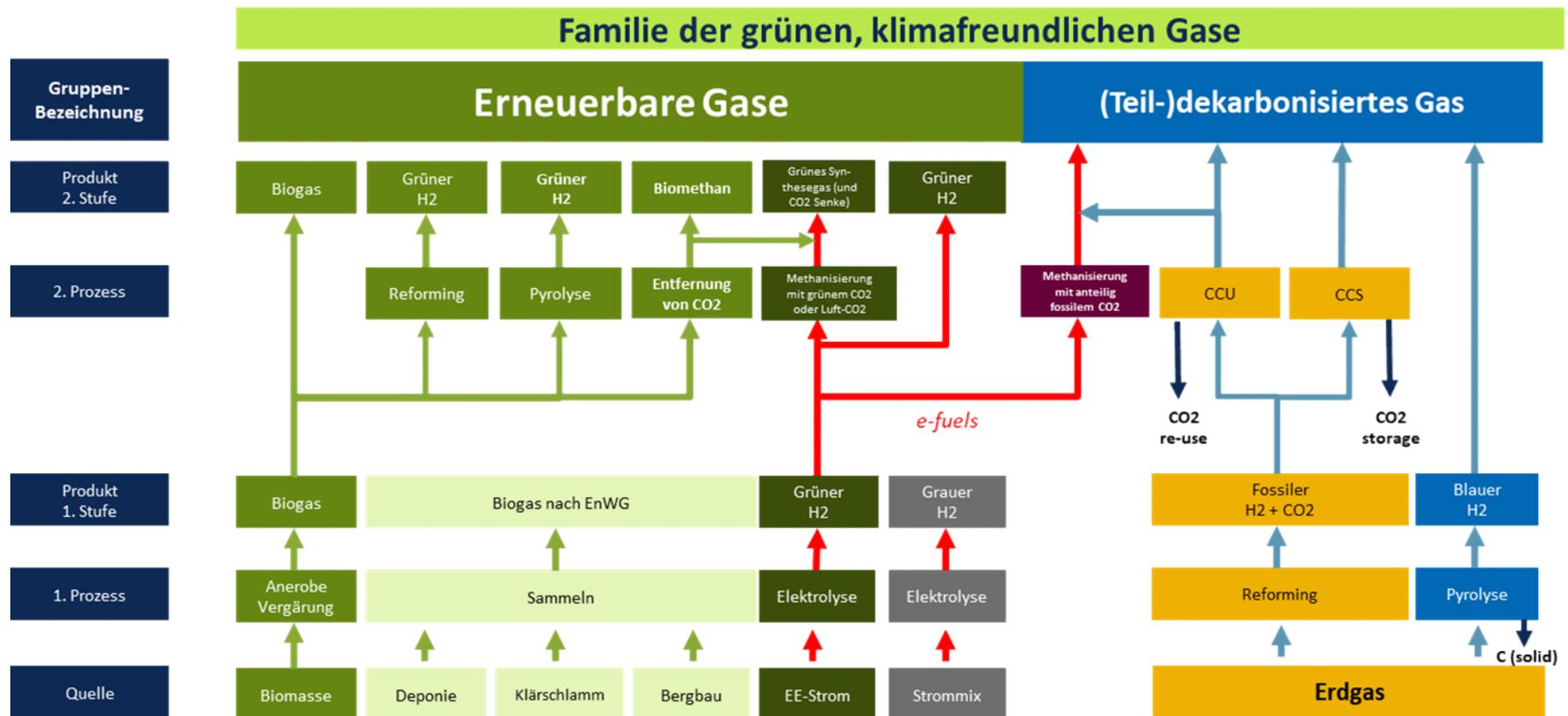
Quelle: BMWi, 2018

Energiebedarf Ziegelindustrie



*Quelle: Roadmap für eine treibhausgasneutrale Ziegelindustrie in Deutschland, 2021

Klimafreundliche Gase

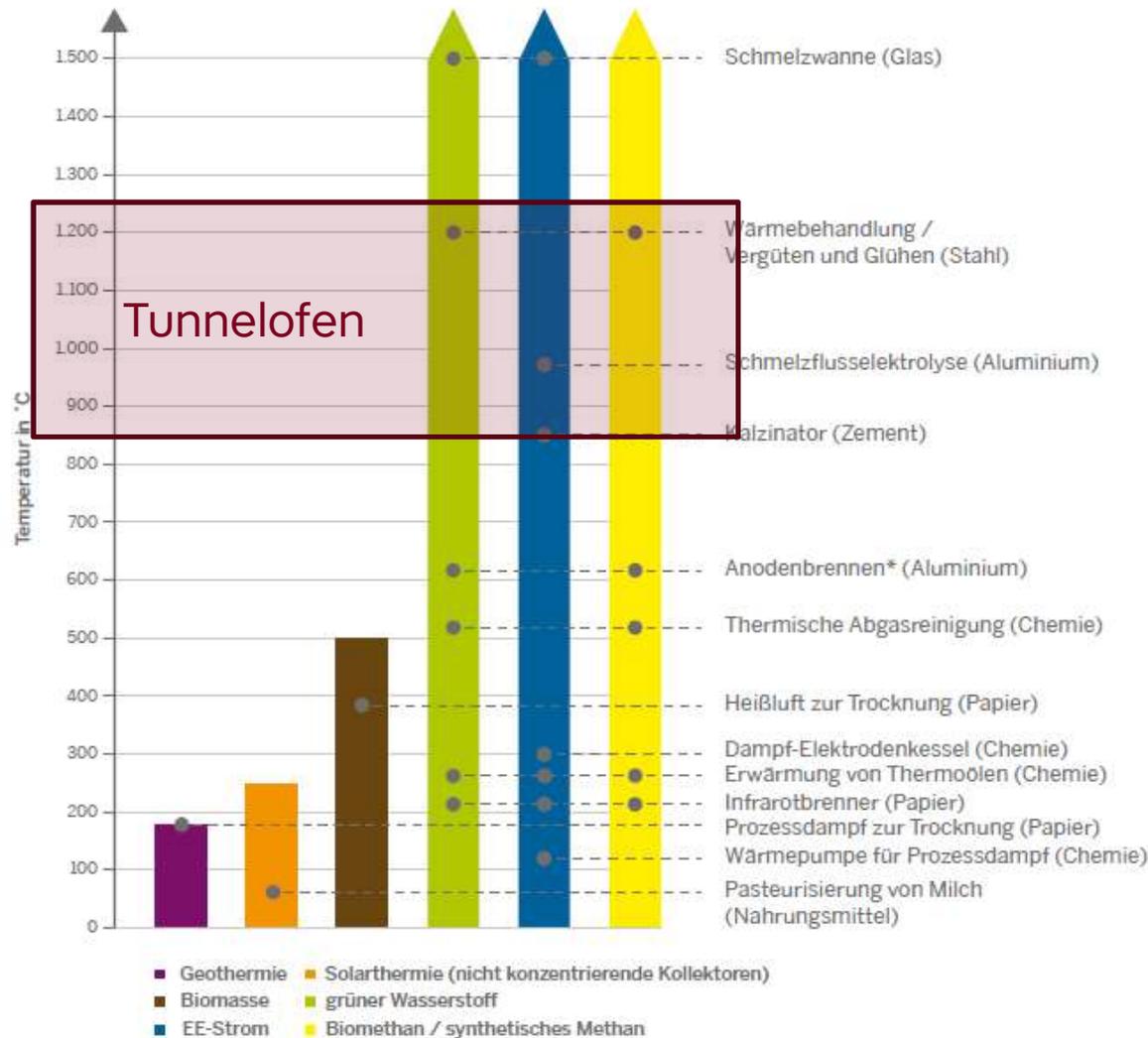


■ Biogas und Biomethan (erzeugt aus Vergasung und anschließender Methanisierung).

■ Power-to-Gas → Wasserstoff und Grünes Synthesegas

Quelle: DVGW, 2020

Einsatzgrenzen regenerativer Energieträger



* Die Umstellung auf THG-arme Energieträger für das Anodenbrennen stellt eine Übergangstechnologie dar. Perspektivisch wird dieser Prozessschritt entfallen und in der Aluminiumindustrie auf inerte Anoden umgestellt werden.

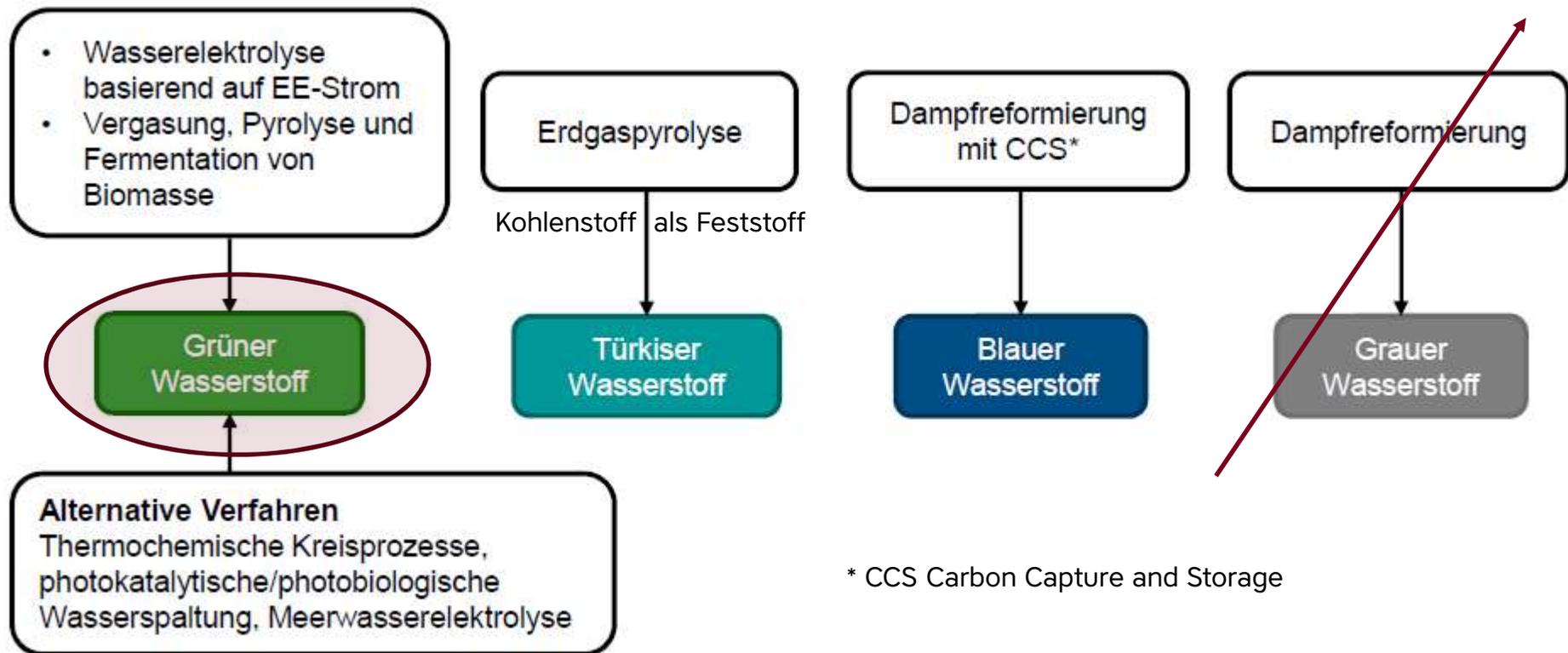
Grüner Wasserstoff

**Biogas / Biomethan /
synthetisches Methan
(SNG) /Synthesegas**

**Strom aus
erneuerbaren Energien
(EE-Strom)**

Quelle: IN4climate.NRW (Hrsg.) 2021: Industriewärme klimaneutral: Strategien und Voraussetzungen für die Transformation. Ein Diskussionspapier der Arbeitsgruppe Wärme, Gelsenkirchen

Wasserstoffherstellungsverfahren



Wasserstoff als Hauptquelle für die Dekarbonisierung!

Quelle: Bär, K.: H2-Erzeugungsverfahren im Vergleich; Wasserstoffwochen DVGW 2021

Eigenschaften Wasserstoff

Brennstoff			Erdgas (CH ₄)	Wasserstoff (H ₂)	Verhältnis H ₂ /CH ₄
Heizwert	Hu	MJ/m ³	35,89	10,79	0,3
Luftbedarf	VL min	m ³ /m ³	9,524	2,381	0,25
Dichte	ρ	kg/m ³	0,717	0,089	0,13
Wobbe-Index	Ws	MJ/m ³	53,37	48,24	0,9
Untere Zündgrenze	UEG	Vol.-%	5	4	0,8
Obere Zündgrenze	OEG	Vol.-%	15	74	4,95
Zündtemperatur in Luft	T	°C	645	530	0,82

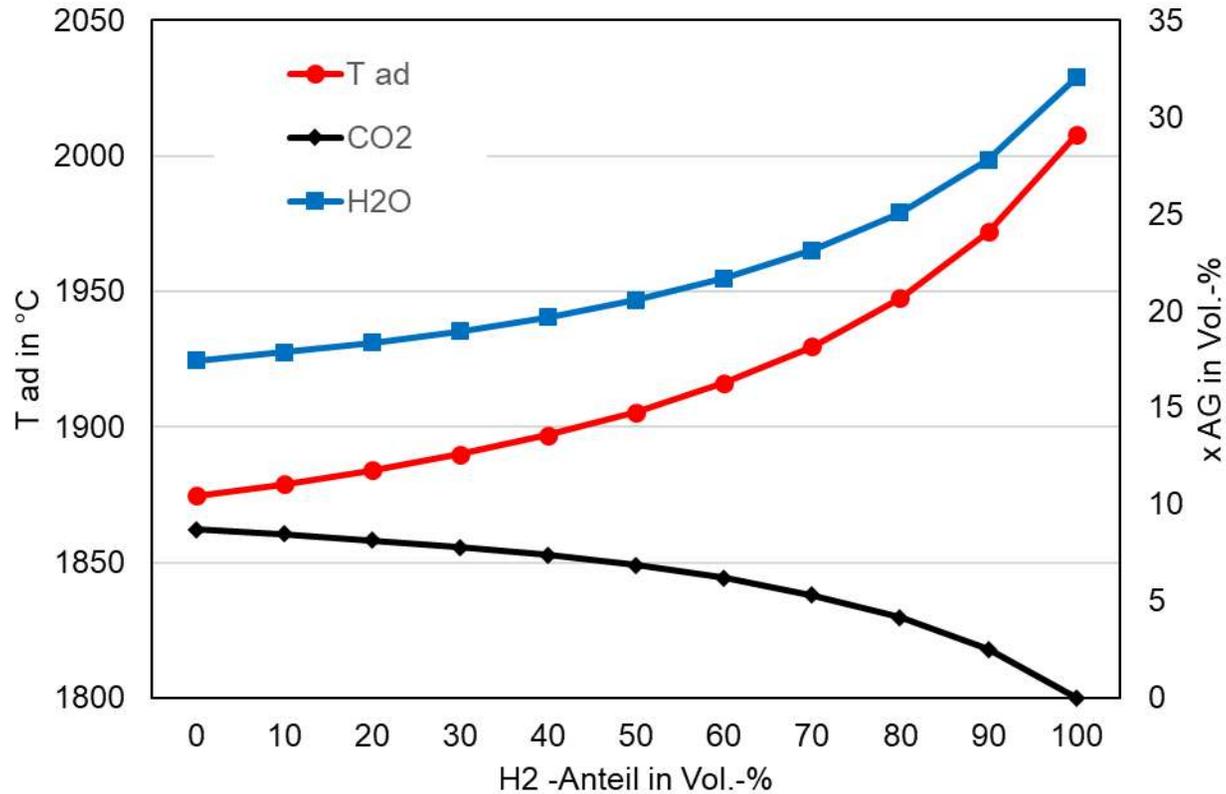
Eigenschaften Wasserstoff

Brennstoff		Erdgas (CH ₄)	Wasserstoff (H ₂)
Zündverzugszeit	ms	46,16	0,046
Mindest Zündenergie	mJ	0,29	0,017
Laminare Flammengeschwindigkeit	cm/s	38,39	200

- höhere Diffusionsfähigkeit; geringere Dichte; geringerer Heizwert
- größere Brennstoffströme bei gleicher Heizleistung (kW)
- Leicht entzündbar

CH₄-H₂ Mischung

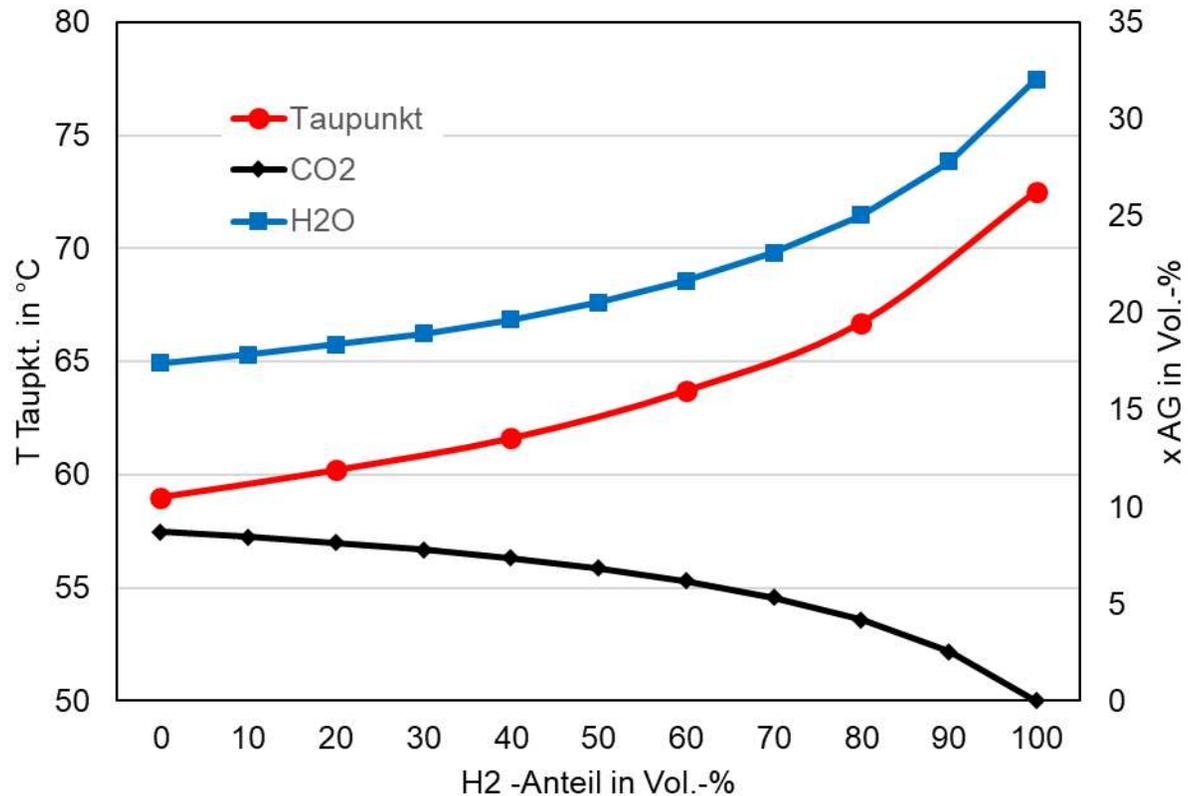
Adiabate Flammentemperatur und Abgaszusammensetzung ($\lambda=1,1$)



Änderung der verbrennungstechnischen und
wärmeübertragenden Eigenschaften

CH₄-H₂ Mischung

■ Taupunkttemperatur und Abgaszusammensetzung



Änderung der Taupunkttemperatur

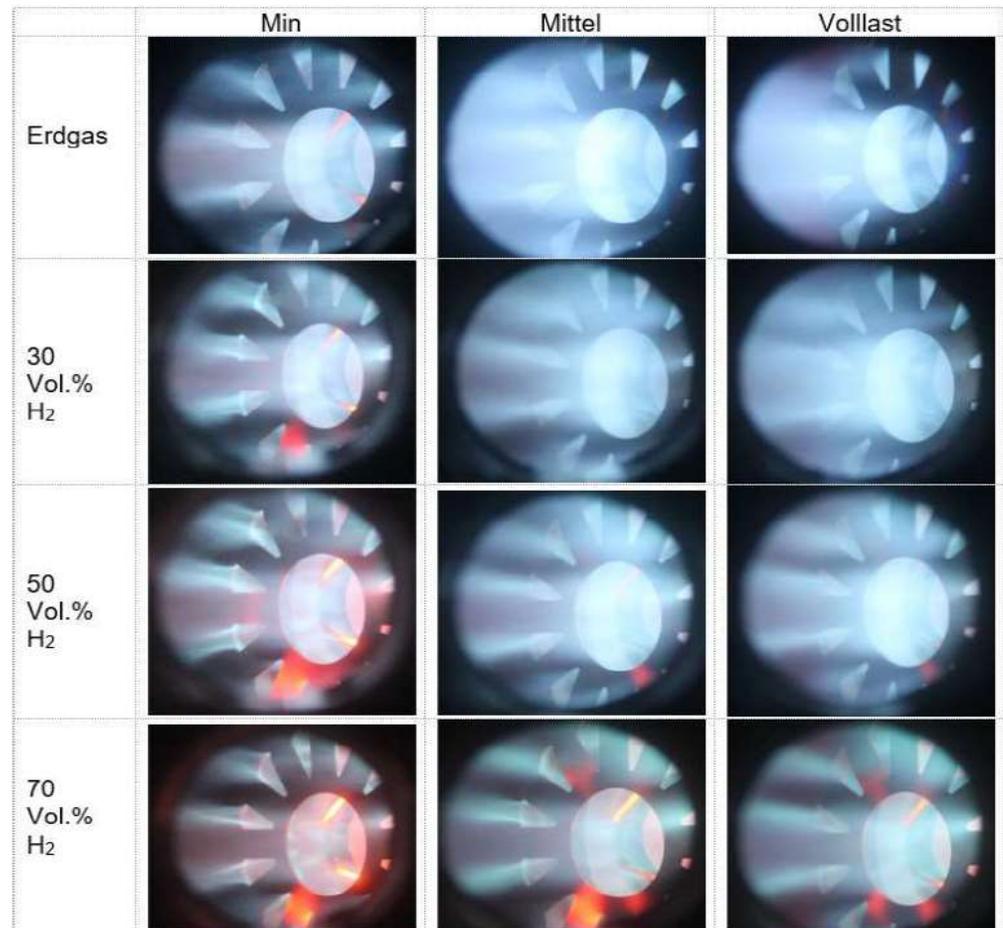


Anpassung nachfolgender Anlagenteile ist zu prüfen

CH₄-H₂ Mischung

Einfluss auf die Feuerungstechnik

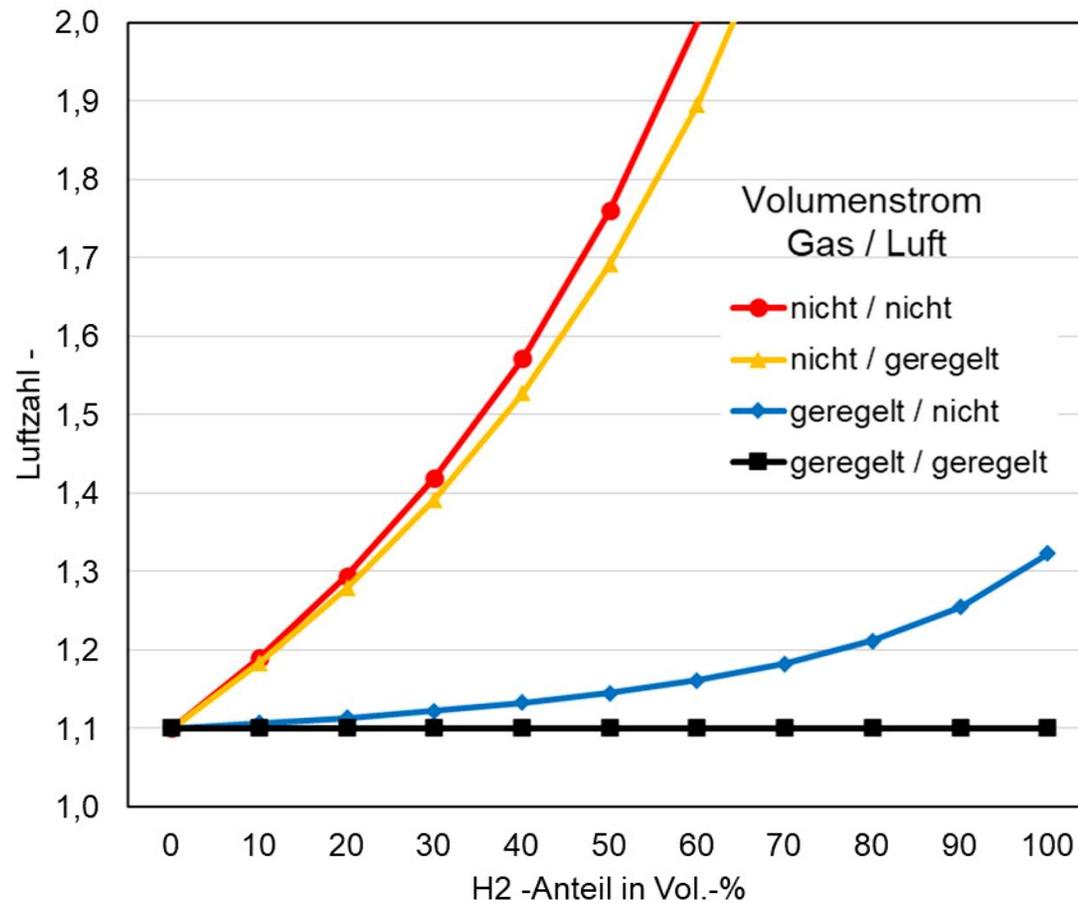
- Zunehmende thermische Belastung bei steigendem H₂-Anteil;
- Flammenform und sichtbarer Bereich ändern sich;
- Anpassung Gasvordruck bzw. Gasdüse aufgrund steigender Gasmenge bei konst. Leistung erforderlich
(100 % H₂ ~ 3-facher Volumenstrom!)



Quelle: Dreizler, D., „Auswirkung von Wasserstoffbeimischung im Erdgas auf Gebläse brenner“, 6. Forum Feuerungstechnik, Munich, Germany, 2019

CH₄-H₂ Mischung

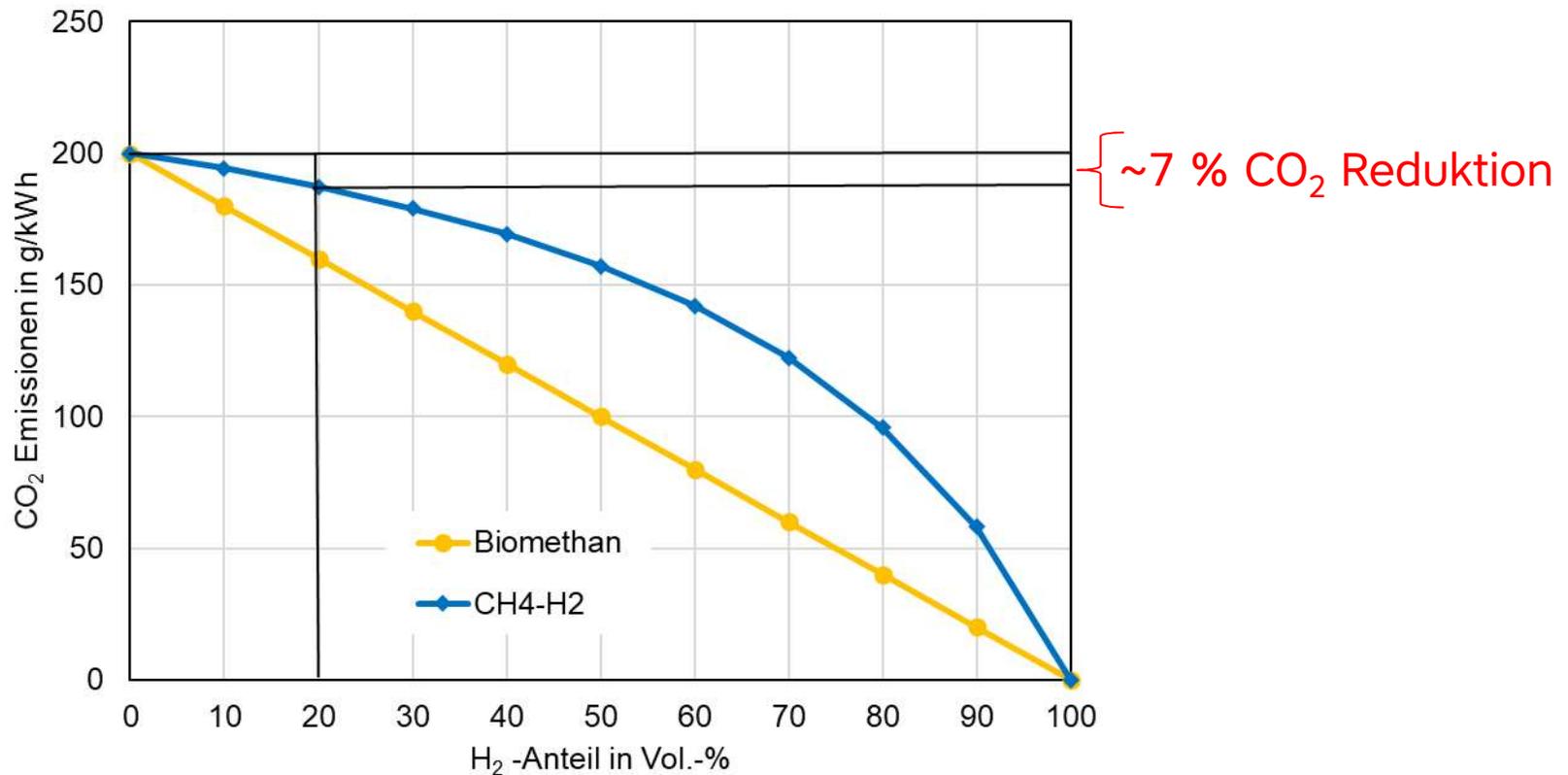
In der Regel: Gas-Luft-Verhältnisregelung!



Regelung ist anzupassen!

CH₄-H₂ Mischung

Reduzierung CO₂-Emission pro kWh

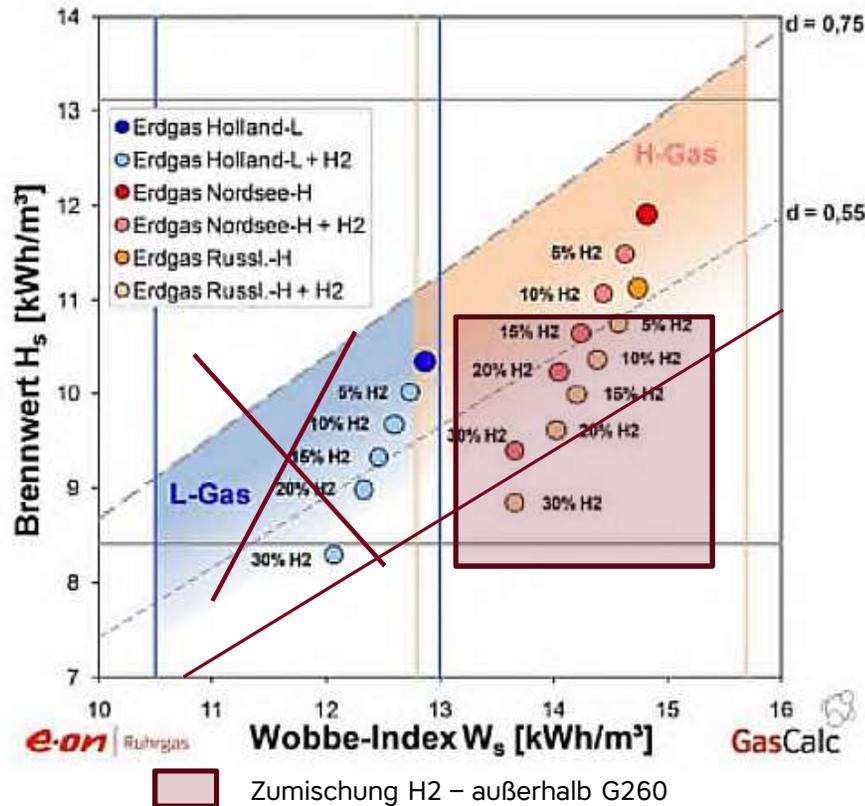


Zumischung von H₂ bietet in Bezug auf die G260 nur begrenzte CO₂-Reduktion

Ziel: 100 % Wasserstoffverbrennung → **Verfügbarkeit?**

DVGW G260

- Gasbeschaffenheit ist für die effiziente Steuerung und Regelung der Brenner wesentlich – G260 legt den Rahmen fest;
- Einspeisungen bis zu 10 Vol.% H₂ sind derzeit abgedeckt;
- Überarbeitung für den Bereich bis ca. 20 Vol.-%, darüber hinaus wird es derzeit keine Zumischung ins Gasnetz geben!



2. Gasfamilie wurde erweitert auf H₂-Zumischungen

Mögliche Wasserstoffgehalte im Erdgas sind von verschiedenen Aspekten abhängig, z.B. der Einhaltung der Grenze der relativen **Dichte 0,45**, Einschränkungen der bestehenden Gasinfrastruktur, der genutzten Materialien, der eingesetzten Messverfahren oder der zulässigen Änderungsgeschwindigkeit der möglichen H₂-Konzentrationen

„... Aktuell kann deshalb kein einheitlicher Grenzwert für eine Zumischung von Wasserstoff in die Gasinfrastruktur festgelegt werden. ...“

DVGW G260 Stand 09/2021

Wasserstoffbedarf

■ Aktuell in Deutschland rd. 67 TWh/a (UBA)

davon:

- 95 % aus fossilen Quellen (Dampfreformierung)
- 5 % als Nebenprodukt der Chlor-Alkali-Elektrolyse
- nahezu keine Produktion aus erneuerbaren Quellen

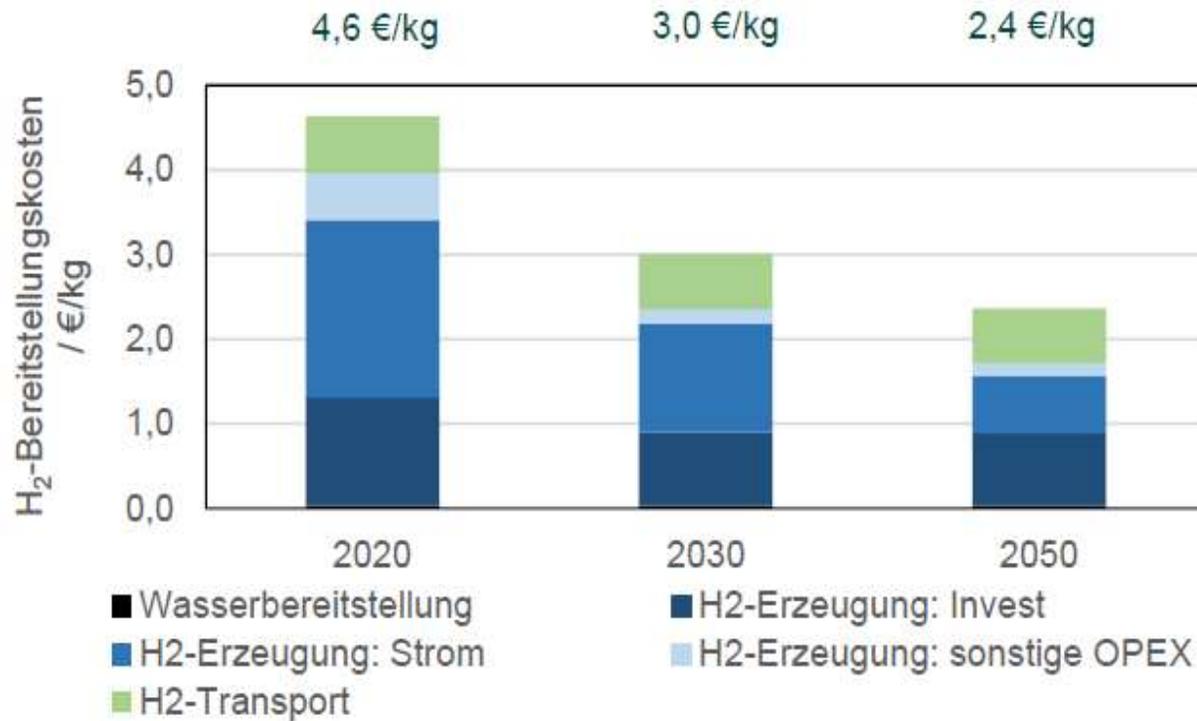
■ 2030: 90 - 110 TWh (Schätzungen der Bundesregierung)

■ 2050: 100 - 650 TWh (LBST 2019) abhängig von der Entwicklung potentieller Einsatzfelder



Importe bei weltweit steigender Nachfrage erforderlich!

Kosten H₂ aus Elektrolyse in MENA



Erdgas Mittel (Stand 19.04.22)
 Terminmarkt ~ 64 €/MWh
 Spotmarkt ~ 101 €/MWh

Wasserstoff
 2020 ~ 140 €/MWh
 2050 ~ 60 €/MWh

- Kosten für Wasseraufbereitung vernachlässigbar
- CAPEX für Elektrolyse sinkt von 619€/kW (2020) auf 414 €/kW (2050)
- H₂-Bereitstellungskosten sinken bis 2050 um ca. 50 %

Quelle: Bär, K.: H₂-Erzeugungsverfahren im Vergleich; Wasserstoffwochen DVGW 2021

Transportmöglichkeiten von Wasserstoff

- Gasförmiger Wasserstoff ist hoch flüchtig, leicht entzündbar; Rohrleitungen müssen inkl. der Regelapparaturen und Dichtungen H₂-beständig sein, Speicherfähigkeit gering;
- Wasserstoff, benötigt aufgrund seines geringen volumetrischen Heizwertes, einen hohen technischen und energetischen Aufwand für die Verflüssigung zum Transport bei guter Speicherfähigkeit
(36 kJ/g sind erforderlich, um Wasserstoff auf eine Temperatur von -253°C zu kühlen und damit zu verflüssigen);
- Alternativ LOHC-Technologie (Liquid Organic Hydrogen Carrier) z. B. an Dibenzoltoluol, LOHC-Träger kann beliebig mit H₂ be- und entladen werden; Nachteil: Rücktransport der LOHC-Träger zur H₂ „Quelle“;



- Oder: NH₃ Ammoniak lässt sich bei -33 °C unter Normdruck oder bei 20 °C und 9 bar verflüssigen und ist damit leicht transport- und speicherfähig.

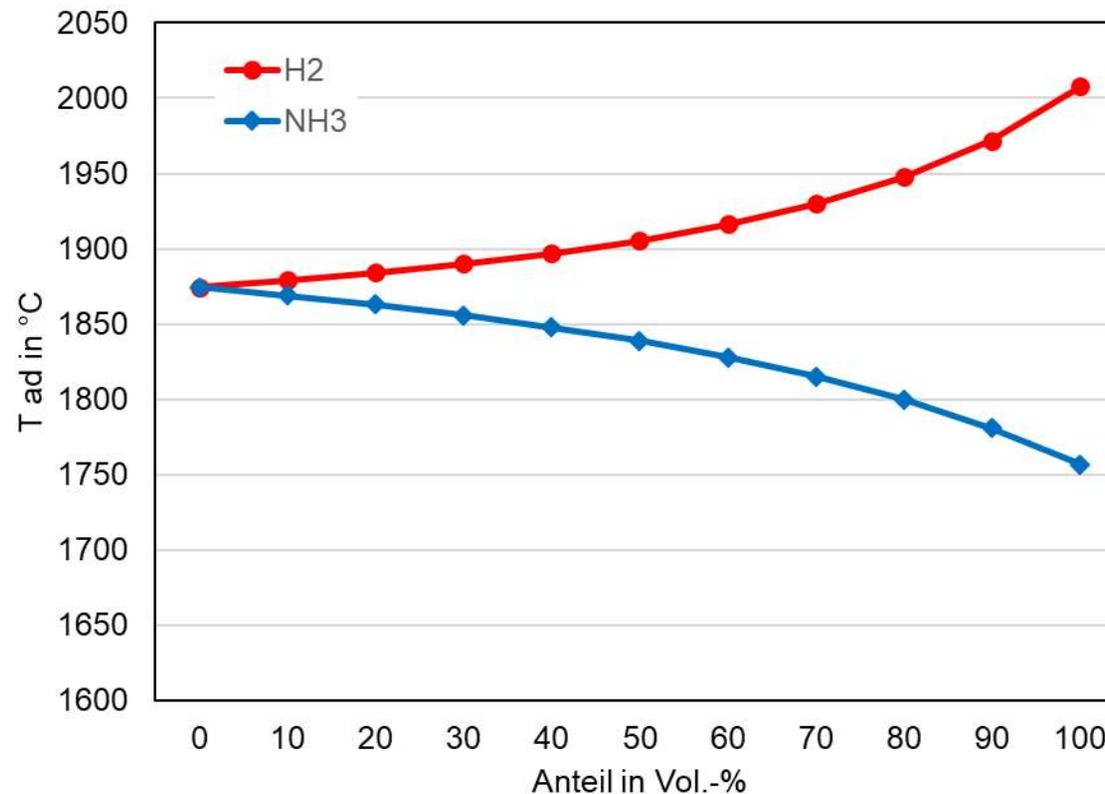


Direkt zur Feuerung nutzbar?!

Verbrennungstechnische Eigenschaften im Vergleich

Brennstoff			Erdgas (CH ₄)	Wasserstoff (H ₂)	Ammoniak (NH ₃)
Heizwert	Hu	MJ/m ³	35,89	10,79	14,31
	Hu	MJ/kg	50,03	120,01	18,61
Luftbedarf	VL min	m ³ /m ³	9,524	2,381	3,571
Dichte	ρ	kg/m ³	0,717	0,089	0,769
Wobbe-Index	Ws	MJ/m ³	53,37	48,24	22,37
Untere Zündgrenze	UEG	Vol.-%	5	4	15
Obere Zündgrenze	OEG	Vol.-%	15	74	25
Zündtemperatur in Luft	T	°C	645	530	630

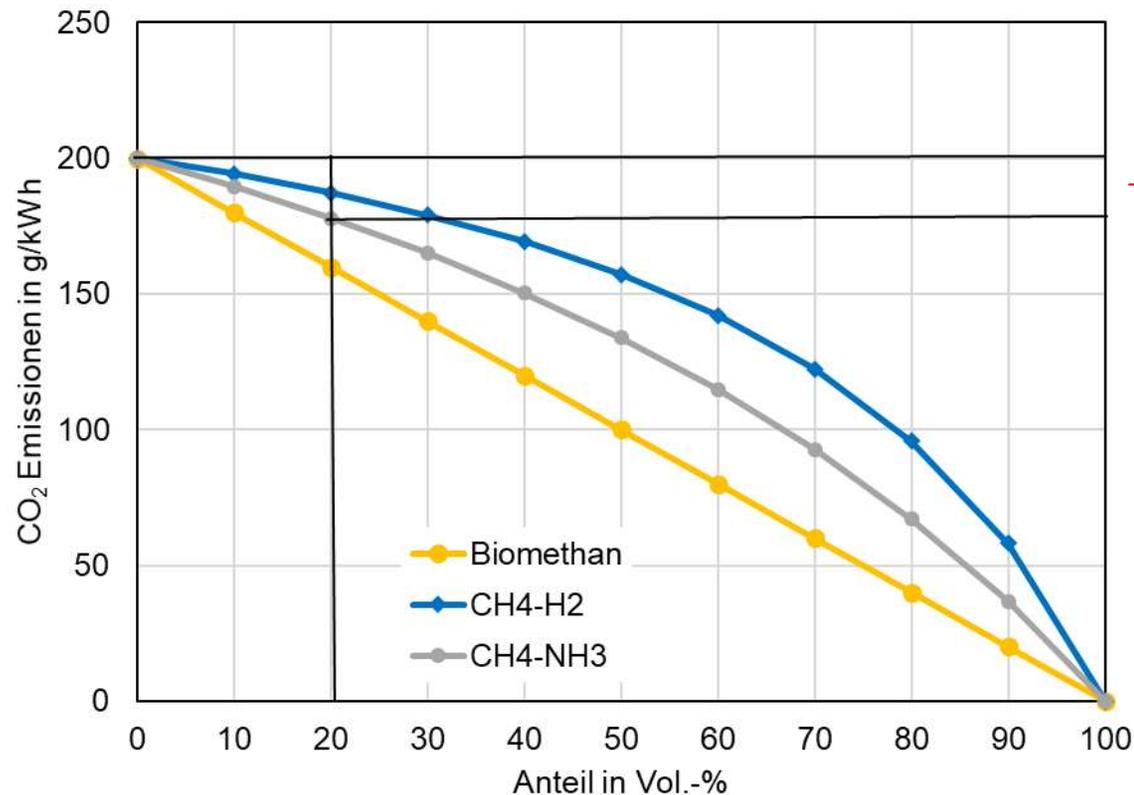
Verbrennungstechnische Eigenschaften im Vergleich



- Bei dezentraler Bereitstellung als **Alternative zum Wasserstoff** denkbar, da kein zusätzlicher Energiebedarf für Spaltung in H₂ und N₂ erforderlich, bei Import.

Verbrennungstechnische Eigenschaften im Vergleich

Reduzierung CO₂-Emission pro kWh



{ ~11 % CO₂ Reduktion

- NH₃ bietet höheres CO₂-Reduktionspotenzial;
- NO_x-Bildung und NH₃-Schlupf müssen feuerungstechnisch minimiert werden.
- Mischungen H₂ und NH₃ sinnvoll, je nach Verfügbarkeit!

Biogas / Biomethan

■ Biogas:

- mit **veränderten verbrennungstechnischen Eigenschaften**, wie z. B. geringerem Heizwert und geringerer adiabater Flammentemperatur;
- je nach Aufbereitungsstufe evtl. **zusätzl. Einbringung unerwünschter Begleitstoffe** (S, NH₃, ...);
- **schwankende Zusammensetzung**;
- **dezentral erzeugbar**.

■ Biomethan mit ähnlichen Eigenschaften wie Erdgas, daher einfacher Austausch, aber nur sinnvoll wenn Kohlenstoff für den Prozess erforderlich

→ hohe Kosten für die Erzeugung (Aufbereitung aus Biogas);



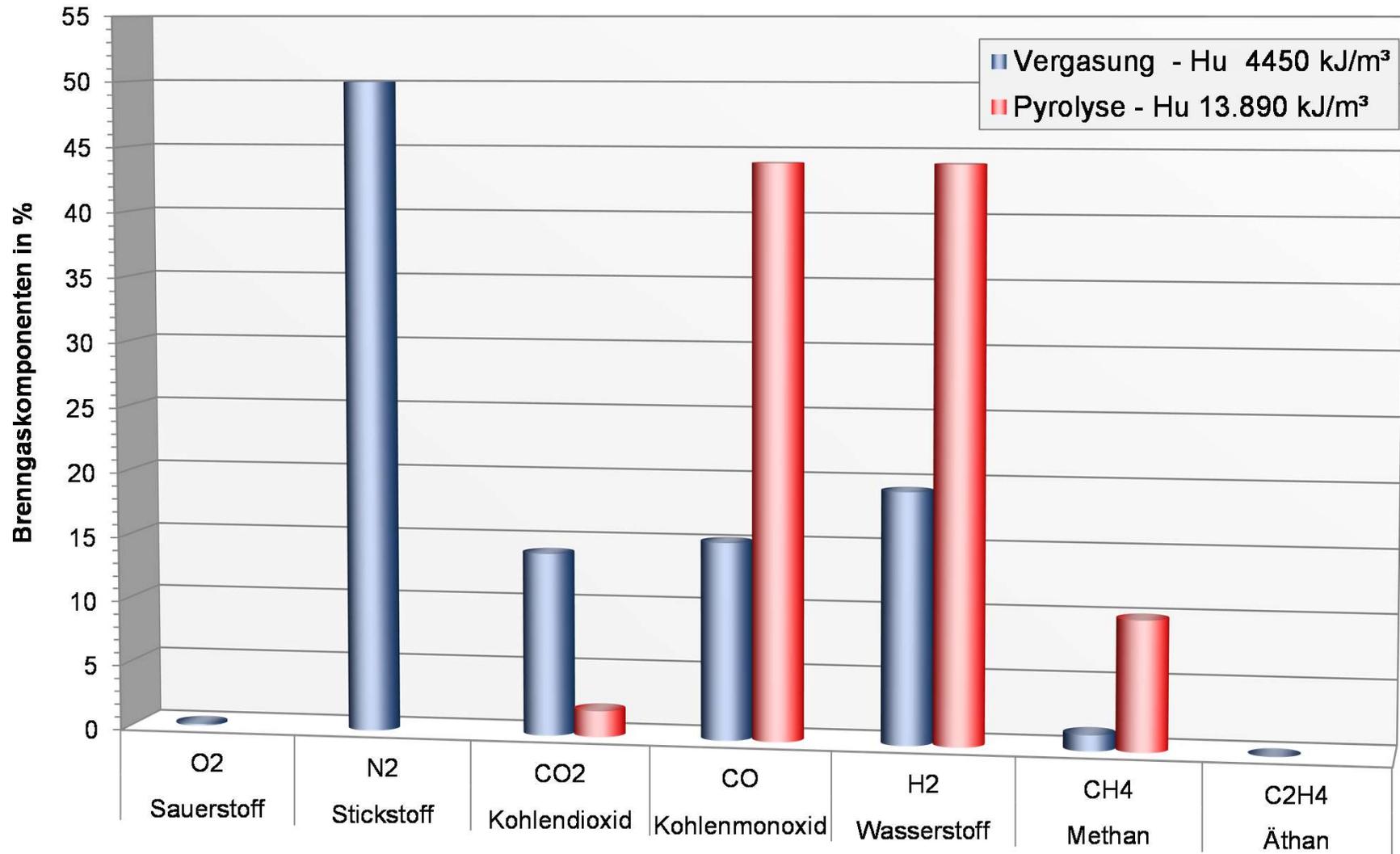
Einsatz individuell prüfen: Verfügbarkeit
Lieferketten
Lagerung

Synthesegas (biogen)

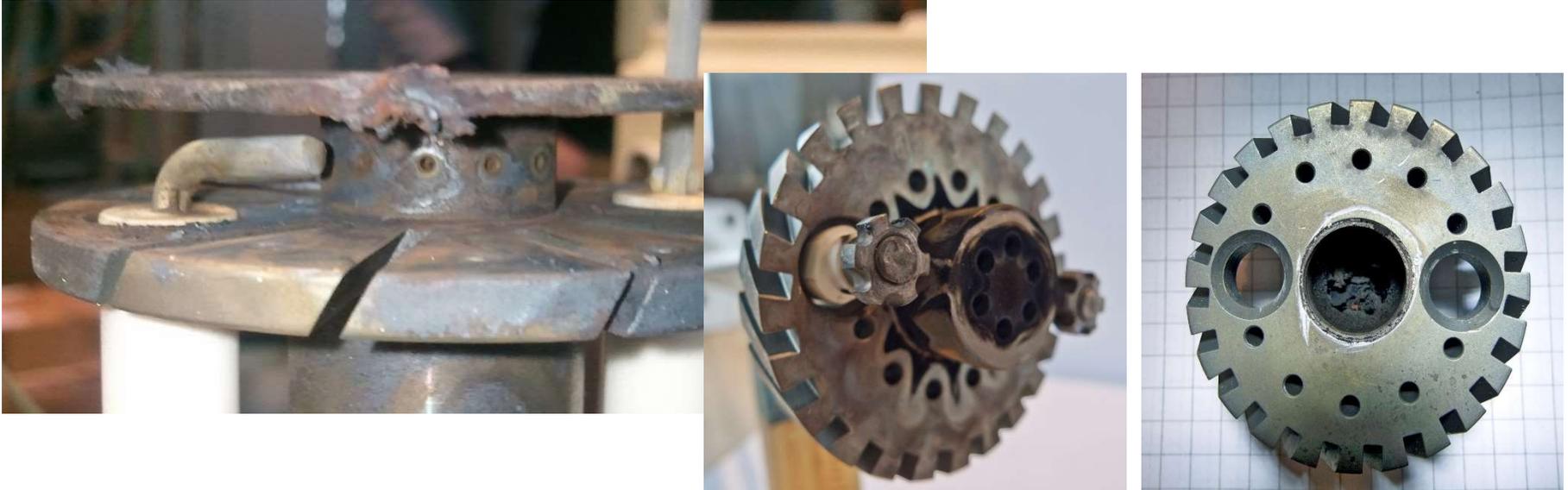
Einsatzstoffe



Synthesegas



Synthesegas (aus Pyrolyse)



- Bei Gaswechsel prinzipiell Prüfung des Einsatzes der Brennertechnik
- Auswirkungen auf den Prozess → das Produkt!



Keine Änderung der Eigenschaften im Produkt bei untersuchten Vormauerklinkern, Handform- und Hochlochziegeln

Zusammenfassung

- Die Dekarbonisierung der Prozesswärme kann nur durch den Einsatz von erneuerbaren Gasen erfolgen, vor allem in Prozessen, in welchen die Ofenatmosphäre mit entscheidend für die Produkteigenschaften ist.
- Eine vollständige Elektrifizierung von Tunnelöfen ist mit den bekannten Technologien und Ofenbauarten nicht zu erwarten, bei gleicher Produktionsleistung.
- Höherer Aufwand an die Steuerung und Regelung, da Gasbeschaffenschwankungen, aufgrund unterschiedlicher Gasquellen und Zumischungen, zu erwarten sind.
- Feuerungssysteme müssen entsprechend angepasst werden, da sich die verbrennungstechnischen Eigenschaften (Flammenlänge, Ausbrand, Strahlungseigenschaften,...) ändern!



Wasserstoff als Energieträger der Zukunft!

COAL CONSUMPTION AFFECT- ING CLIMATE.

The furnaces of the world are now burning about 2,000,000,000 tons of coal a year. When this is burned, uniting with oxygen, it adds about 7,000,000,000 tons of carbon dioxide to the atmosphere yearly. This tends to make the air a more effective blanket for the earth and to raise its temperature. The effect may be considerable in a few centuries.

Quelle: Rodney Times, Neuseeland, 1913

Ansprechpartner:

Name Dr.-Ing. Rigo Giese

Fon: +49 (0) 201 59 213 22

Fax: +49 (0) 201 59 213 20

E-Mail: giese@izf.de