



Experimentelle Untersuchungen zum Einsatz von H₂ in einem vorindustriellen Hochgeschwindigkeitsbrenner im Flammen- und flammlosen Betrieb

L. Sankowski, C. Wüning, H. Kaiser, N. Schmitz, H. Pfeifer

4. Aachener Ofenbau- und Thermoprozesskolloquium

17. - 18.10.2023

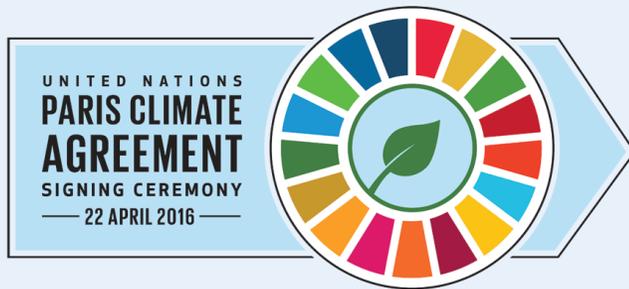
Aachen

Agenda

- Einleitung
- Stickoxidemissionen
- Prüfstand und experimenteller Aufbau
- Ergebnisse
- Zusammenfassung und Ausblick

Politische Rahmenbedingungen

2015/2016



- Erderwärmung $< 2\text{ °C}$
- Ziel: $< 1,5\text{ °C}$

2019



- Reduktion der GHG-Emissionen bis 2030 um 50% bis 55%*
- Klimaneutralität bis 2050

2021



Bundesministerium
für Umwelt, Naturschutz
und nukleare Sicherheit

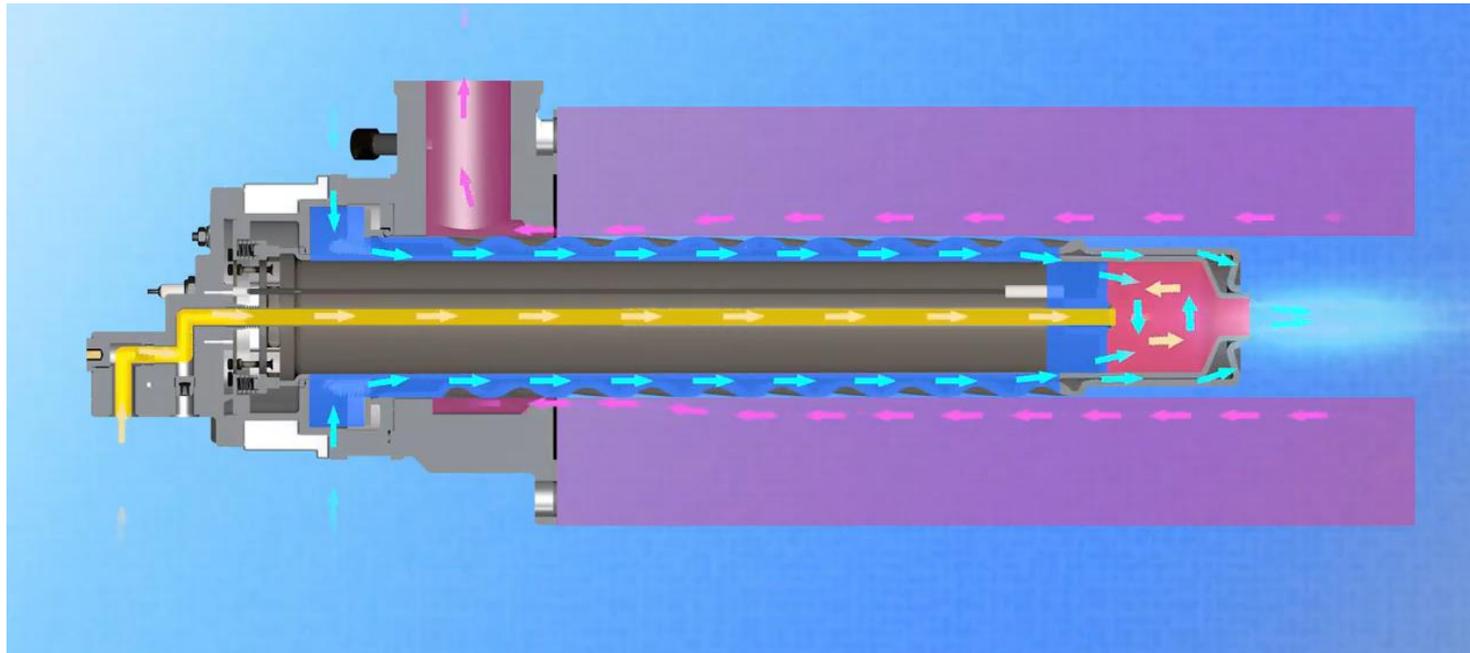
Klimapakt Deutschland

- Reduktion der GHG-Emissionen
 - um 65% bis 2030*
 - um 88% bis 2040*
- Klimaneutralität bis 2045

* Basis: 1990

Rekuperatorbrenner

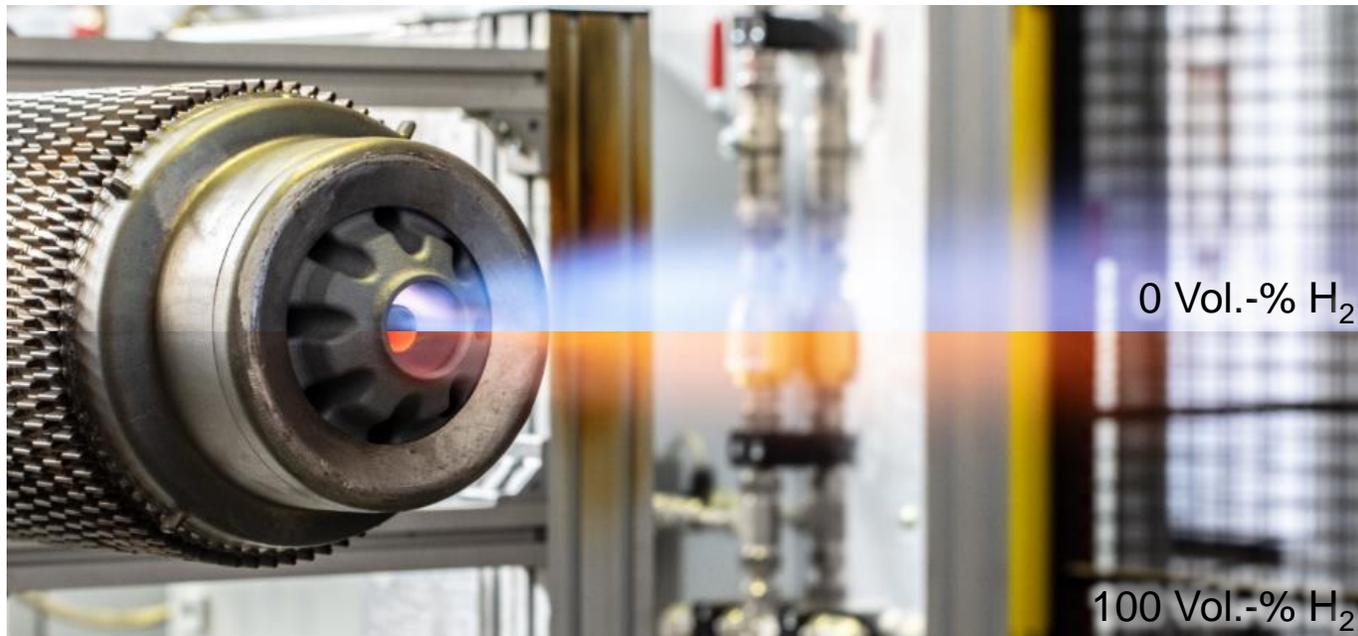
- Anwendungsbeispiele: Glühlinien (CAL/CGL), Wärmebehandlung, Härtereien etc.
- State-of-the-art: Beheizung mit Erdgas (NG)
- Integrierter Wärmetauscher zur Verbrennungsluftvorwärmung aus der Abgasenthalpie



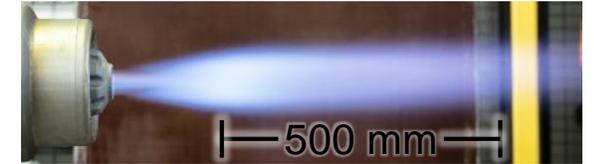
Quelle: Noxmat (2020)

Erste Freibrandversuche

- Kommerzieller Rekuperatorbrenner für Erdgas
- Überprüfung von Basisfunktionen und Flammenüberwachung mit steigendem Wasserstoffgehalt



0 Vol.-% H₂



45 Vol.-% H₂



65 Vol.-% H₂



70 Vol.-% H₂



93 Vol.-% H₂



100 Vol.-% H₂



Erdgas (Methan) vs. Wasserstoff

Eigenschaft	Einheit	Methan CH ₄	Wasserstoff H ₂
Heizwert	[kWh/m ³]	9,9	3,0
Brennwert	[kWh/m ³]	11,1	3,5
Unterer Wobbe-Index	[kWh/m ³]	13,4	11,4
Oberer Wobbe-Index	[kWh/m ³]	14,9	13,4
Normdichte	[kg/m ³]	0,7	0,1
Untere Zündgrenze (in Luft)	[Vol.-%]	5,0	4,0
Obere Zündgrenze (in Luft)	[Vol.-%]	15,0	74,2
Laminare Flammengeschwindigkeit ($\lambda = 1$)	[cm/s]	43,4	170,0
Adiab. Flammentemperatur (in Luft, $\lambda = 1$)	[°C]	1936,9	2126,9

Quelle: gwi (2013), Glassman (2007)

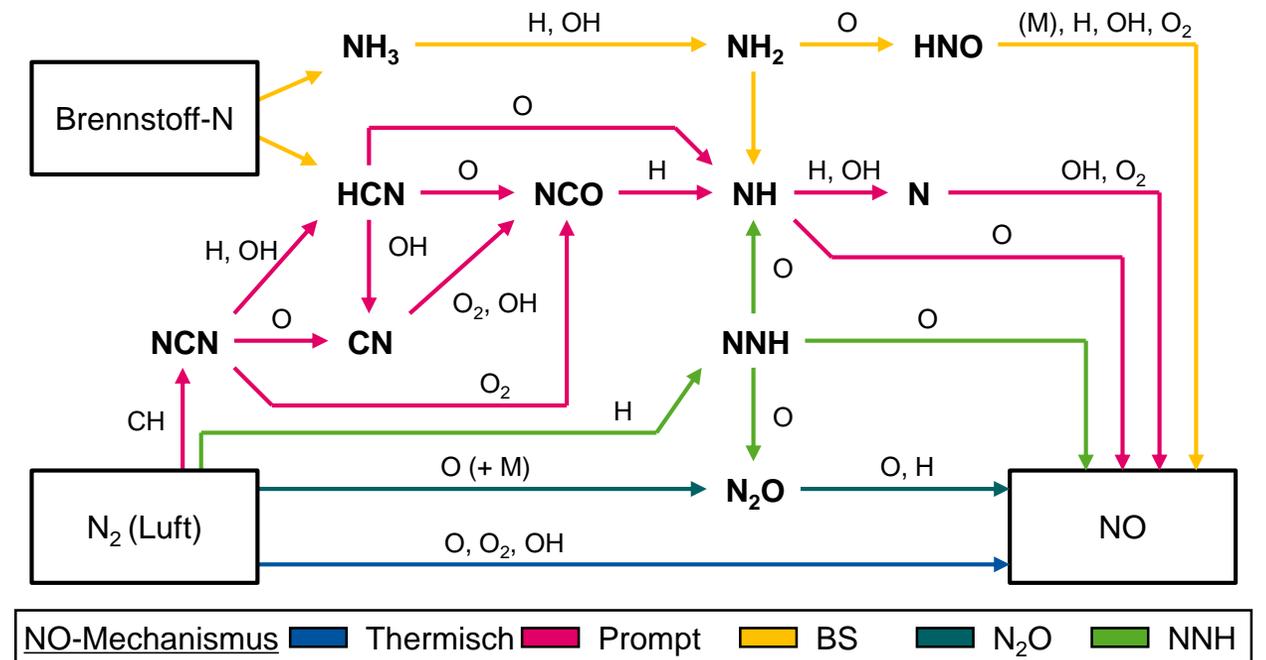
- (Signifikante) Unterschiede der physikalischen und chemischen Eigenschaften
- Verbrennung von H₂ führt aufgrund der erhöhten Flammentemperaturen zu höheren NO_x-Emissionen

➔ Untersuchung der bekannten Maßnahmen zur Reduzierung der NO_x-Emissionen für H₂ und NG-H₂-Mischungen

NO_x-Bildungsmechanismen

- Stickoxide (NO_x): hauptsächlich NO und NO₂
- NO-Bildungsmechanismen:
 - Thermisches NO (Zeldovich-NO)
 - Promptes NO (Fenimore-NO)
 - Brennstoff-NO
 - NO-Bildung über NNH-Radikale
 - NO-Bildung über N₂O

➔ NO-Bildung basiert hauptsächlich auf Reaktionen von Stickstoff aus der Verbrennungsluft



Quelle: Mendiara and Glarborg (2009), Iavarone et al. (2019), Kobayashi et al. (2019)

Maßnahmen zur Reduzierung der NO_x-Emissionen

- Primärmaßnahmen: Veränderung von Verbrennungsregelung und Brennerdesign
- Sekundärmaßnahmen: Anwendung von zusätzlichen Spezies zur Reduzierung von bereits gebildetem NO_x

Geschwindigkeitsgesetz

$$\Delta x_{NO} = p \cdot \frac{2 \cdot k(T)}{R \cdot T} \cdot x_{N_2} \cdot x_O \cdot \Delta t$$

Geschwindigkeitskonstante

$$k(T) = 1.8 \cdot 10^{14} \cdot \exp\left(\frac{-318 \text{ kJ/mol}}{R \cdot T}\right) \text{ in } \frac{\text{cm}^3}{\text{mol} \cdot \text{s}}$$

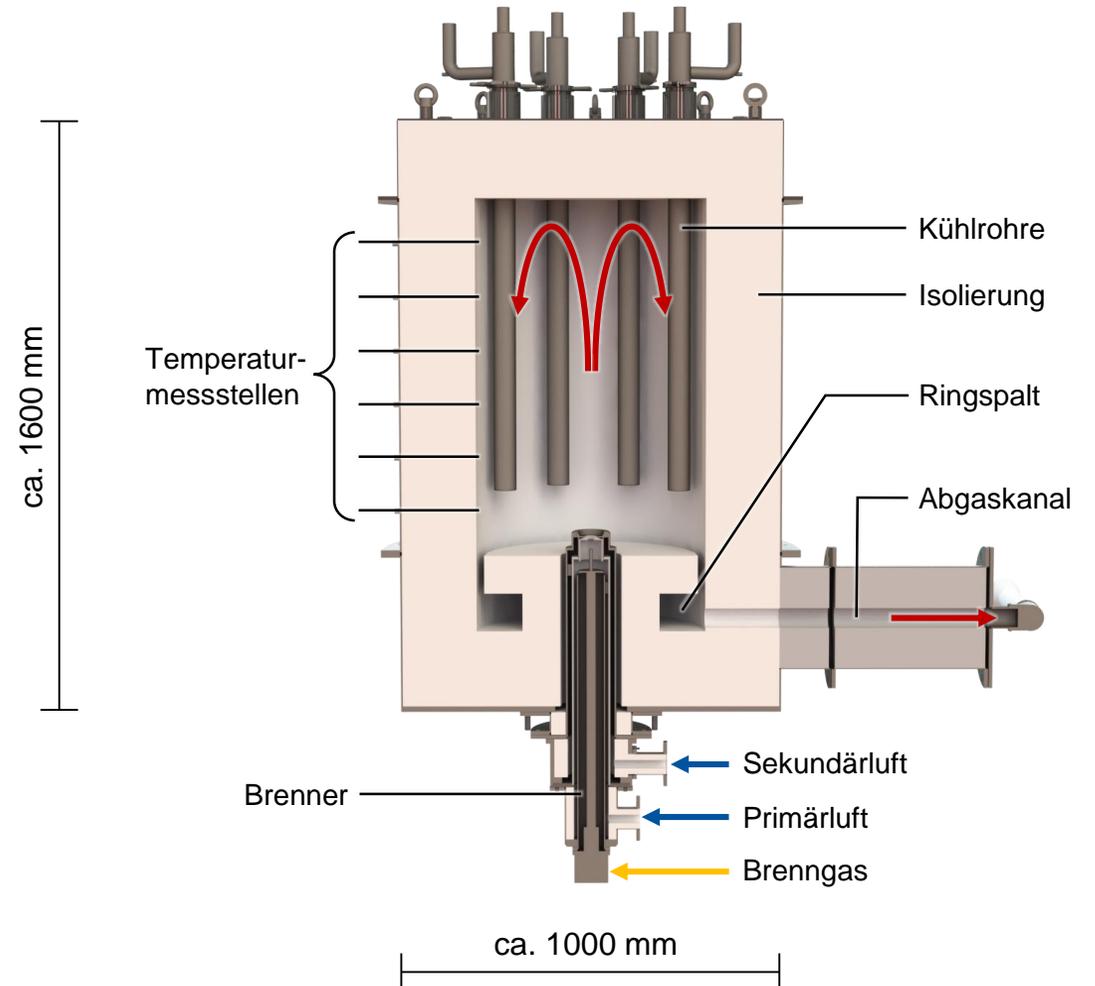
Primärmaßnahmen → Temperaturminderung

- **Luft- und/oder Brennstoffstufung**
- **Interne/Externe Abgasrezirkulation (EGR)**
- Direktkühlung der Flamme durch Kühlgase
- Reduzierung der Verbrennungsluftvorwärmtemperatur
- Wasser-/Dampfinjektion
- (Nah-stöchiometrische Verbrennung)

Prüfstand und experimenteller Aufbau

Überblick

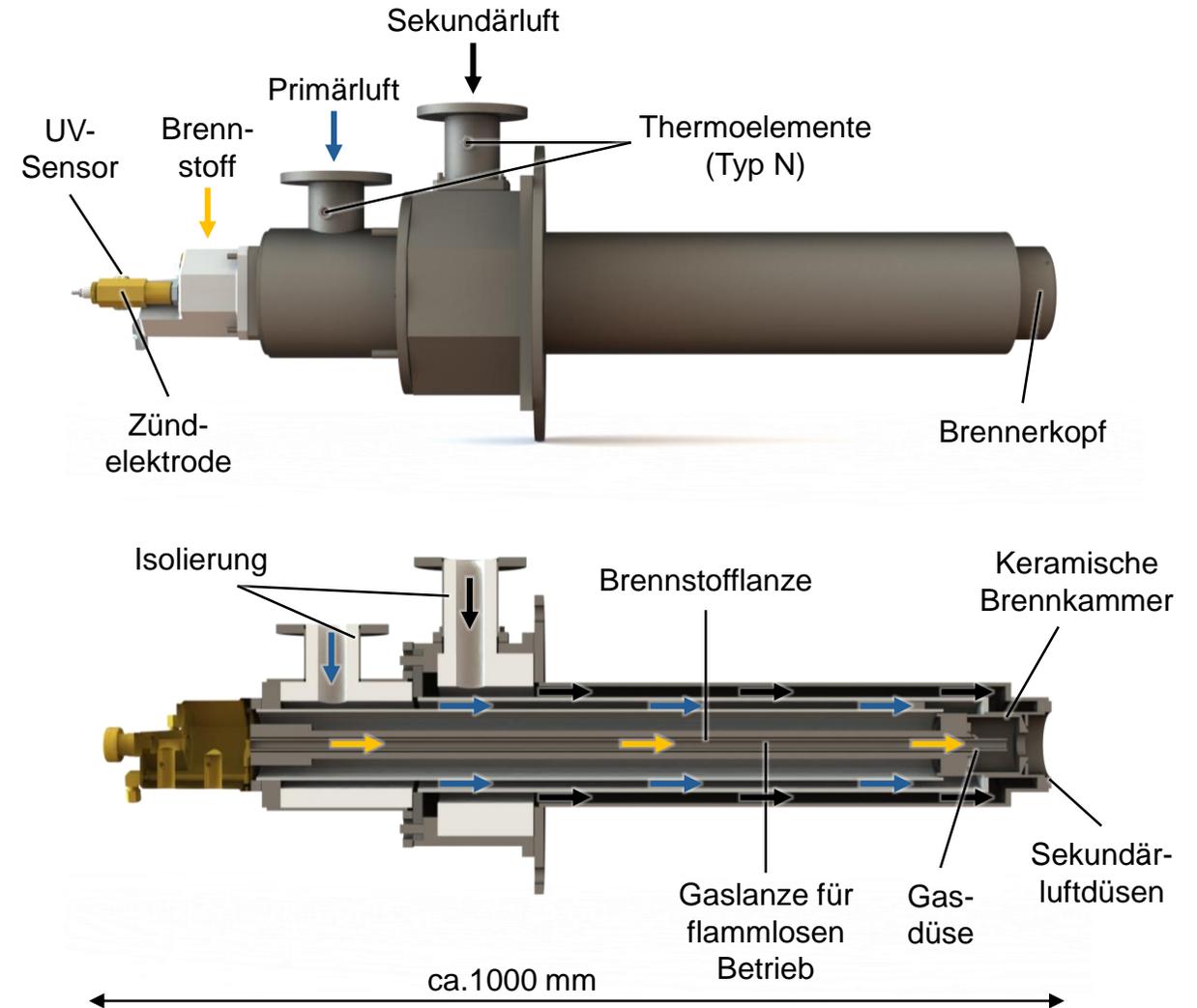
- Auslegung der Sicherheitsstrecken für Erdgas und Wasserstoff nach EN 746-2
- Gemischregelung mit Mass Flow Controllern
- Vertikale Versuchsbrennkammer mit diversen Messpositionen
 - Temperaturverteilung in der Brennkammer
 - Ofendrucksensor
 - Abgasanalyse (CO , CO_2 , O_2 , H_2O , NO_x)
 - Optische Untersuchungen



Prüfstand und experimenteller Aufbau

Vorindustrieller Hochgeschwindigkeitsbrenner

- Auslegung auf Basis eines Gasblocks eines kommerziellen Rekuperatorbrenners
- Thermische Leistung: 20 kW
- Betriebsmodi: Flamme / Flammlos (FLOX®)
- Separate Anschlüsse für Primär- und Sekundärluft
- Externe Luftvorwärmung möglich
- Flammenüberwachung: Standard UV-Sensor



Prüfstand und experimenteller Aufbau

Parameterstudien

H ₂ in Erdgas in Vol.-%	Ofenraumtemperatur in °C	Primärluftzahl	O ₂ -Gehalt im Abgas (tr.) in Vol.-%*	Betriebsmodus	Verbrennungsluftvorwärmung
0	850	0,4	1,1	Flamme	Kaltluft
10	950	0,6	3,0	Flammlos	~ 500 °C
20	1050	0,8	4,6		
35					
50					
80					
90					
100					

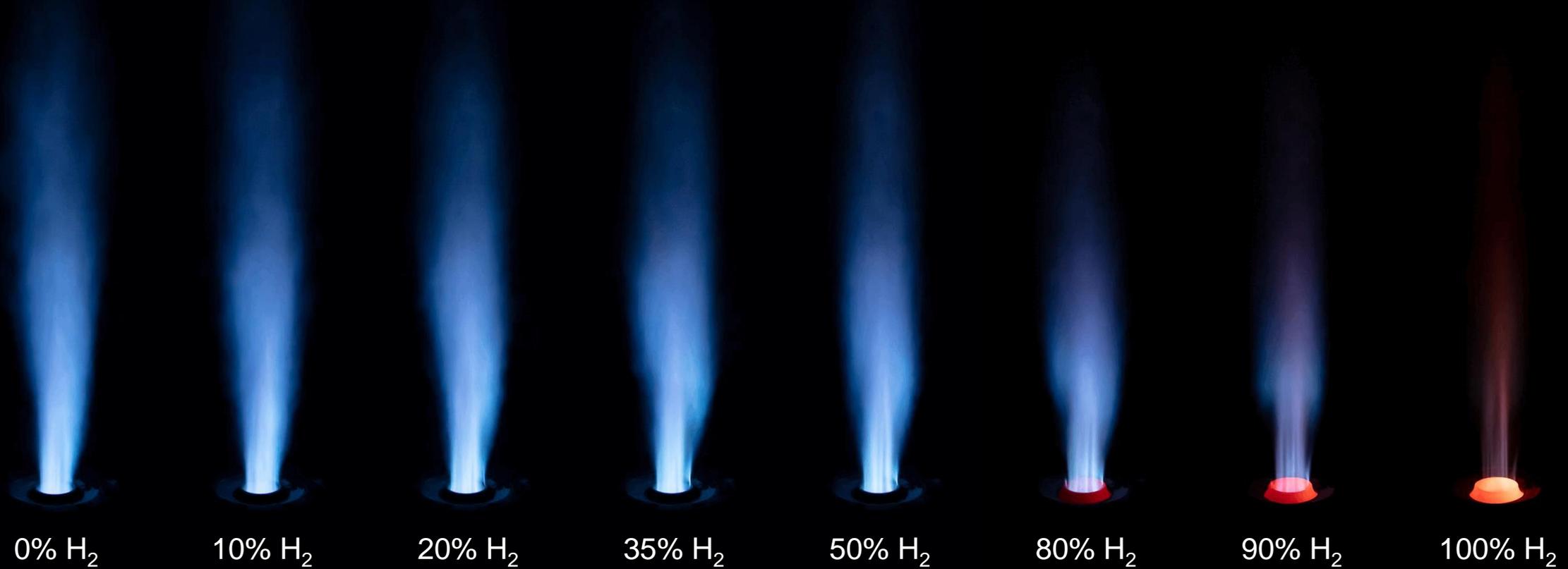
* Luftzahlen bei Erdgas-Verbrennung: 1,05; 1,15; 1,25

Ermittlung von Prozessfenstern und Stabilitätsgrenzen mittels

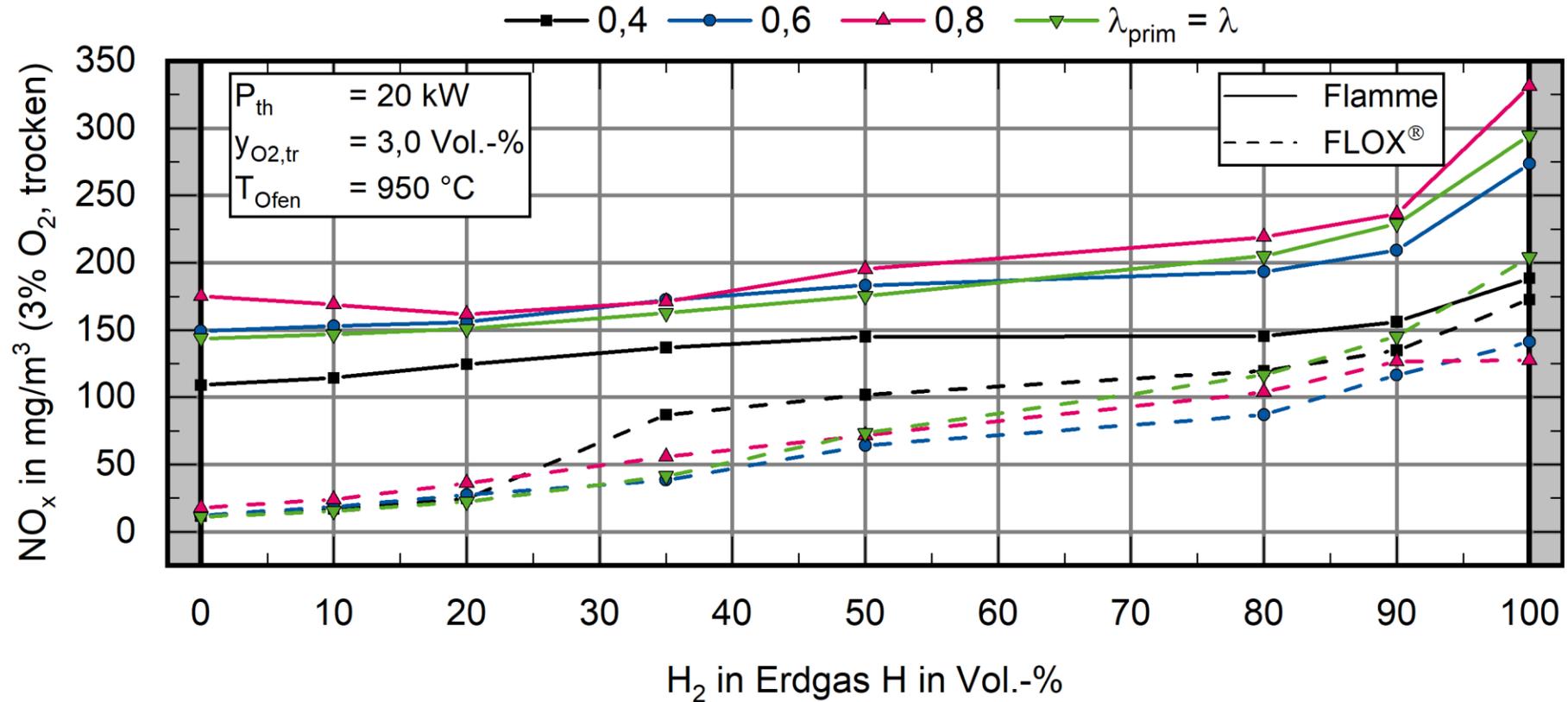
- Abgasanalyse
- optischer Inspektion
- Temperaturmessung

Ergebnisse: Kaltluft

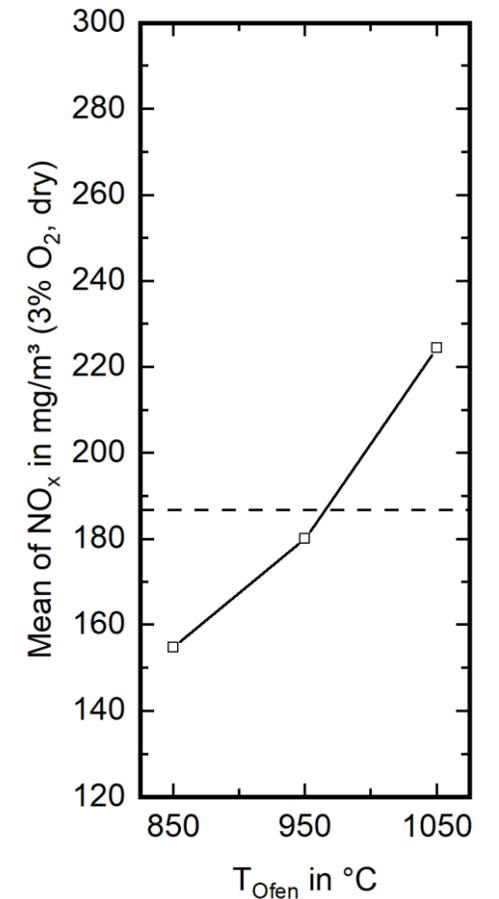
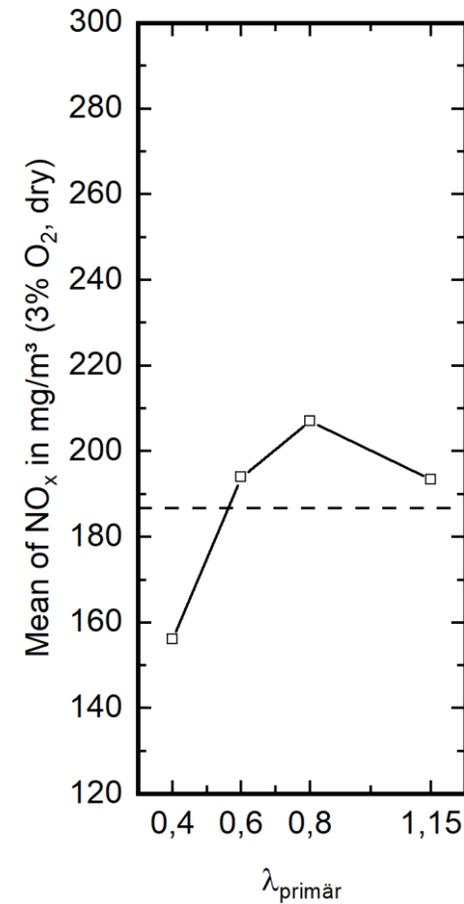
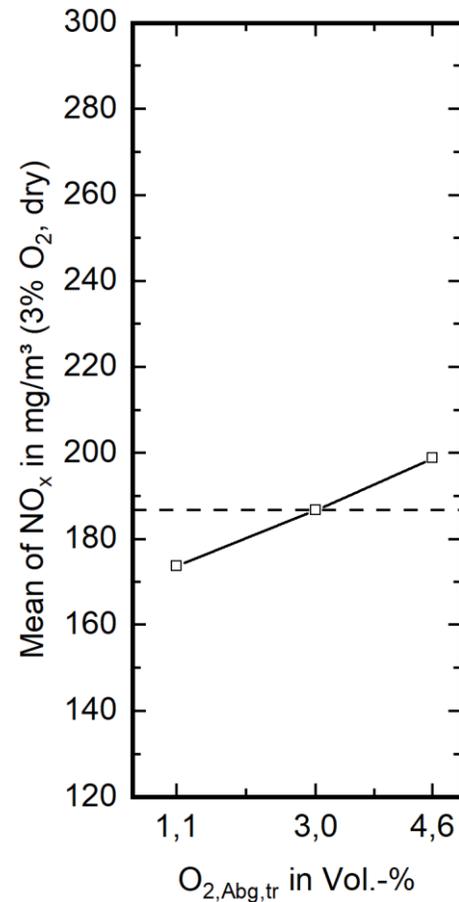
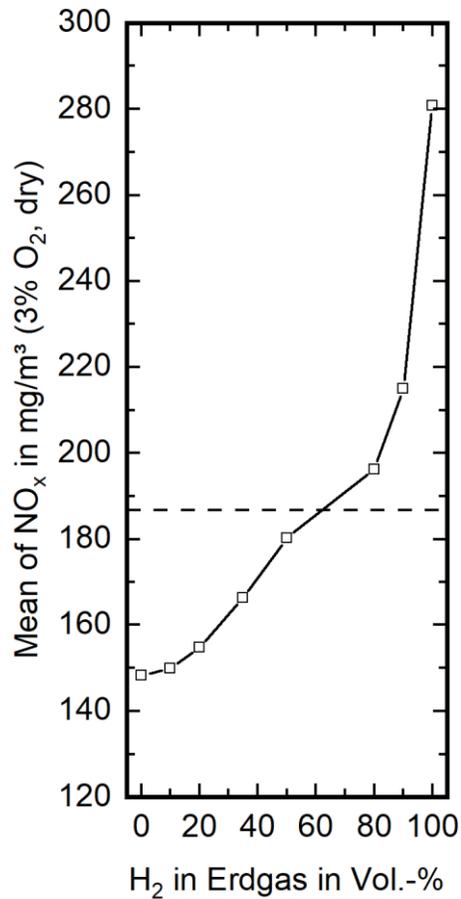
$P_{\text{Brenner}} = 25 \text{ kW}$ | $\lambda_{\text{primär}} = 0,60$ | $\lambda_{\text{gesamt}} = 1,15$ | $T_{\text{Ofen}} = 500 \text{ °C}$ | $T_{\text{Luft}} = 20 \text{ °C}$



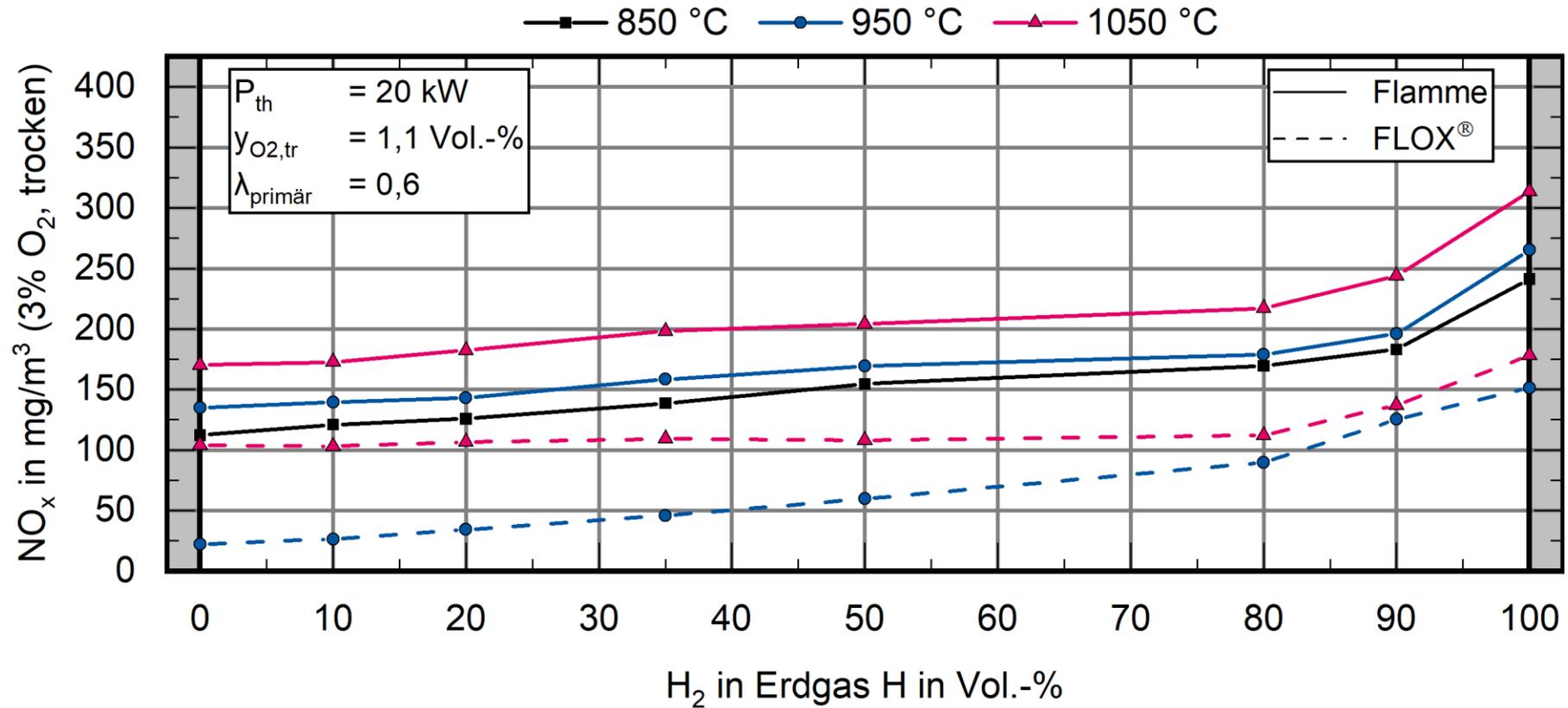
Einfluss der Primärluftzahl (Luftstufung)



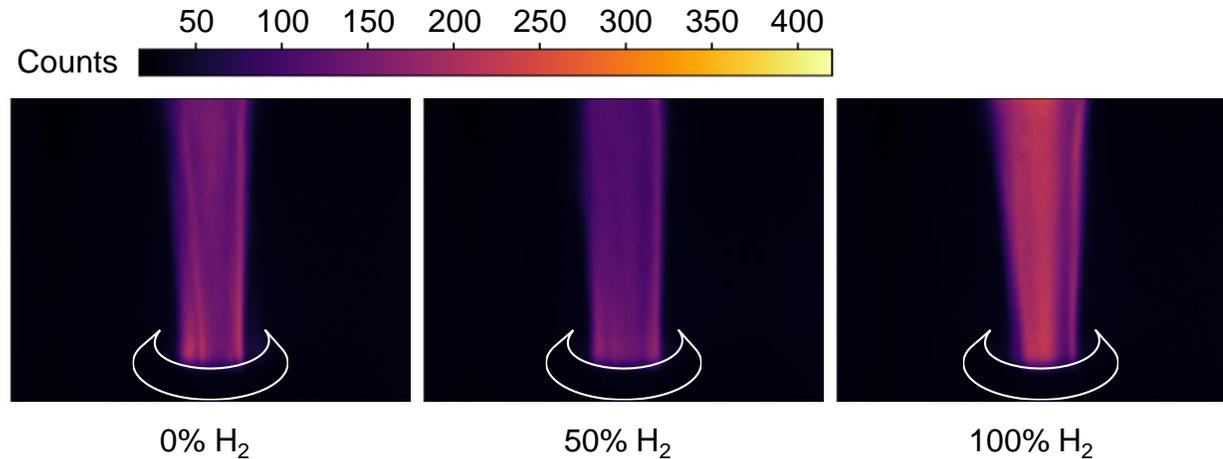
Statistische Auswertung – Flammenbetrieb



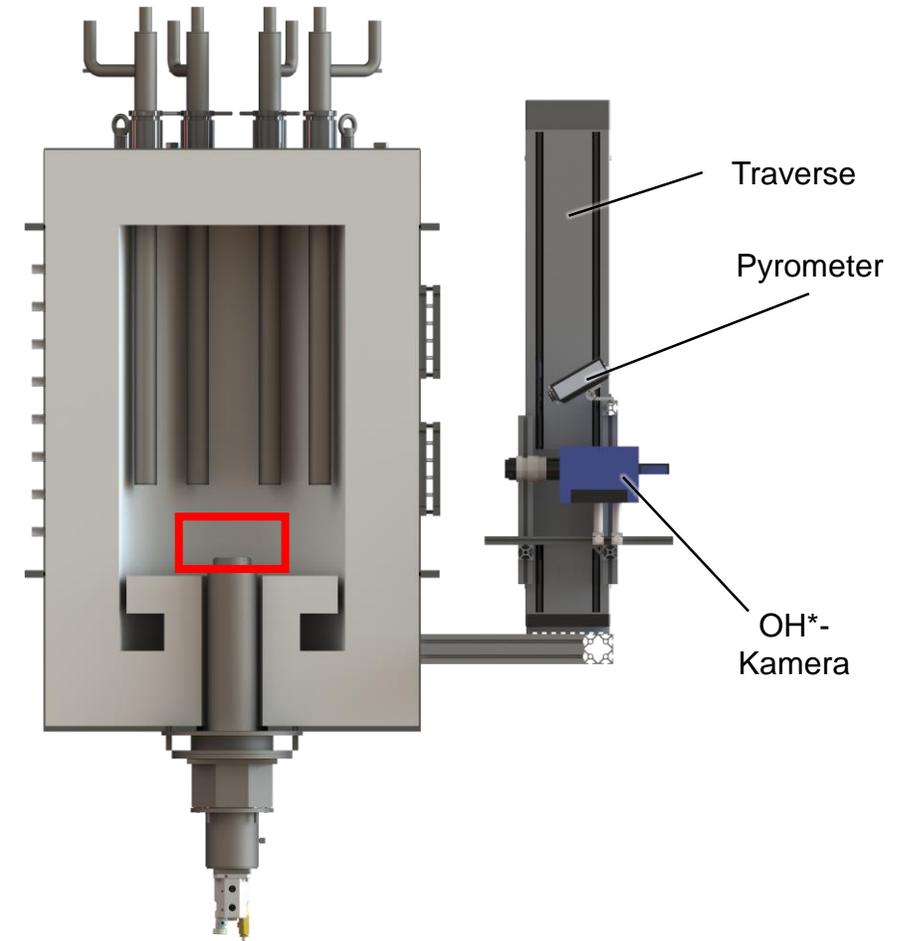
Einfluss der Ofenraumtemperatur



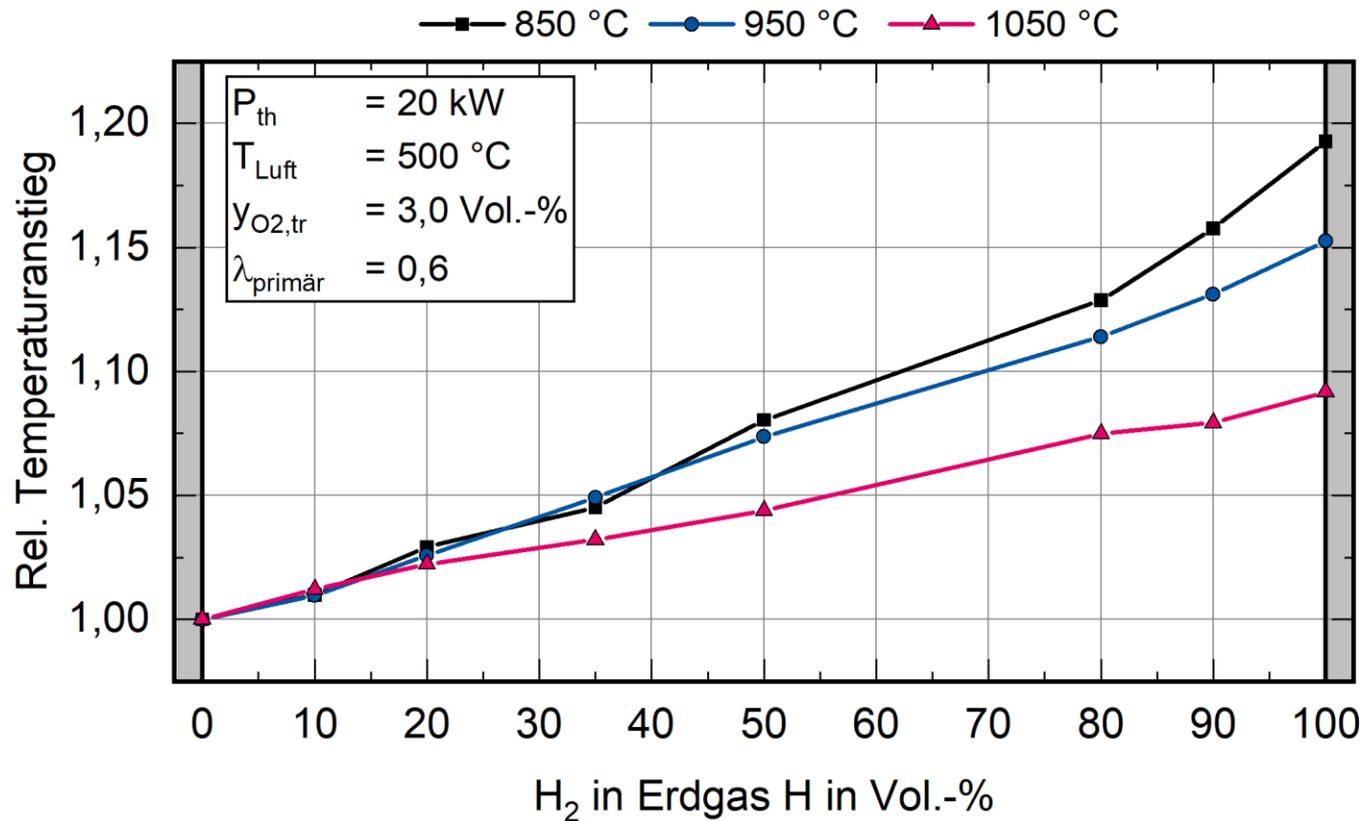
Einfluss der Ofenraumtemperatur (1050 °C)



Exposure 3000 μ s, Delay 5 ns, Gate 300000 ns,
Gain 70%, Frequenz 5 Hz, Aufnahmezeit 3 s



Einfluss der Ofenraumtemperatur



Zusammenfassung und Ausblick

- Sicherer Betrieb eines Hochgeschwindigkeitsbrenners mit bis zu 100 Vol.-% Wasserstoff möglich
- Experimentelle Untersuchungen zeigen
 - höhere Temperaturen am Brennerkopf
 - Verschiebung der Hauptreaktionszone in Richtung Brenner und in den Brennerkopf hinein
 - rötliche Flammenfärbung bei 100 Vol.-% Wasserstoff
 - teils deutliche Anstiege der NO_x-Emissionen, abhängig von diversen Parametern
- Erste Rückschlüsse
 - Erhöhte thermische Belastung von Brennerteilen kann zu Schädigungen führen
 - **Aktuelle** NO_x-Grenzwerte und -definitionen für den Betrieb mit erhöhten H₂-Anteilen können teilweise nicht eingehalten werden
 - NO_x-Grenzwertdefinitionen (mg/m³ im trockenen Abgas) müssen überarbeitet werden
- Ausblick
 - Vervollständigung der Parameterstudie mit Warmluft (~ 500 °C)
 - Vollständige statistische Auswertung (Kalt- und Warmluftversuche)
 - Übertragung der experimentellen Ergebnisse in Konzeptionierung eines „realen“ Rekuperatorbrenners

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Lukas Sankowski, M.Sc.
Wiss. Mitarbeiter – Arbeitsgruppe Verbrennung
Institut für Industrieofenbau und Wärmetechnik
RWTH Aachen University
Kopernikusstr. 10, 52074 Aachen
www.iob.rwth-aachen.de
sankowski@iob.rwth-aachen.de
+49 241 80 26079

Gefördert durch:

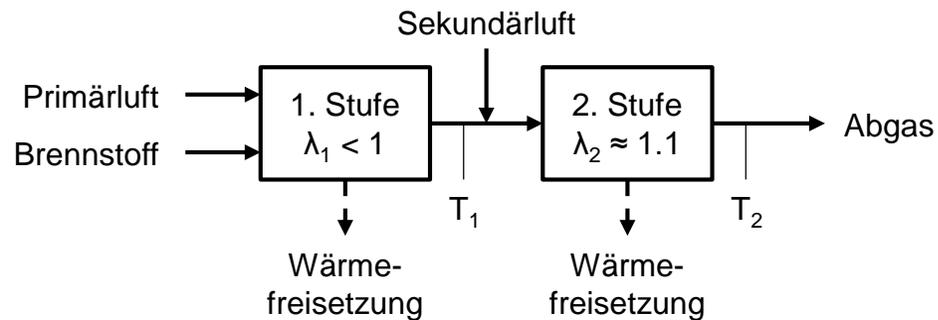


Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

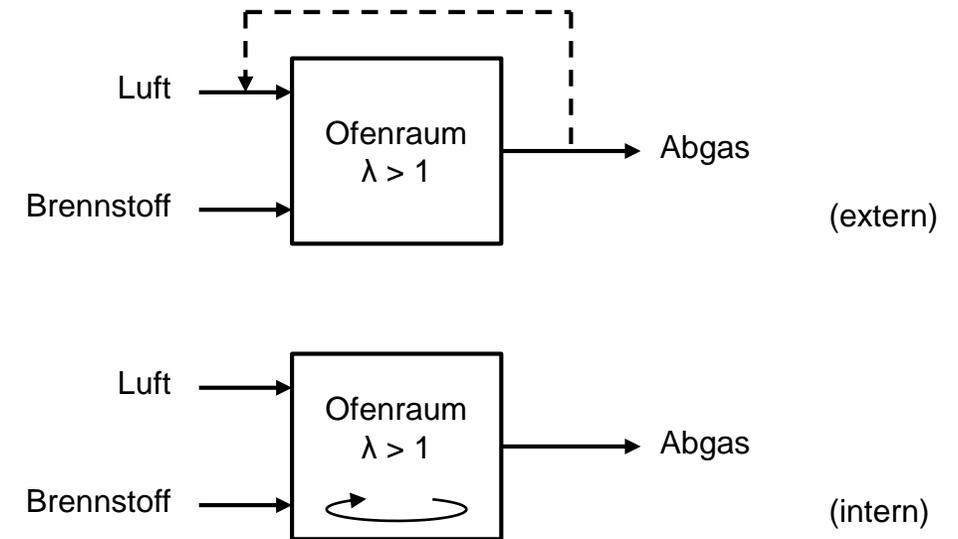
Gestufte Verbrennung

- Ausführung als Luft- oder Brennstoffstufung
- Gestufte Wärmefreisetzung



Abgasrezirkulation

- Ausführung intern oder extern
- Rezirkulationsraten bis ca. 30% bei NG-Verbrennung



Quelle: Pfeifer et al. (2019)