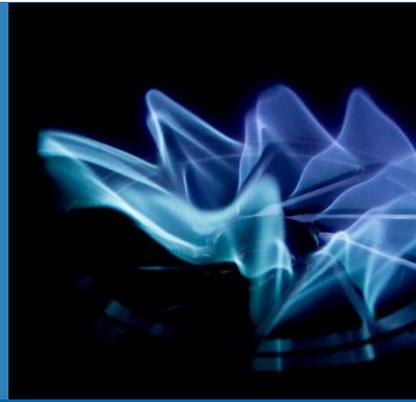


UNTERSUCHUNGEN DER LAMINAREN BRENNGESCHWINDIGKEIT VON WASSERSTOFFANGEREICHERTEN METHANFLAMMEN UNTER DEM EINFLUSS VON REDUZIERTEN SAUERSTOFFANTEILEN IN DER VERBRENNUNGSLUFT



Aachen | 11.10.2019 S. Eckart, Prof. H. Krause

Professur Gas- und Wärmetechnische Anlagen

Kontakt:

Sven Eckart

TU Bergakademie Freiberg
Gustav-Zeuner-Straße 7
09599 Freiberg / Sachsen

Tel.: +49 (0) 3731 39-2721
Fax: +49 (0) 3731 39-3942
sven.eckart@iwtt.tu-freiberg.de
www.gwa.tu-freiberg.de

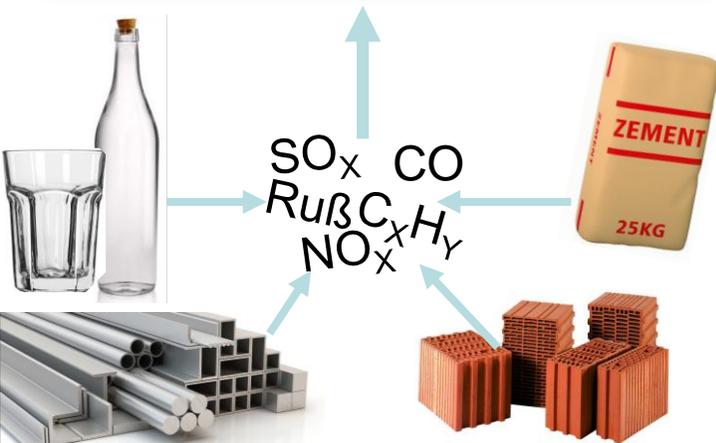


Inhalt

- 1. Einleitung**
2. Brenner und Test-Setup
3. Ergebnisse und Diskussionen
4. Zusammenfassung



Motivation

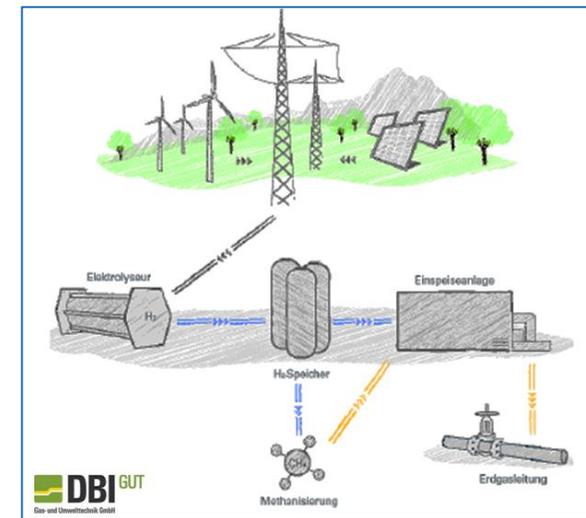


- 195 Staaten sind zusammengekommen zur Pariser Klimaschutzkonferenz (Sep. 2016) sowie in Bonn (Nov. 2017) und Katowice (COP24/ Dez. 2018) zu Nachverhandlungen. Rechte und Pflichten wurden verhandelt um das in Paris anvisierte 1,5°C-Ziel zu erreichen.
- Weltweit werden höhere Anforderungen für Thermoprozess- und Feuerungsanlagen im Rahmen der Schadstoffminimierung diskutiert und erlassen.
- Daraus geben sich neue Herausforderungen für die Industrie und Brennerhersteller.

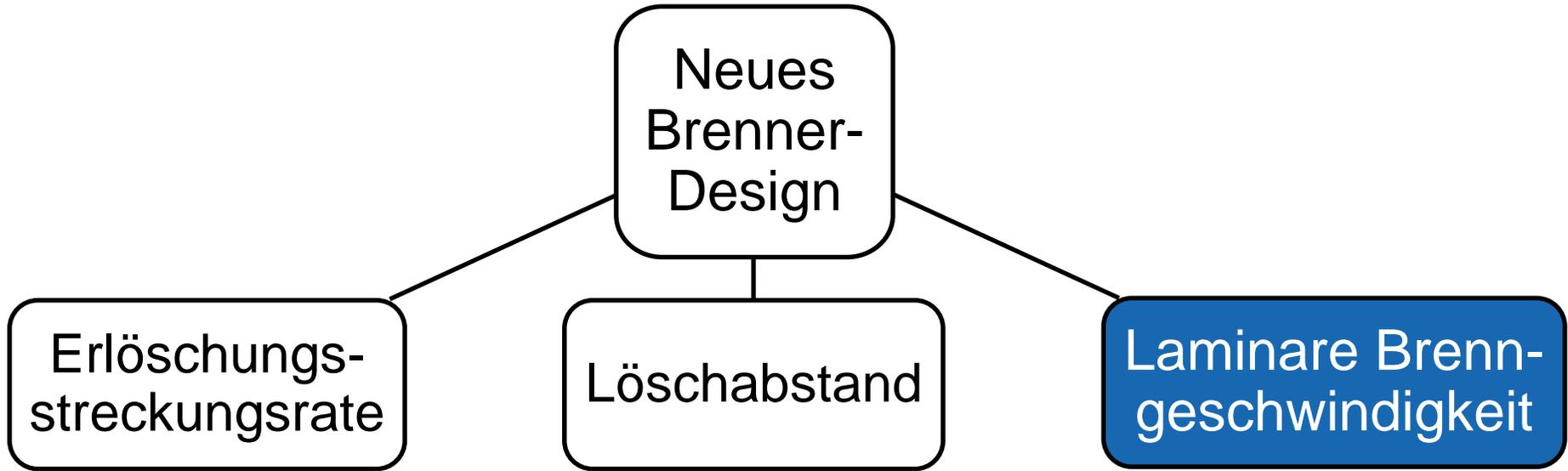
- **Schadstoffe im Verbrennungsvorgang sind zu minimieren und Wirkungsgrade von Brennersystemen zu steigern**
- **Lösungsansatz: Wasserstoff oder Wasserstoff/Erdgasgemische in Thermoprossessanlagen etablieren**

Motivation

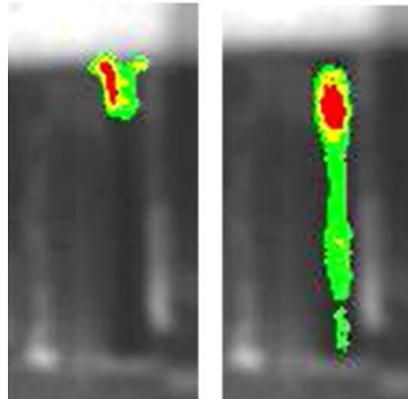
1. Erzeugung von Gas aus Erneuerbaren Energien
 - Wasserstoff und Sauerstoff (aus der Wasserelektrolyse)
 - Methan (aus CO₂ und Wasserstoff)
2. Einspeisung in das Erdgasnetz
 - Zugriff auf eine bestehende Infrastruktur für
 - Transport und saisonale Speicherung
3. Nutzung des Energieträgers zusammen mit Erdgas oder alleine
 - Rekonvertierung für die Grundlastkapazität
 - Wärmegewinnung
 - Mobilitätssektor und Materialverbrauch für die Industrie



Struktur und Inhalt des Promotionsvorhabens



Counterflow-Flamme

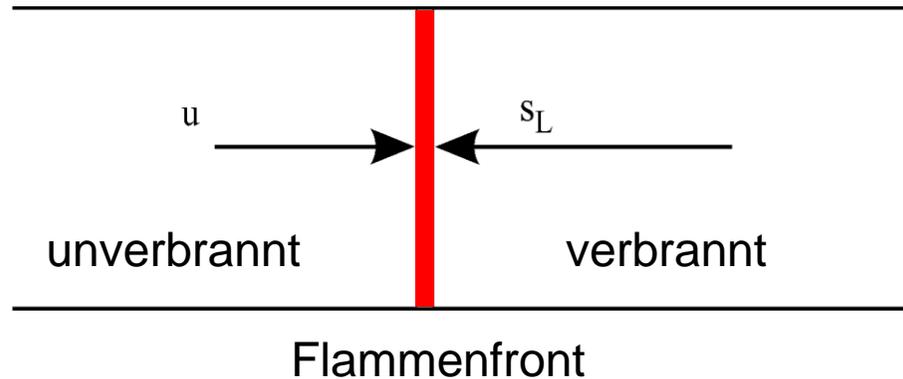


Slotburner-Flamme



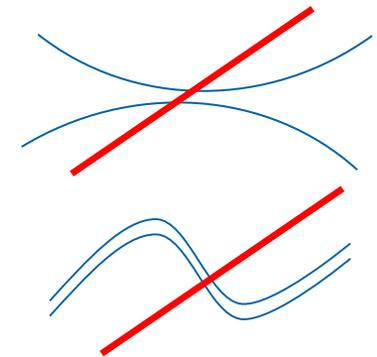
Heat Flux Flamme

Laminare Vormischflammen



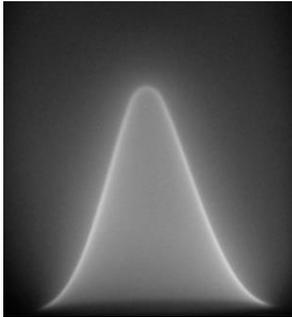
Laminare Brenngeschwindigkeit

- Ausbreitungsgeschwindigkeit einer reaktiven Flammenfront zur unverbrauchten Reaktandenseite in einem stationären/ restlichen Kraftstoff-Oxidationsmittel-Gemisch
- Eigenschaften:
 - adiabatisch
 - laminar
 - planar (ungestreckt und nicht gekrümmt)
 - abhängig von T , ρ , Φ , fuel, Oxidationsmittel



Messtechniken zur Bestimmung des LBV

Brennerstabilisierte Flammen



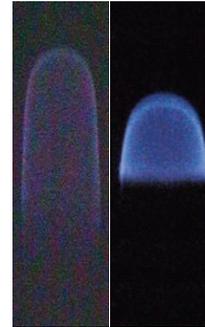
Bunsen Methode
(gestreckt)

Stagnations Flammen

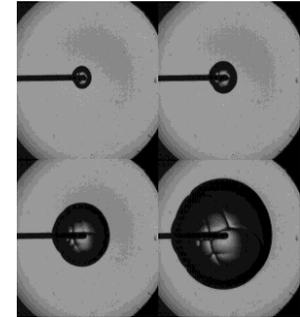


Counterflow Methode
(gestreckt)

Expandierende Flammen



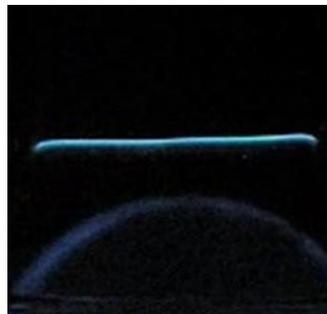
Flammenrohr
Methode
(gestreckt)



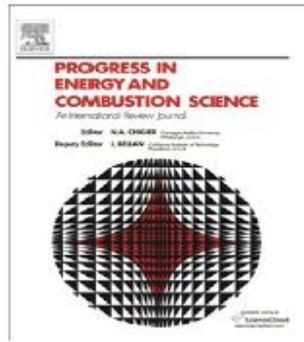
Konstante Volumen
Flammen Methode
(gestreckt)



Heat-Flux Brenner
Methode



Erweiterter Kanal
Brenner Methode



Übersichtspaper von
Konnov et al. 2018
Progress in Energy and Combustion
Science 68 (2018) 197–267

Übersichtspaper von
Egolfopoulos et al. 2014
Progress in Energy and Combustion
Science 43 (2014) 36 - 67

Einleitung

Experimente

- S_L
- Species Verteilung
- Flammenstruktur ...



Simulationen

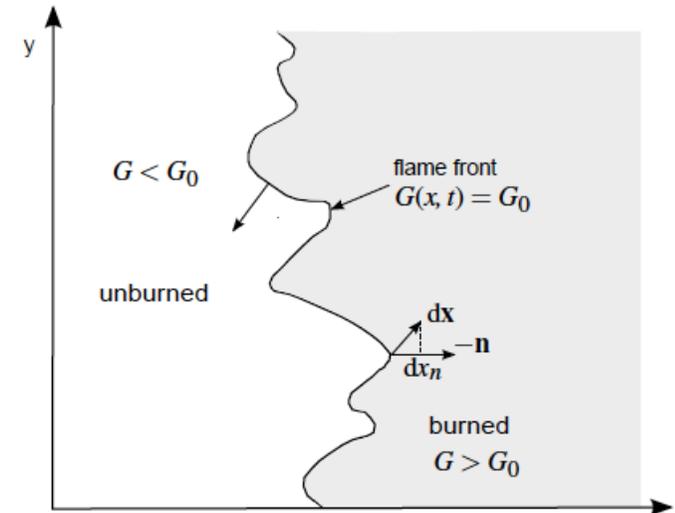
- Chemische Kinetik
- Flammenstruktur
- Mischungsbruch ...

Beispiel: laminare oder turbulente (teilweise) vorgemischte Flammen

$$\bar{\rho} \frac{\partial \tilde{G}}{\partial t} + \bar{\rho} \tilde{\mathbf{v}} \cdot \nabla \tilde{G} = \left(\bar{\rho} s_T^0 \right) |\nabla \tilde{G}| - \bar{\rho} D_t \tilde{\kappa} |\nabla \tilde{G}|,$$

$$s_T = (1 + \tilde{\sigma}_t) s_L$$

$$\tilde{\sigma}_t = -\frac{a_4 b_3^2 l_t}{2b_1 l_F} + \left[\left(\frac{a_4 b_3^2 l_t}{2b_1 l_F} \right)^2 + a_4 b_3^2 \frac{v' l_t}{s_L l_F} \right]^{1/2}$$

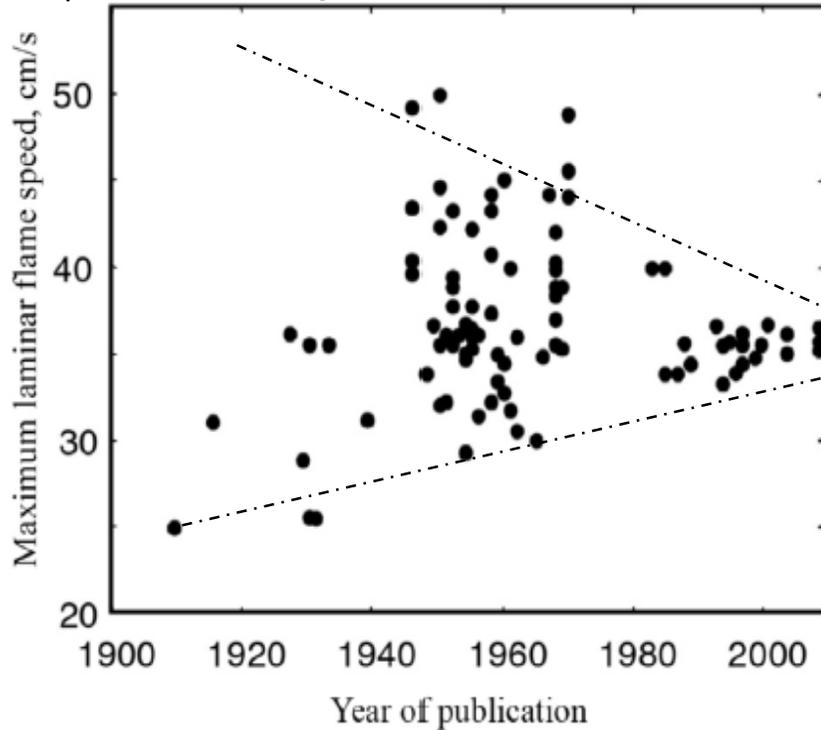


Experimente

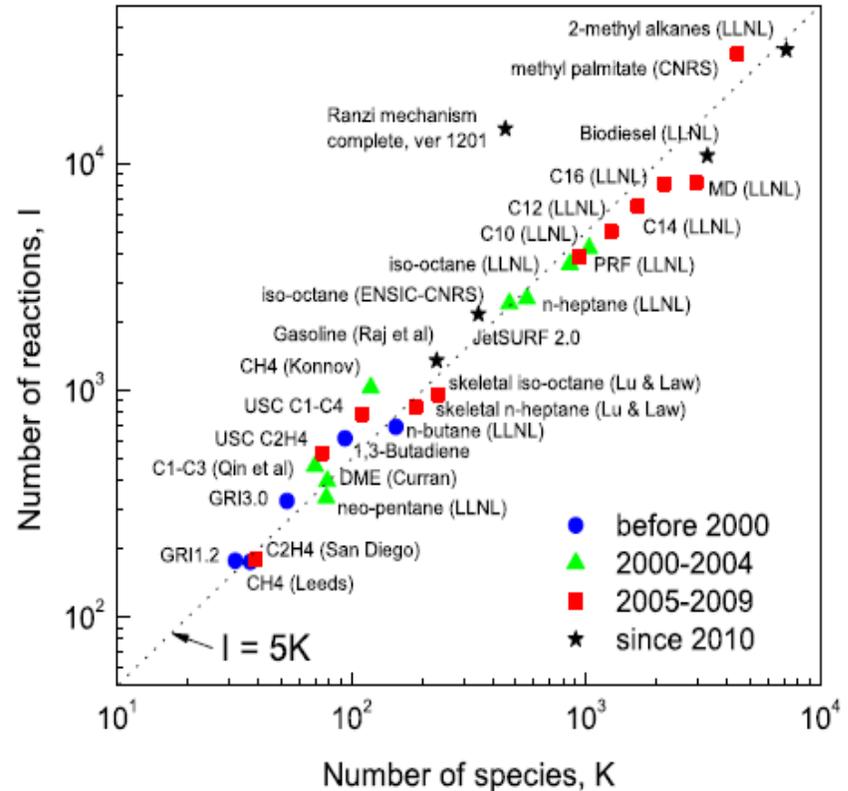


Simulationen

CH₄-air, 1 atm, ϕ 1.0



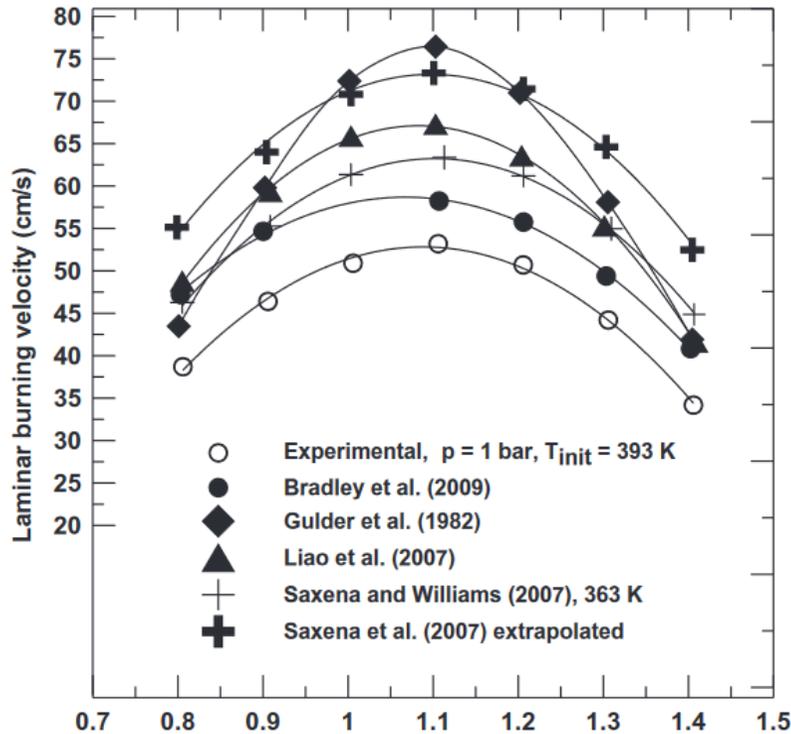
Egolfopoulos et al., Progress in Energy and Combustion Science 43 (2014) 36 - 67



Experimente

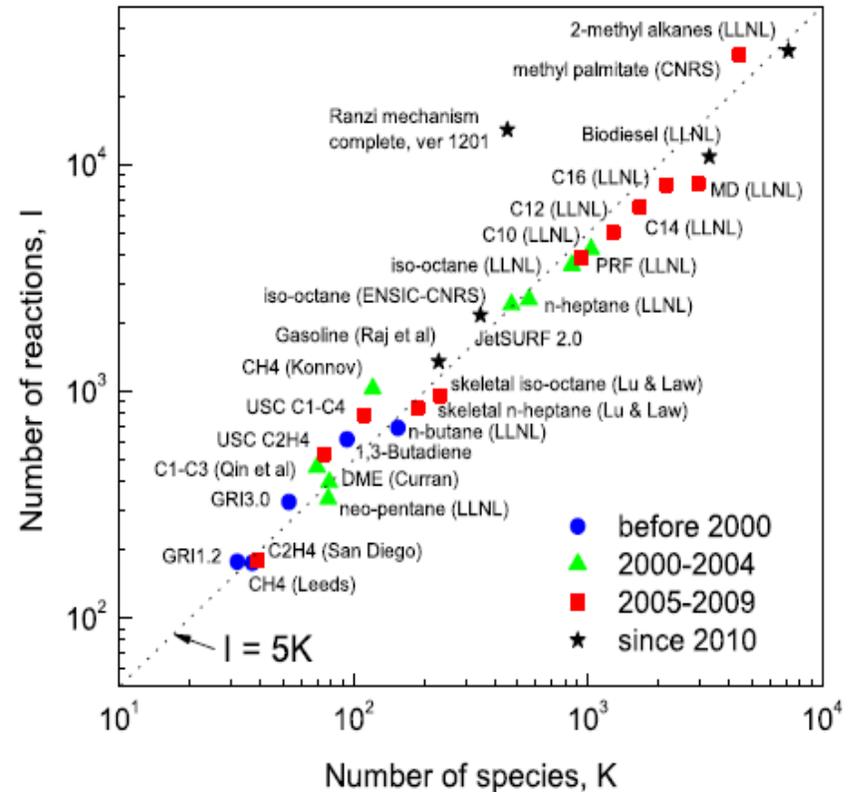


Simulationen



Broustail et al., Fuel,90:1-6, 2011

Ethanol-air, 1 bar



Yuan et al., Science China-Chemistry,60:1391–1401, 2017

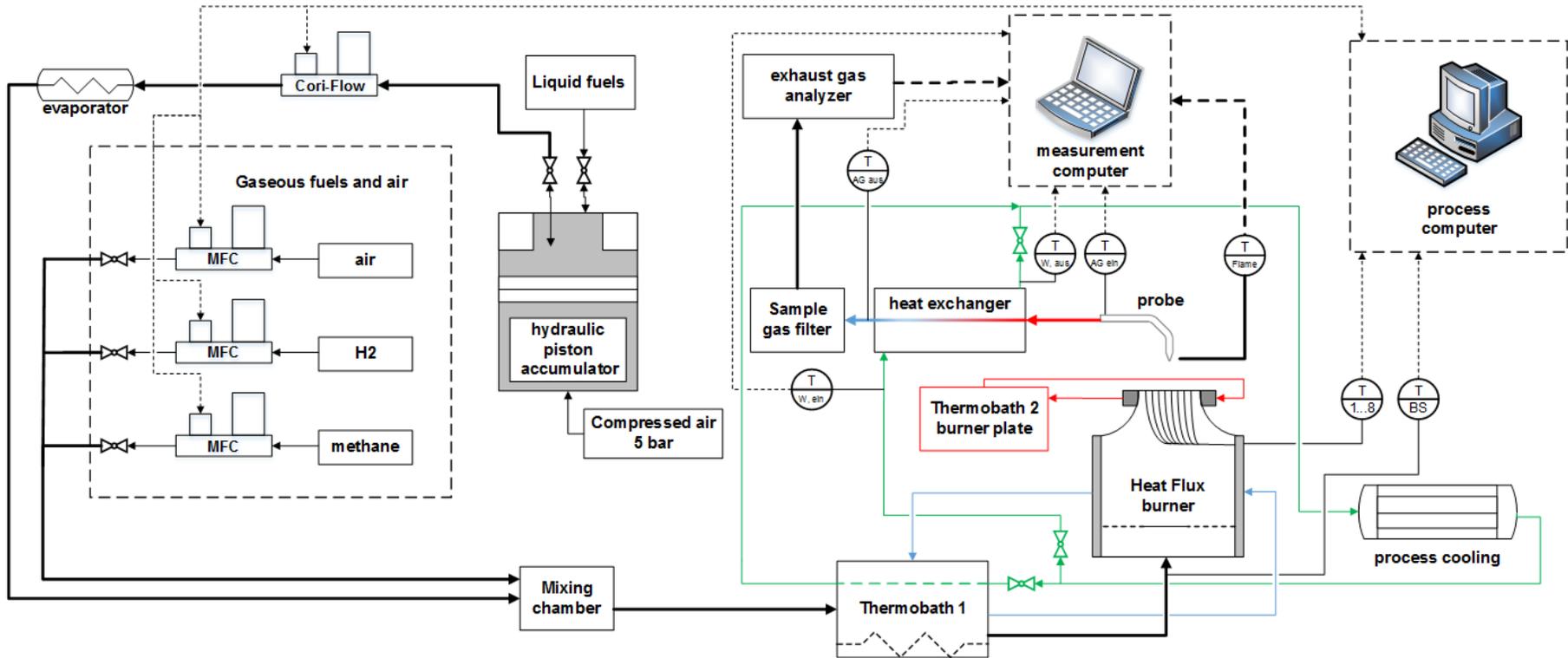
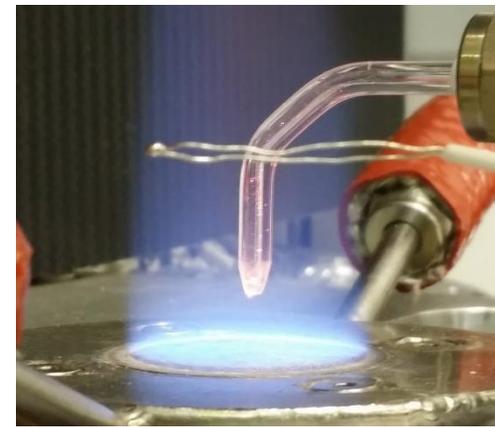
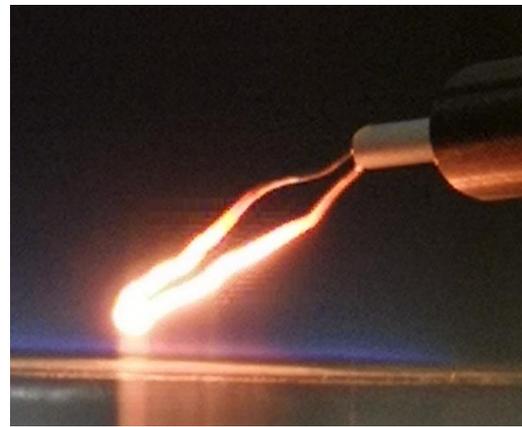


Inhalt

1. Einleitung
- 2. Brenner und Test-Setup**
3. Ergebnisse und Diskussionen
4. Zusammenfassung

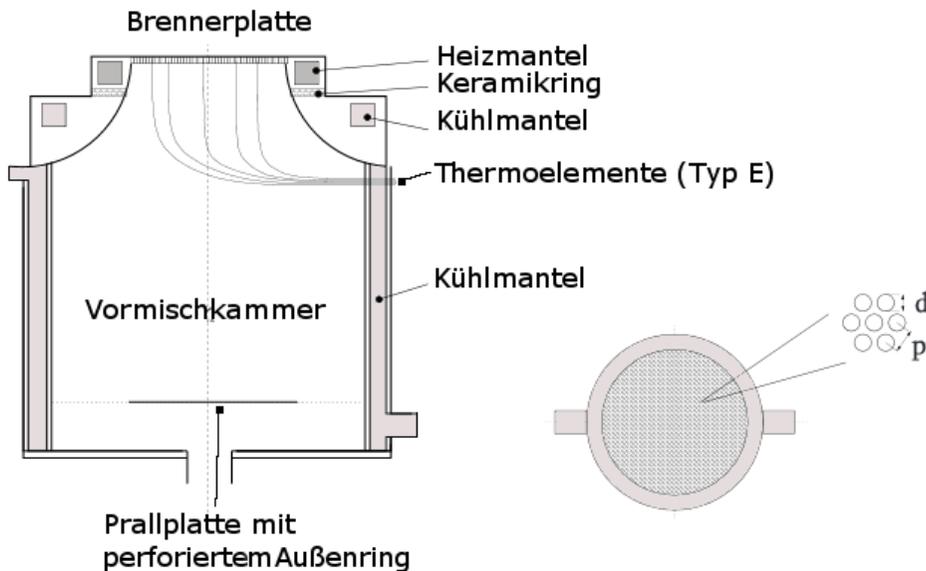
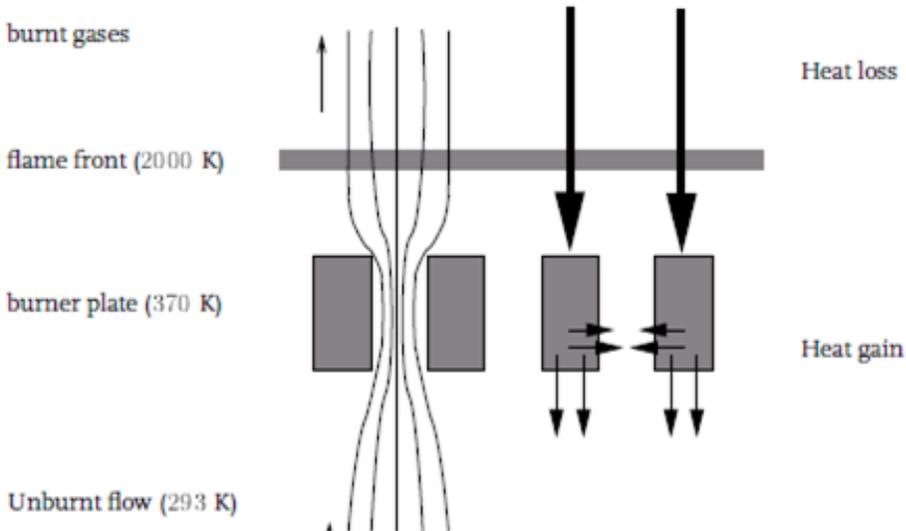


Heat Flux Brenner und Test-Setup



Fuel Preparation	Thermal Conditioning	Burner	Control & DAQ
------------------	----------------------	--------	---------------

Brenner und Messprinzip

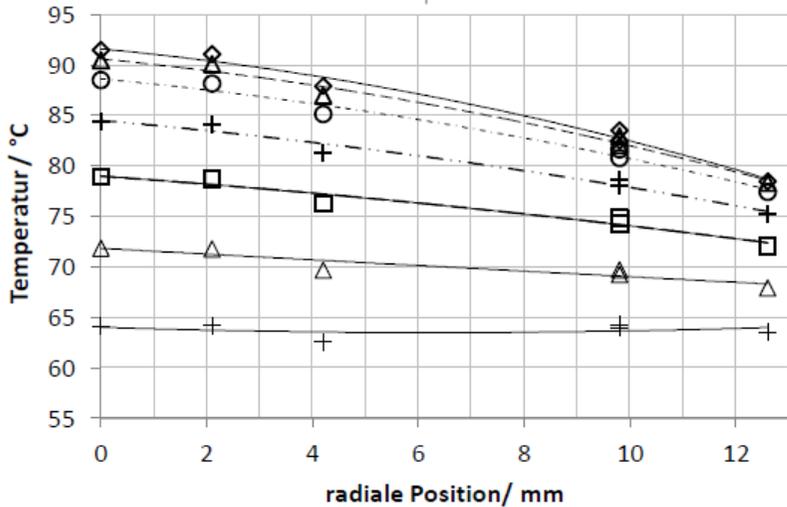
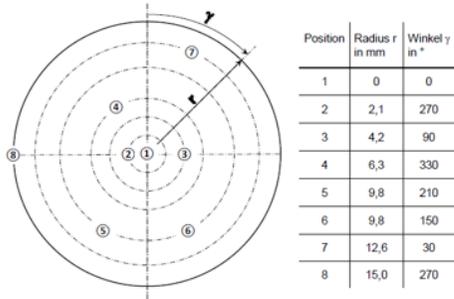


Brennerstabilisierte Flamme

- basierend auf einer Flachflammenmethode von Botha und Spalding im Jahr 1954.
- Um das Problem der Wärmeverluste zu umgehen und eine lineare Extrapolation zu vermeiden, führten de Goey, van Maaren und Quax 1993 das Heat-Flux Brenneverfahren ein.

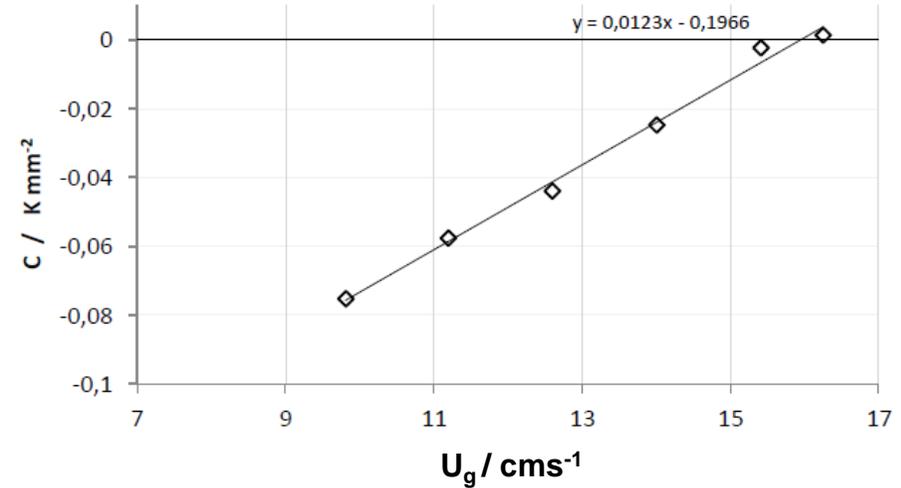
Messprinzip

- Stabilisierung einer quasi-adiabatischen planaren Flamme auf einer perforierten Brennerplatte.
- Vorwärmung des unverbrannten Gasmischunges - der Brenner interagiert mit der Vorwärmzone ohne eine effektive Wärmeübertragung.
- Wärmestrom zwischen Flamme / Brennerplatte und Brennerplatte / Brennstoff-Oxidationsgemisch muss ausgeglichen werden.



$$T_p(r) = T_{center} + C \cdot r^2$$

$$C = -\frac{q}{4\lambda_p h}$$



Messprinzip

- Messung des radialen Temperaturprofils innerhalb der Brennerplatte.
- daraus wird der Parabolkoeffizient der laminaren Brenngeschwindigkeit bestimmt.
- $u_g < S_L \rightarrow$ positiver Wärmestrom \rightarrow Brennerplatte erreicht eine höhere Temperatur als der Heizkreis.
- $u_g > S_L \rightarrow$ negativer Wärmestrom \rightarrow Brennerplatte erreicht im Vergleich zum Heizkreis eine niedrigere Temperatur.



Inhalt

1. Einleitung
2. Brenner und Test-Setup
- 3. Ergebnisse und Diskussionen**
4. Zusammenfassung



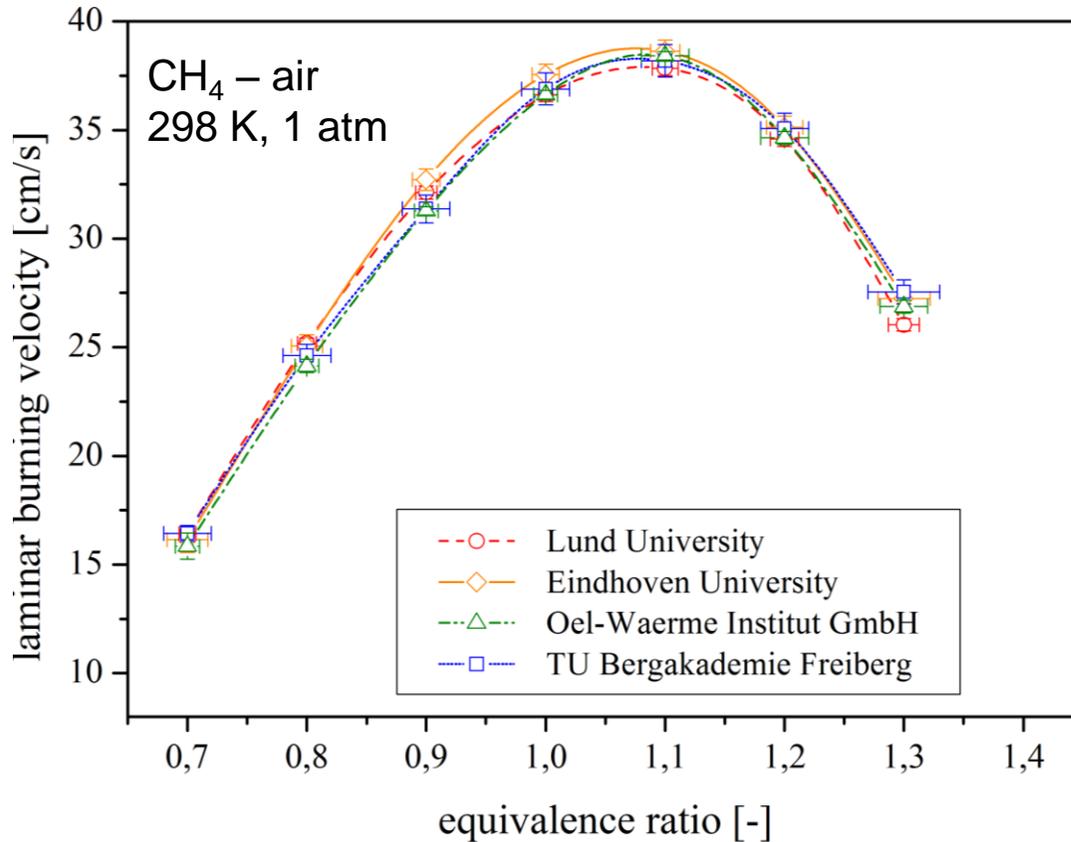


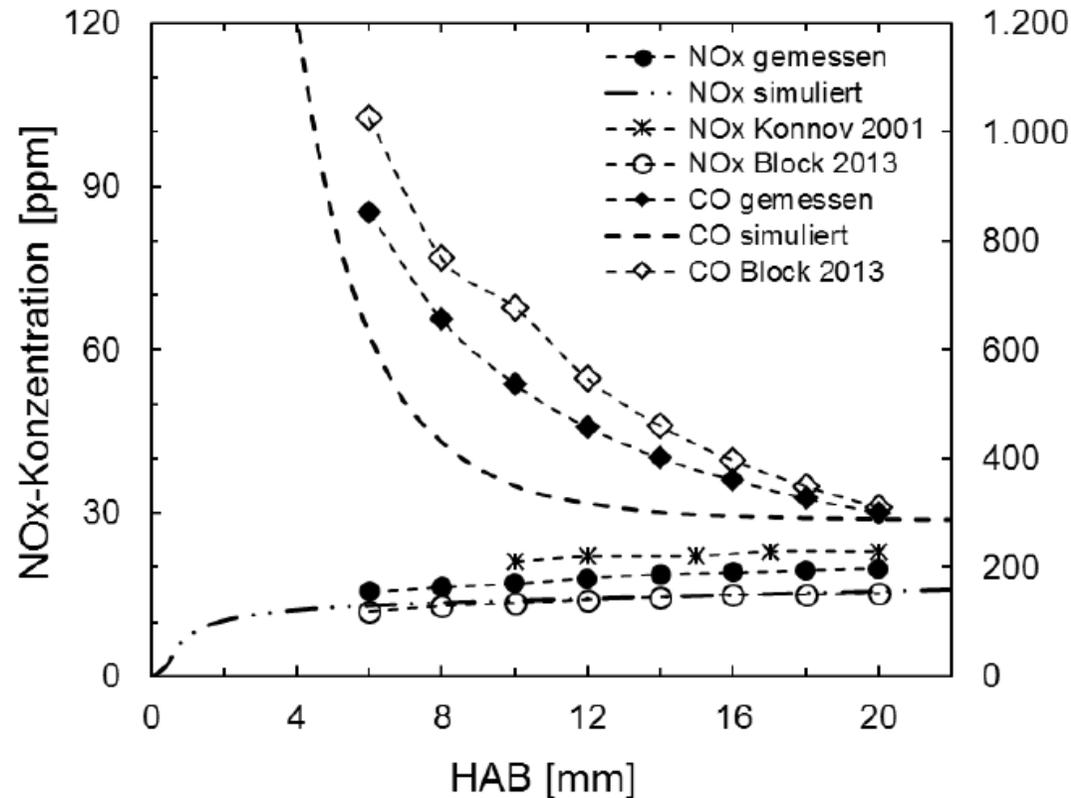
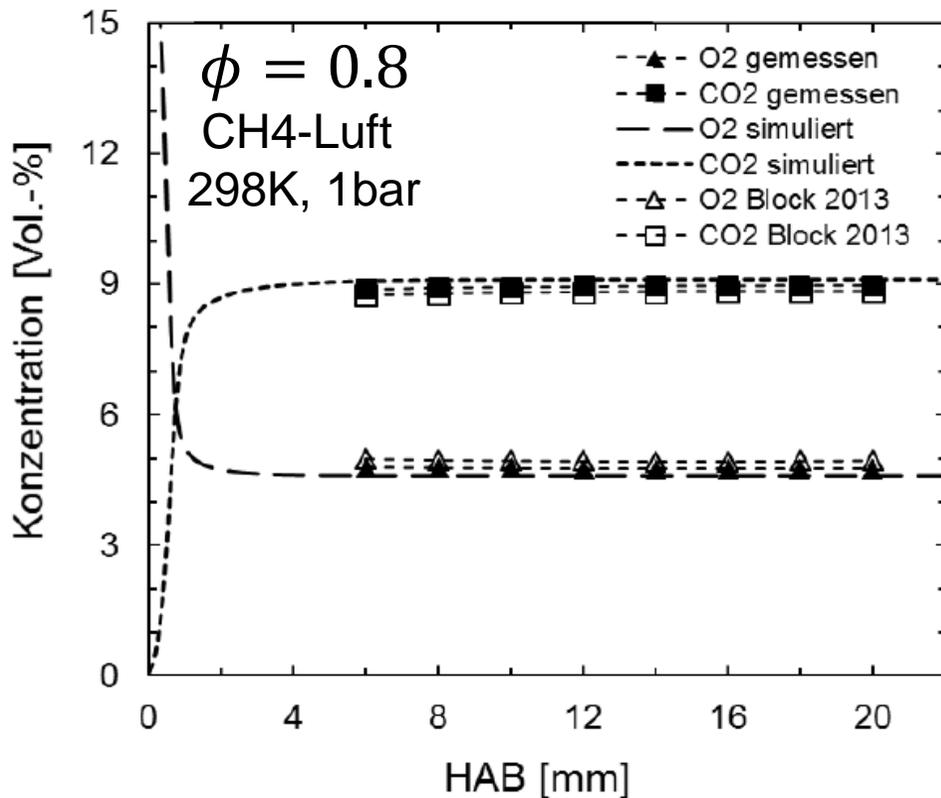
Table 1 – Mean values of measured burning velocities for methane/air mixtures at 298 K

ϕ	Mean value, cm/s	Mean deviation, cm/s	Standard deviation, cm/s
0.7	16,2	0,2	0,2
0.8	24,8	0,4	0,2
0.9	31,9	0,5	0,3
1	36,9	0,3	0,3
1.1	38,3	0,3	0,4
1.2	34,9	0,2	0,4
1.3	26,9	0,5	0,4

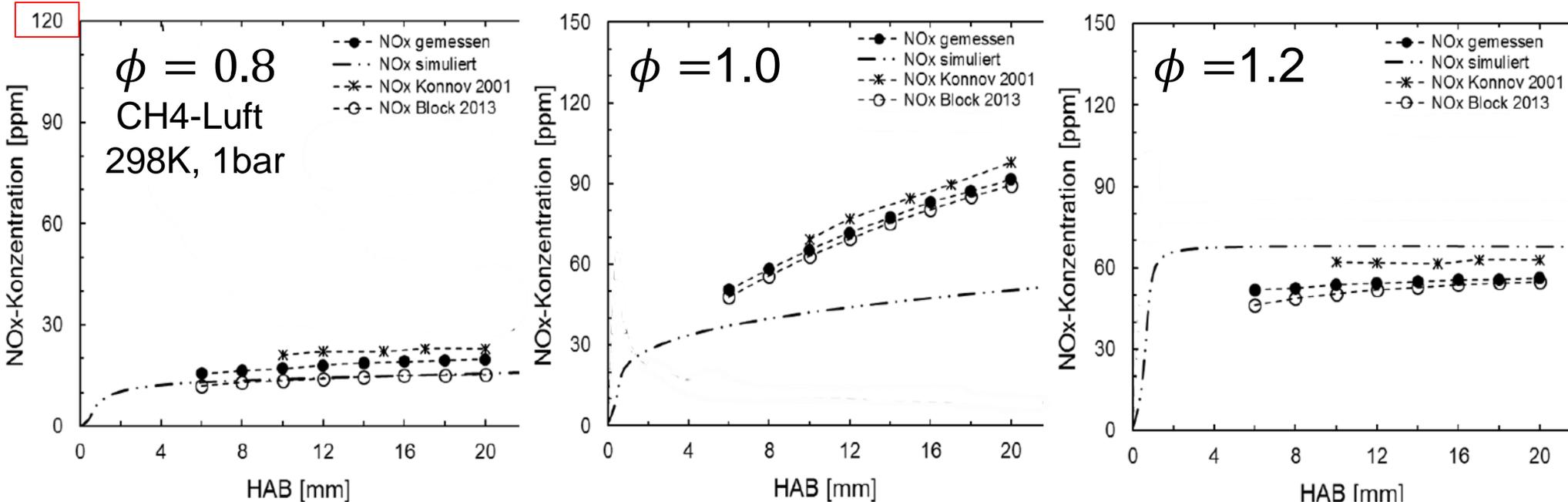
Table 2 – Average differences between the results of different labs for methane/air mixtures at 298 K

	Average difference [cm/s]		
	TUBAF	OWI	TUE
LU	0,6	0,6	0,6
TUBAF	-	0,4	0,5
OWI	-	-	0,7

Abgasanalyse und Simulation von CH₄-Luft

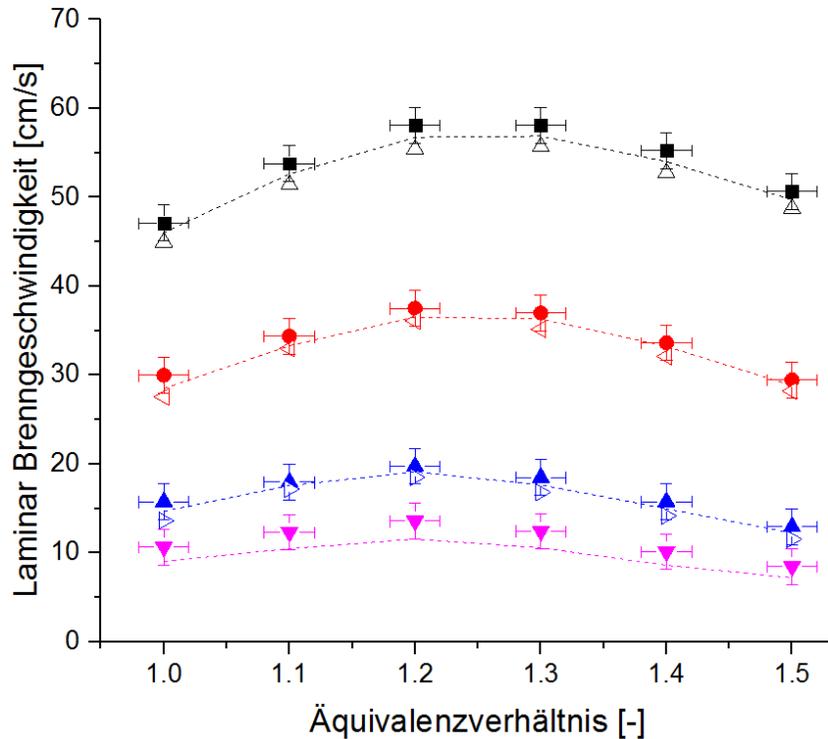


- O₂ und CO₂ Gehalte können von detaillierten Chemischen Mechanismen (GRI 3.0 + NO_x) gut wieder gegeben werden
- Verlauf der NO_x und CO Konzentrationen über die Höhe können wiedergegeben werden jedoch nicht die exakten Werte für CO
- Simulation für NO_x in der Messunsicherheit der Messungen

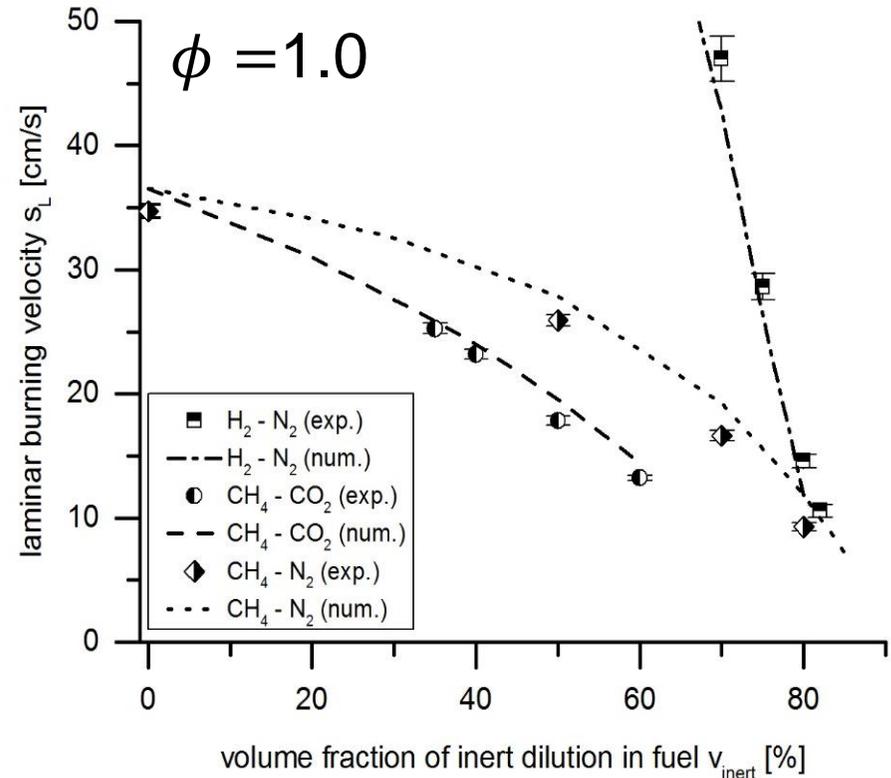


- Simulationen können über den Equivalenzbereich von 0.8 bis 1.2 den Verlauf der Schadstoffbildung von NO_x in der Größenordnung korrekt vorhersagen
- In den brennstoffarmen Mischungen wird der NO_x Gehalt besser vorhergesagt
- Im stöchiometrischen Fall wird der NO_x Gehalt unterschätzt und im brennstoffreichen Fall leicht überschätzt
- Grundsätzlich konnte der Trend bestätigt werden, dass bei höheren Temperaturen im nah stöchiometrischen Bereich sich mehr thermisches NO nach dem Zeldovich-Mechanismus formt

Laminare Brenngeschwindigkeit von H₂-N₂-Luft

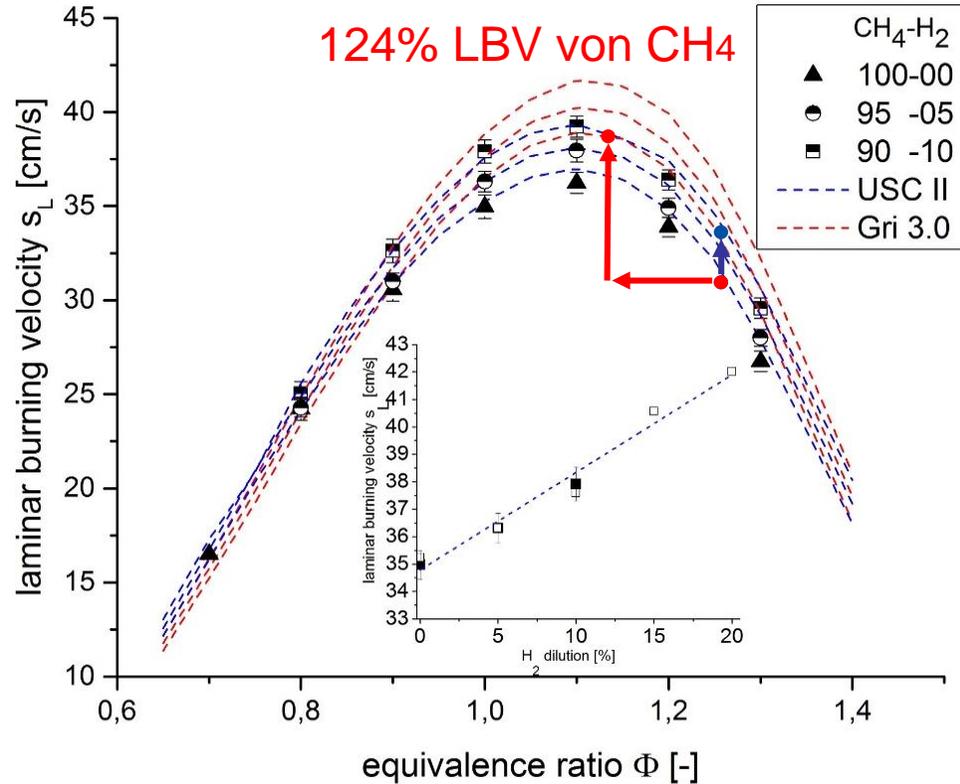


- 30% H₂ / Eckart 2017
- 25% H₂ / Eckart 2017
- ▲ 20% H₂ / Eckart 2017
- ▼ 18% H₂ / Eckart 2017
- △ 30% H₂ / Voss 2014
- ◁ 25% H₂ / Voss 2014
- ▷ 20% H₂ / Voss 2014
- ELTE 2013



Voss et al., 2014, doi: 10.1016/j.ijhydene.2014.09.093
 Eckart et al., 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2017.07.148

Laminare Brenngeschwindigkeit von CH₄/H₂



H ₂ Anteil	S _L (berech.)	Zunahme / 100% CH ₄
10%	~ 32cm/s	~ 10%
30%	~ 40cm/s	~ 37%

H ₂ Anteil	S _L (berech.) Mit Verschiebung	Zunahme / 100% CH ₄
10%	~ 36cm/s	~ 24%
30%	~ 47,5cm/s	~ 63%

Verschiebung der Brenngeschwindigkeit

- Wegen der unterschiedlichen Menge an benötigtem Sauerstoff der beiden Brenngase
- Der Effekt wird höher für einen zunehmenden Wasserstoffanteil im Gasnetz
- Wirkung im kraftstoffreichen Zustand viel stärker als im mageren Zustand

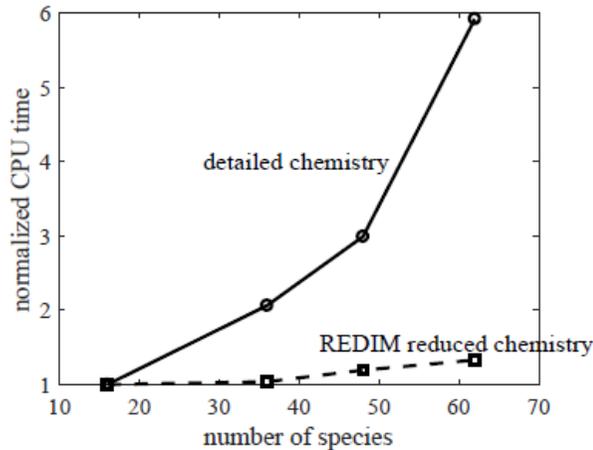
→ Brenner müssen neu berechnet werden

Fuel-lean	Fuel-rich
modern fuel-lean condensing boiler	cookers, ovens, Water heaters non-condensing boilers

Eckart et al.; NEFES 2018

Laminare Brenngeschwindigkeit von CH₄/H₂ im Vergleich mit reduzierter Chemie (REDIM)

Berechnung der laminaren Brenngeschwindigkeit

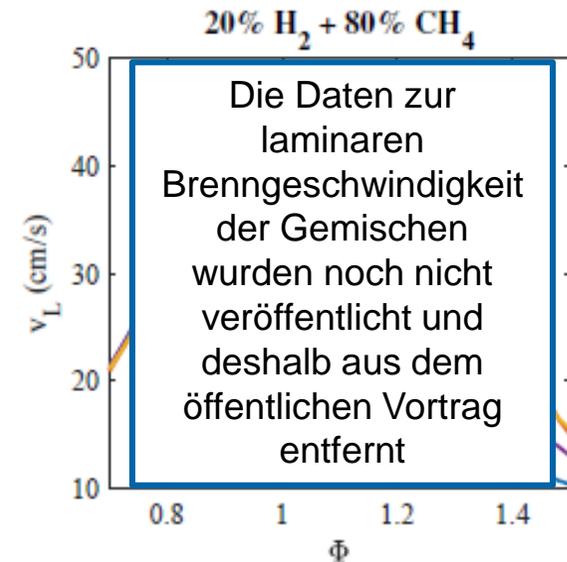
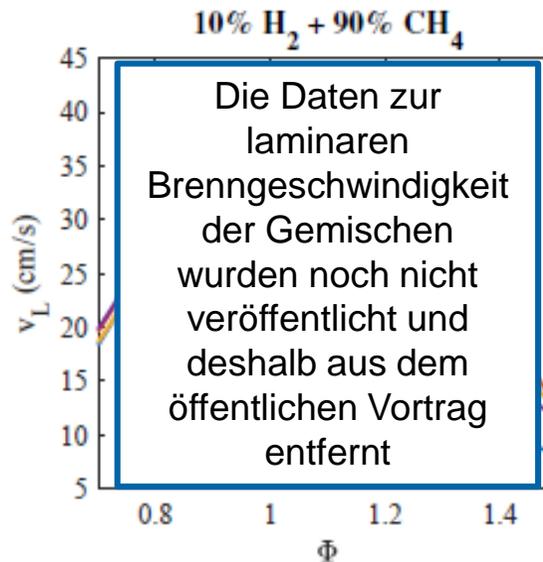
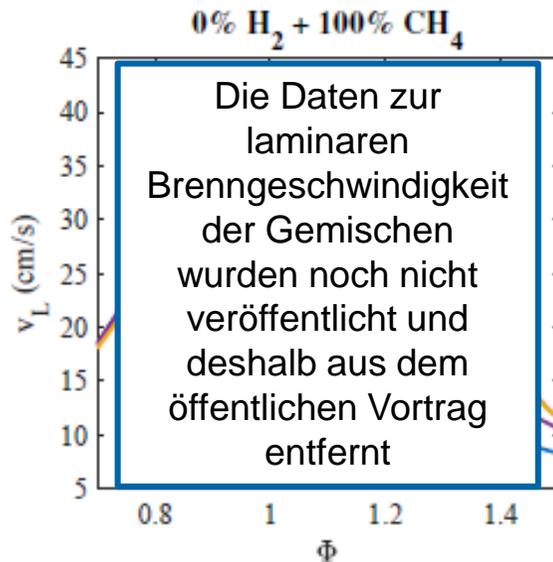


Hydrogen enriched methane laminar premixed flame: its experiment investigation and numerical simulation based on reaction-diffusion manifolds (REDIM) with detailed transport model

Chuncan Yu^a, Ömer Cokuslu^a, Ulrich Maas^a
Sven Eckart^b, Hartmut Krause^b

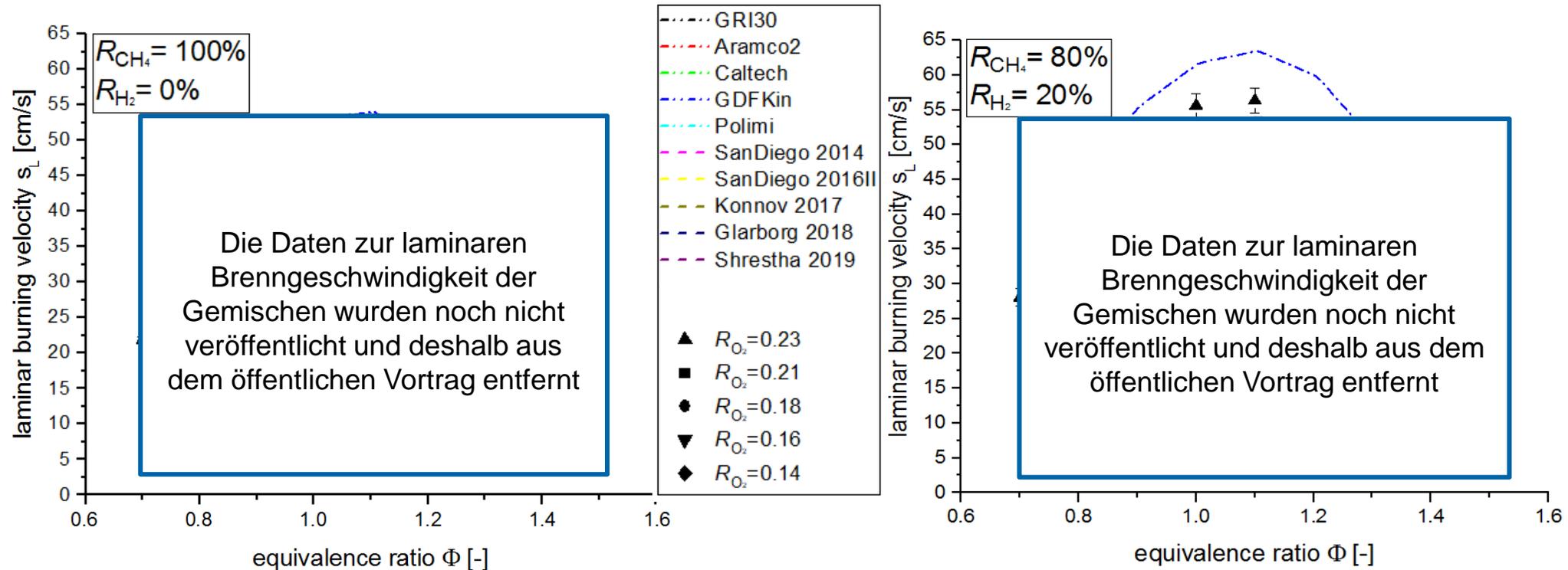
^aKarlsruhe Institute of Technology, Institute of Technical Thermodynamics, Germany;
^bTU Bergakademie Freiberg, Institute of Thermal Engineering, Germany

WIPP wird Ende 2019 eingereicht



Laminare Brenngeschwindigkeit von CH₄/H₂ im Vergleich mit detaillierten Reaktionsmechanismen

Mögliche Veränderungen in der Gasversorgung



Eckart¹; Zsély²; Krause¹ ECM 2019

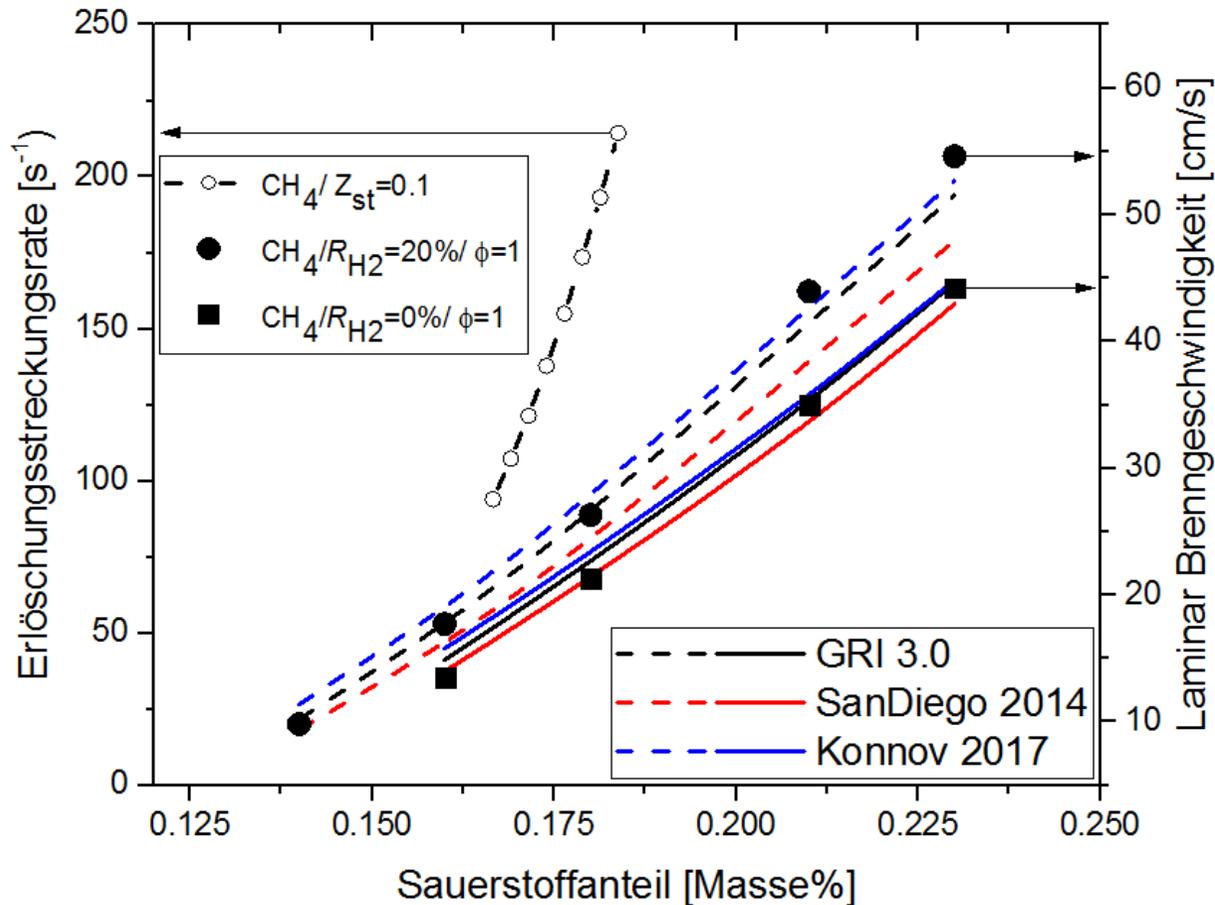
¹Institute of Thermal Engineering, TU Bergakademie Freiberg (TUBAF), **Freiberg, Germany**

²Institute of Chemistry, Eötvös University (ELTE), **Budapest, Hungary**

WIPP wird Ende 2019 eingereicht

Laminare Brenngeschwindigkeit von CH₄/H₂

Wie kann die Änderung des LBV mit H₂ im Erdgasnetz kompensiert werden werden?



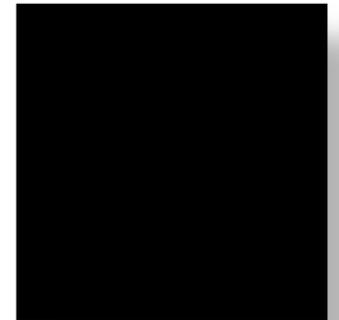
Numerischer Vergleich:

- 6 unterschiedliche Mechanismen getestet
- 3 mit der geringsten mittleren Abweichung dargestellt
- Alle Mechanismen konnten den Trend wiedergeben
- Mechanismus Konnov 2017 bietet die besten Vorhersagen
- Überinterpretiert im sauerstoffarmen Zustand leicht, dort zeigen GRI 3.0 und SanDiego Mechanismus bessere Voraussagen



Inhalt

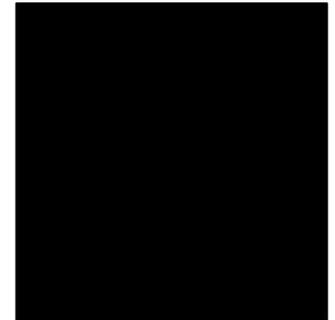
1. Einleitung
2. Brenner und Test-Setup
3. Ergebnisse und Diskussionen
4. Zusammenfassung



Zusammenfassung

- Heat Flux Brenner in Kombination mit einem Direktverdampfer, Coriolis-Massenstromregler und Hydrokolbenspeicher sorgen für eine hohe Reproduzierbarkeit und Genauigkeit bei flüssigen und gasförmigen Brennstoffen.
- Messung der laminaren Brenngeschwindigkeit wurden durchgeführt an: Methan-Luft und Wasserstoff-Luft-Gemischen, Ethanol-Luft, Syngas-Luft, niederkalorische Gemische, neue synthetische sauerstoffhaltige Kraftstoffe und Additive [OMEs] sowie Pentanone
- Für die gemeinsame Messkampagne lagen die Standardabweichungen über weite Bereiche $< 1,5$ cm/s.
- Mit dem Verfahren wurde verschiedene Methan-Wasserstoff-Sauerstoff-Stickstoff-Gemische untersucht, um mögliche Bedingungen in der Gasversorgung abzudecken.
- Die Verschiebung des Äquivalenzverhältnisses wurde qualifiziert. Reduzierung des Sauerstoffverhältnisses sowie Erhöhung des Stickstoffverhältnisses wurde untersucht und mit 10 detaillierten Reaktionsmechanismen verglichen.
- Berechnungen für reduzierte Mechanismen, Abgaskonzentrationen der untersuchten Gemische mit verringertem Sauerstoffanteil und Messung bis 40% H_2 sowie höheren Vorwärmtemperaturen sind in Arbeit.

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit



Kontakt:

Sven Eckart

TU Bergakademie Freiberg
Gustav-Zeuner-Straße 7
09599 Freiberg / Sachsen

Tel.: +49 (0) 3731 39-2721

Fax: +49 (0) 3731 39-3942

E-Mail: sven.eckart@iwtt.tu-freiberg.de

www.gwa.tu-freiberg.de