

NO_x emission and reduction from sewage sludge combustion in an entrained flow reactor

NO_x-Emission und Reduktion aus der Klärschlammverbrennung in einem Flugstromreaktor

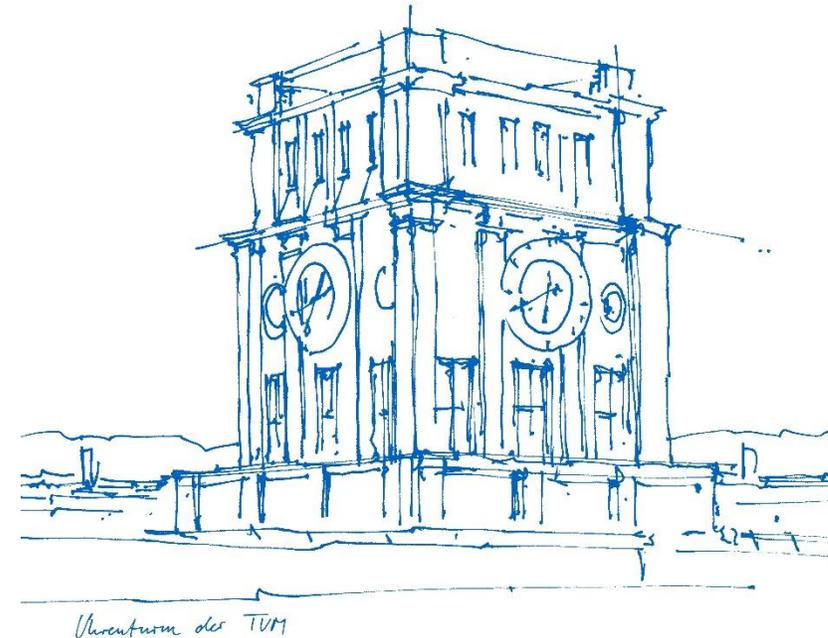
Gabriel Roeder

Technische Universität München

TUM School of Engineering and Design

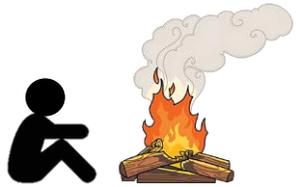
Lehrstuhl für Energiesysteme

Kraftwerktechnisches Kolloquium, 9. Oktober 2024



Hintergrund

Unerwünschte Nebenprodukte aus der Verbrennung



Wärme + Schadstoffe
PM, NO_x, SO_x

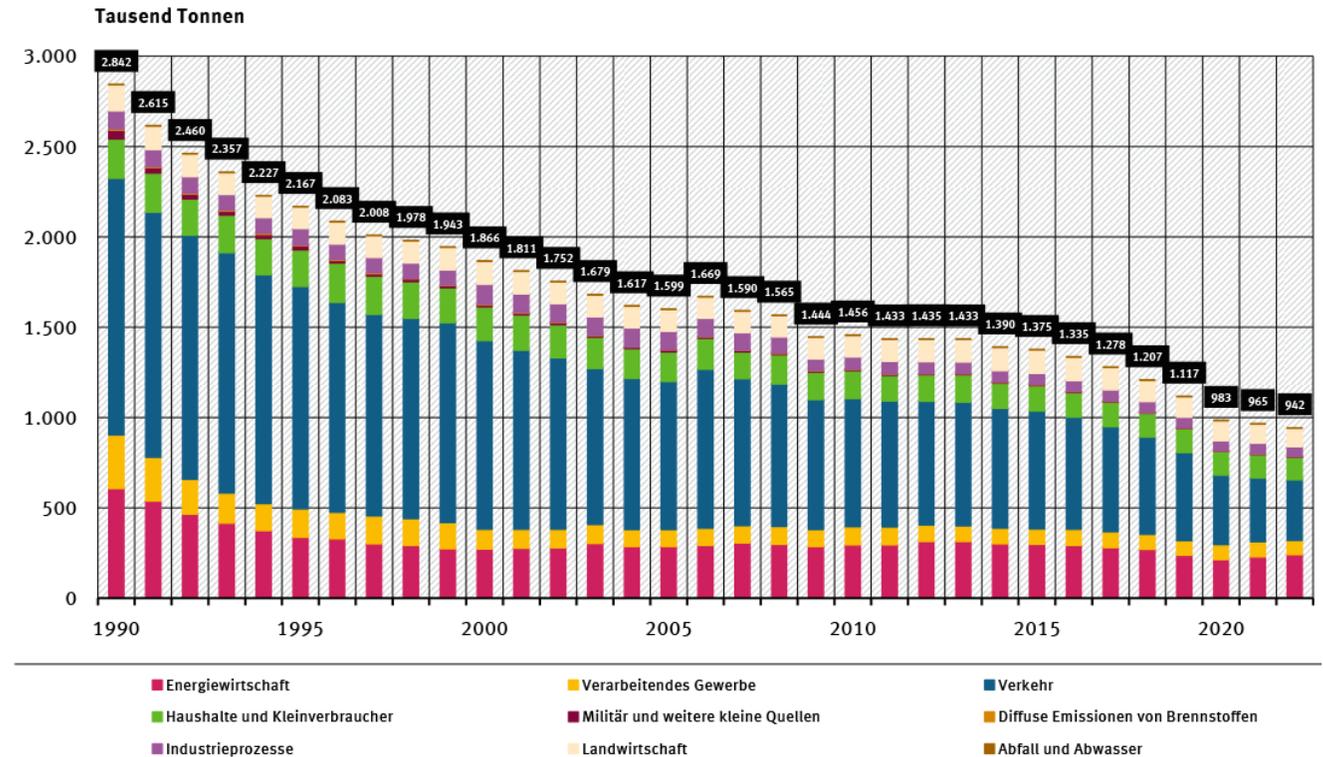
Verbrennung

NO_x ist verantwortlich für:

- Smog
- Sauer Regen
- Reizt die Atemorgane und ist schädlich für die Umwelt



Stickstoffoxid (NO_x, gerechnet als NO₂)-Emissionen nach Quellkategorien



Verkehr: ohne land- und forstwirtschaftlichen Verkehr
Haushalte und Kleinverbraucher: mit Militär und weiteren kleinen Quellen (u.a. land- und forstwirtschaftlichem Verkehr)

Quelle: Umweltbundesamt, Nationale Trendtabellen für die deutsche Berichterstattung atmosphärischer Emissionen seit 1990, Emissionsentwicklung 1990 bis 2022 (Stand 03/2024)

Quelle: Umweltbundesamt [1]

Grenzwerte der Emissionen : NO_x

Emissionen in Europa ➤ Directive 2010/75/EU

Termische Leistung	NO _x (i)	NO _x (ii)
P > 300 MW	200 mg/m ³	150 mg/m ³
300 MW < P < 100 MW	250 mg/m ³	200 mg/m ³
100 MW < P < 50 MW	300 mg/m ³	250 mg/m ³

- (i) Zulassung vor 2013
- (ii) Zulassung nach 2013

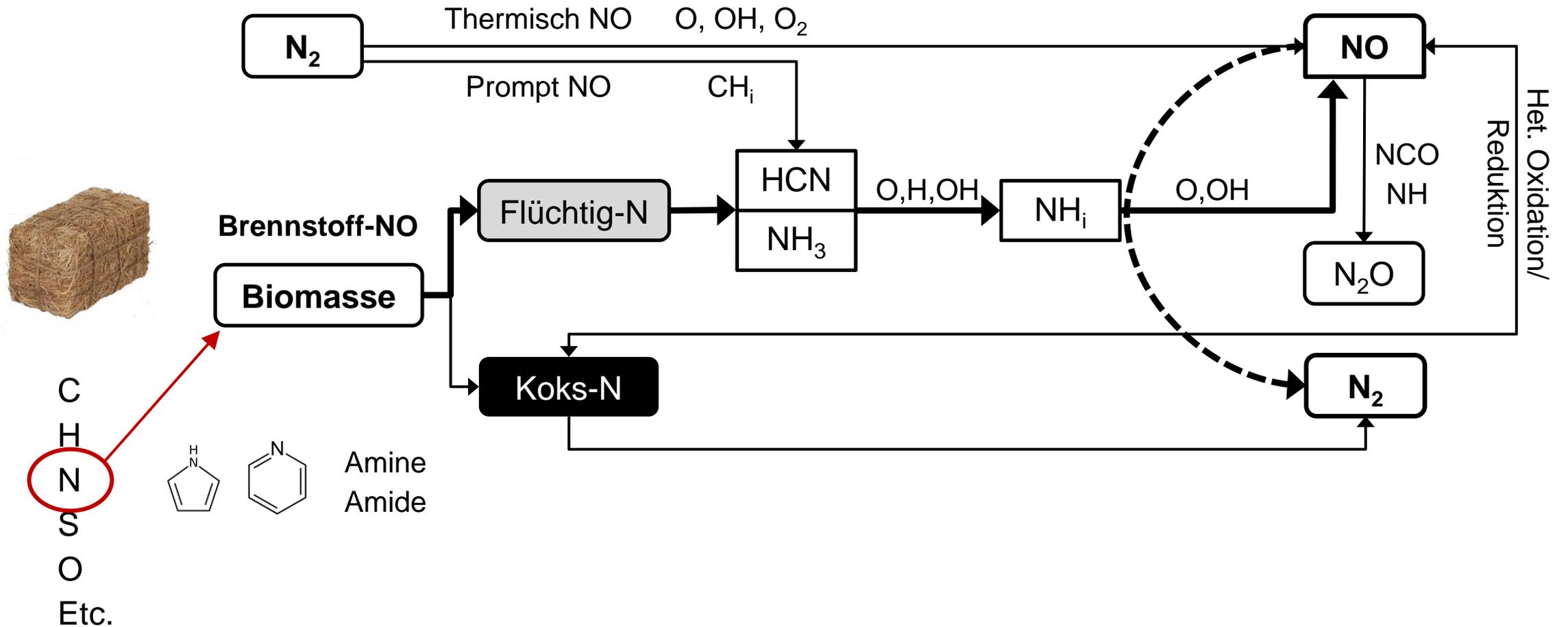
Emissionen in Deutschland ➤ 1., 13., 17. und 44. BImSchV

Termische Leistung	NO _x
P > 100 MW	100 mg/m ³
100 MW < P < 50 MW	150 mg/m ³
20 MW < P < 50 MW	200 mg/m ³
5 MW < P < 20 MW	300 mg/m ³
P < 5 MW	370 mg/m ³

Bezogen auf 6% O₂ für feste und biogene Brennstoffe

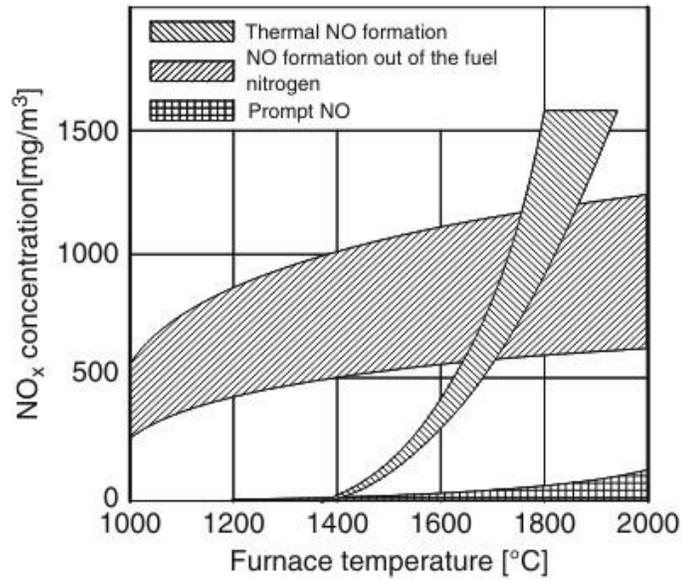
Stickoxide

Warum werden Stickoxide in der Verbrennung produziert?

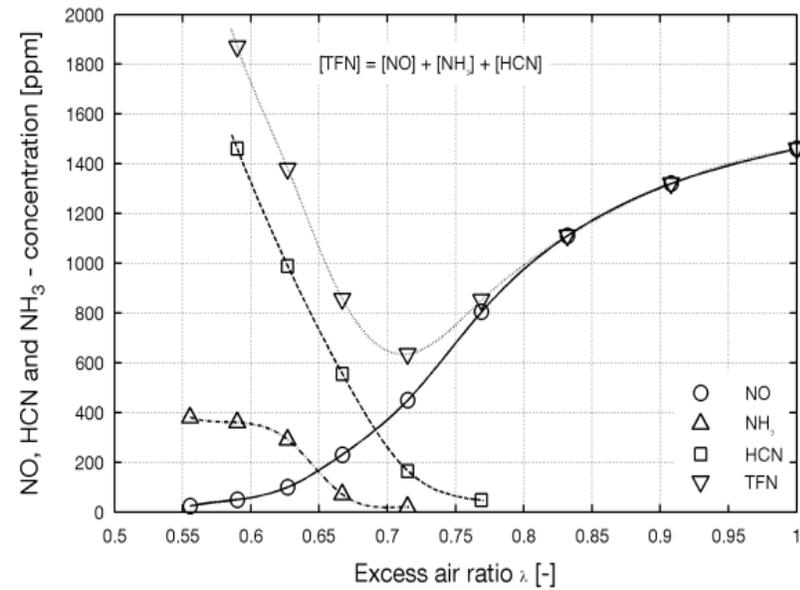


Stickoxide

Einflussfaktoren



Quelle: FNR [4]



Quelle: VDI Verlag [5]

- **Temperatur**
- **Stöchiometrie**
- **Verweilzeit**
- **Brennstoff**

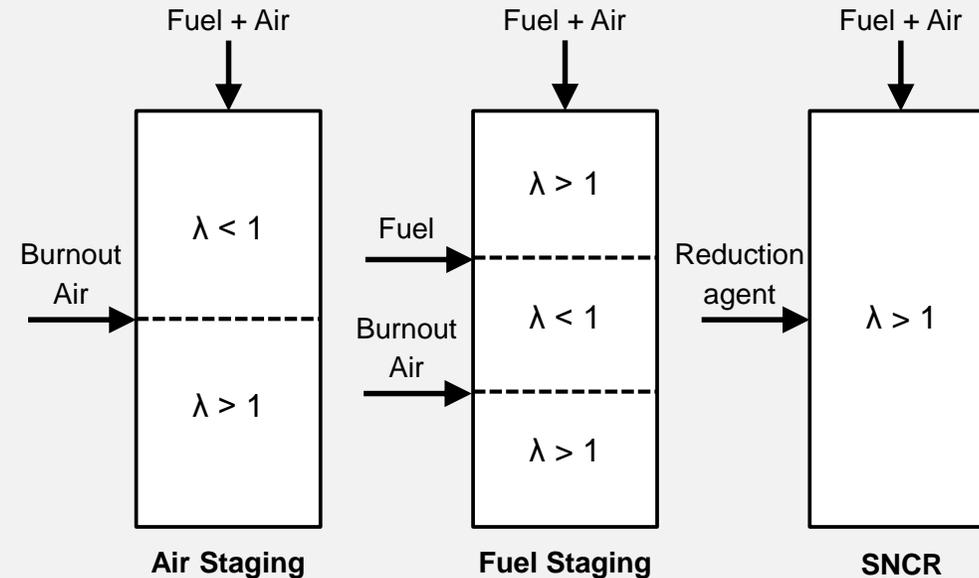
Minderungsmaßnahmen

- **Primär Maßnahmen (Feuerungstechnisch)**

- Luftstufung
- Brennstoffstufung
- Rauchgas Rezirkulation
- Additive
- Quenchen
- Oszillierende Verbrennung

- **Sekundär Maßnahmen (Rauchgasbehandlung)**

- SNCR
- SCR

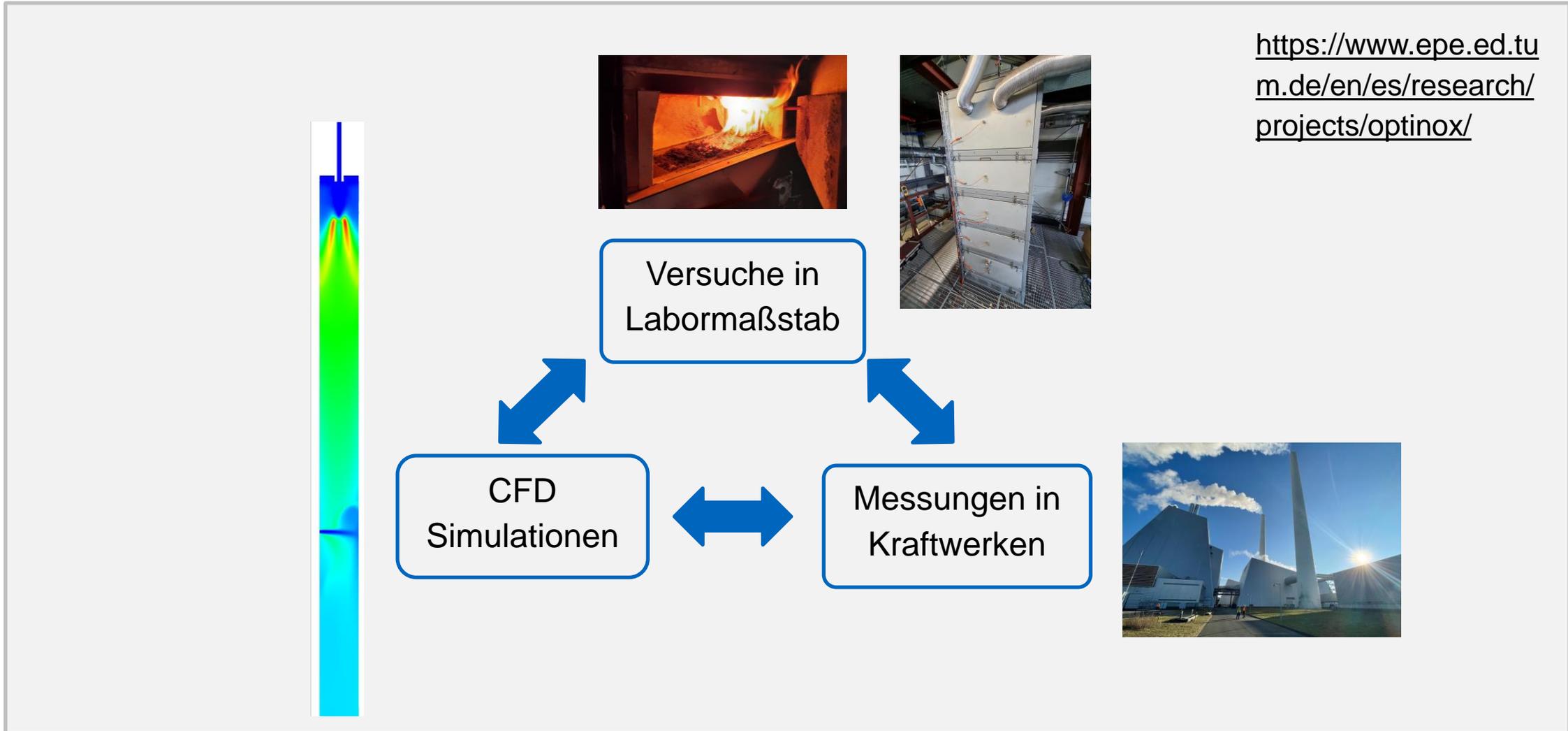


OptiNOx

Projekt OptiNOx hat als Ziel die Reduktion von NO_x und Vergleich der Technologien

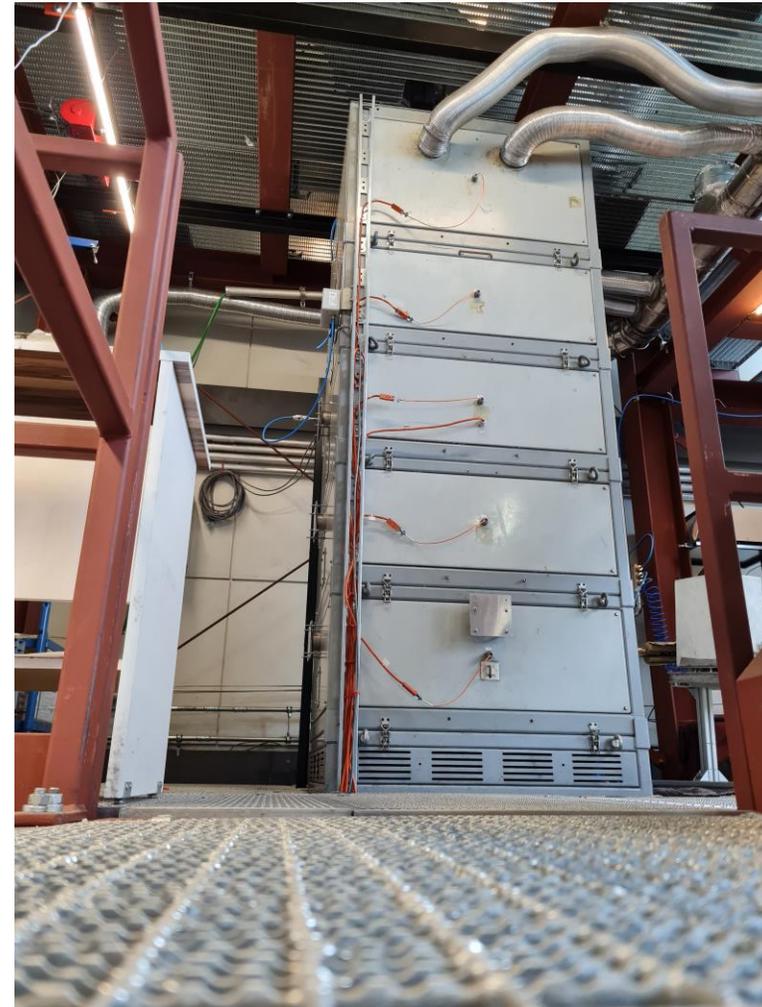


<https://www.epe.ed.tum.de/en/es/research/projects/optinox/>



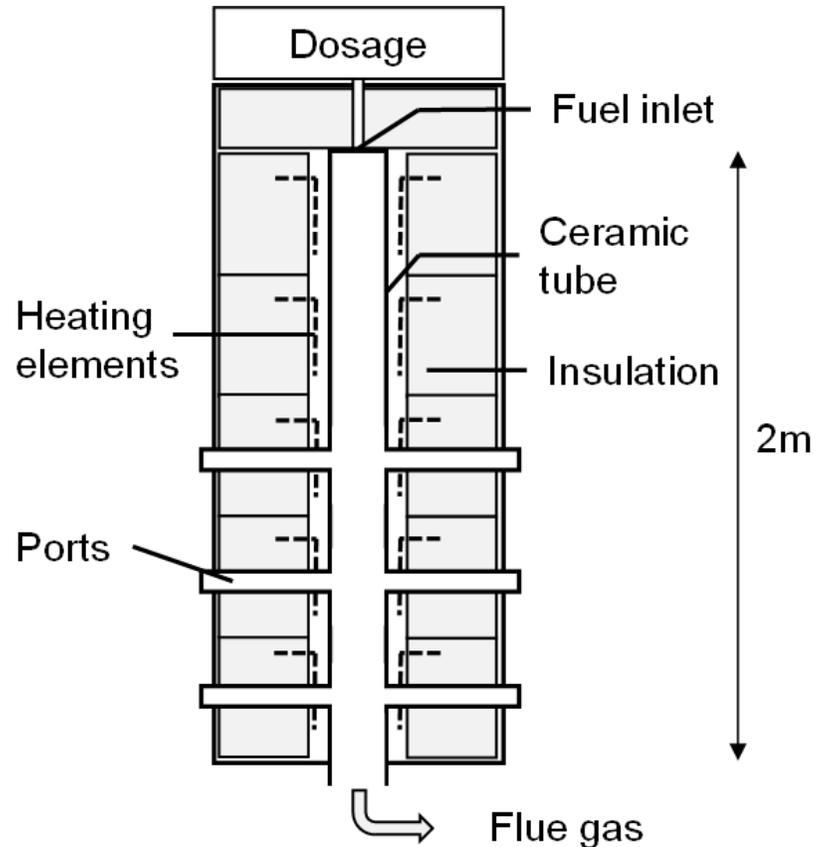
Agenda

1. Hintergrund und Motivation
 - i. Emissionen aus der Verbrennung
 - ii. Stickoxide
 - iii. Projekt OptiNOx
- 2. Versuchsbeschreibung**
 - i. Reaktor und Brennstoff
 - ii. Messungen
3. Ergebnisse
 - i. Temperature and stoichiometry
 - ii. Air staging
4. Conclusion



Versuchsbeschreibung

Versuchsanlage und Brennstoff



Schematische Darstellung des Reaktors

Top-down atmosphärischer Flugstromreaktor

- Elektrisch beheizt (50 kW) bis 1600 °C
- Reaktionsrohr aus Al_2O_3 (L = 2 m; Ø = 14,4 cm)
- Brennstoffmassenstrom: 0,3 – 3,5 kg/h
- Gasverweilzeit: 1 – 7 s

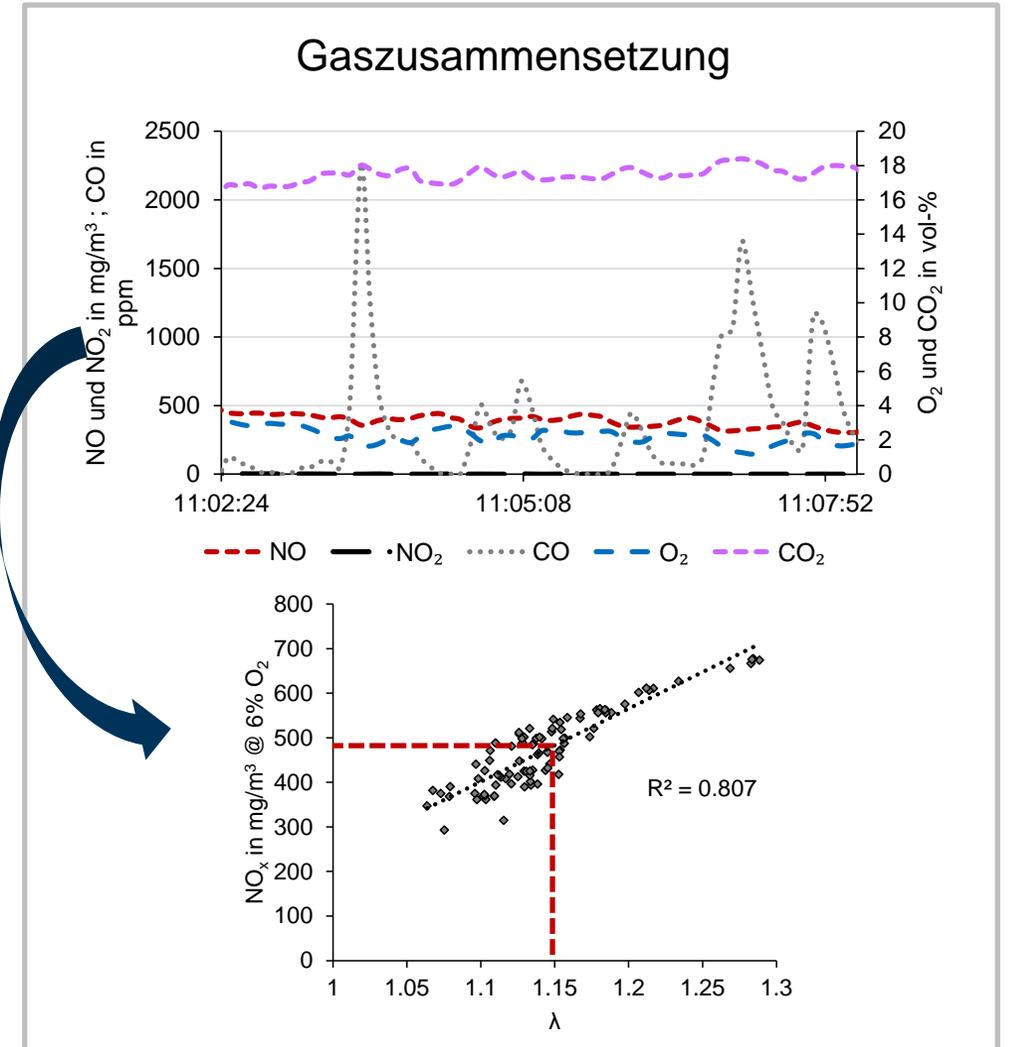
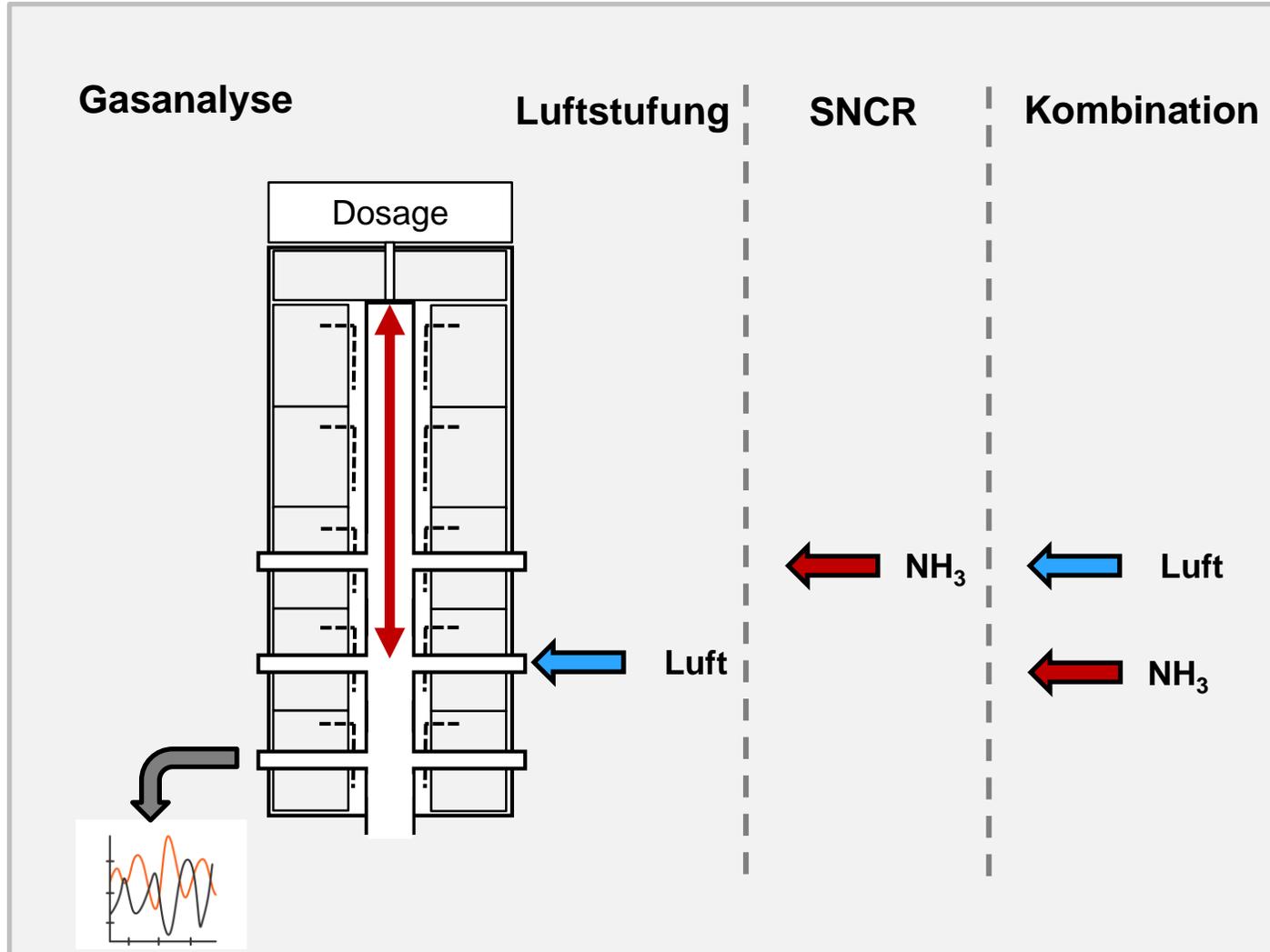
Brennstoff: Torrefizierter Klärschlamm

Fuel	C	H	N	S	O	a	Volatile	Fix C	LHV
	wt-% (db)								MJ/kg
SDG	31.37	3.16	4.45	0.78	15.20	45.04	51.37	3.59	12.62



Versuchsbeschreibung

Messungen und Auswertung



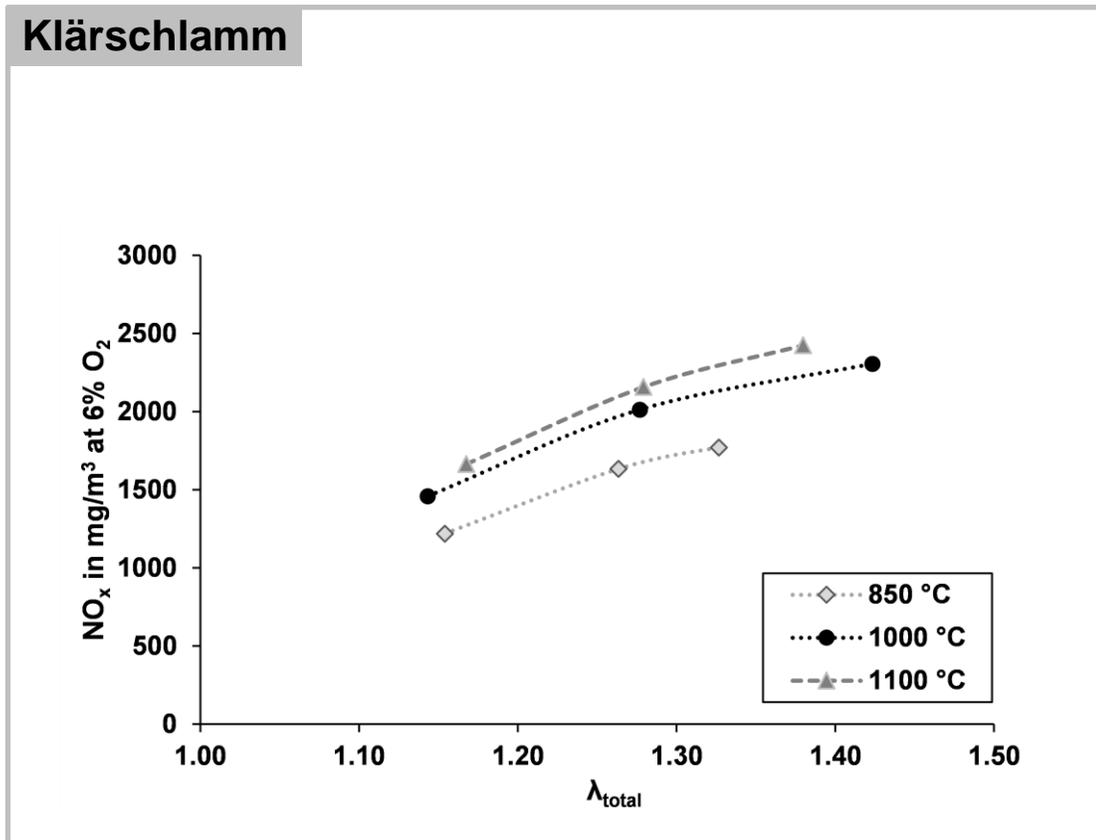
Agenda

1. Hintergrund und Motivation
 - i. Emissionen aus der Verbrennung
 - ii. Stickoxide
 - iii. Projekt OptiNOx
2. Versuchsbeschreibung
 - i. Versuchsanlage und Brennstoff
 - ii. Messungen
- 3. Ergebnisse**
 - i. Temperatur und Stöchiometrie
 - ii. Luftstufung
 - iii. SNCR und kombinierte Reduktionsverfahren
4. Zusammenfassung

NO_x Emissionen

Einfluss der Stöchiometrie und Temperatur

Brennstoff-N 4.45%



Stöchiometrie: höherer Sauerstoffgehalt führt zu erhöhten NO_x-Bildung

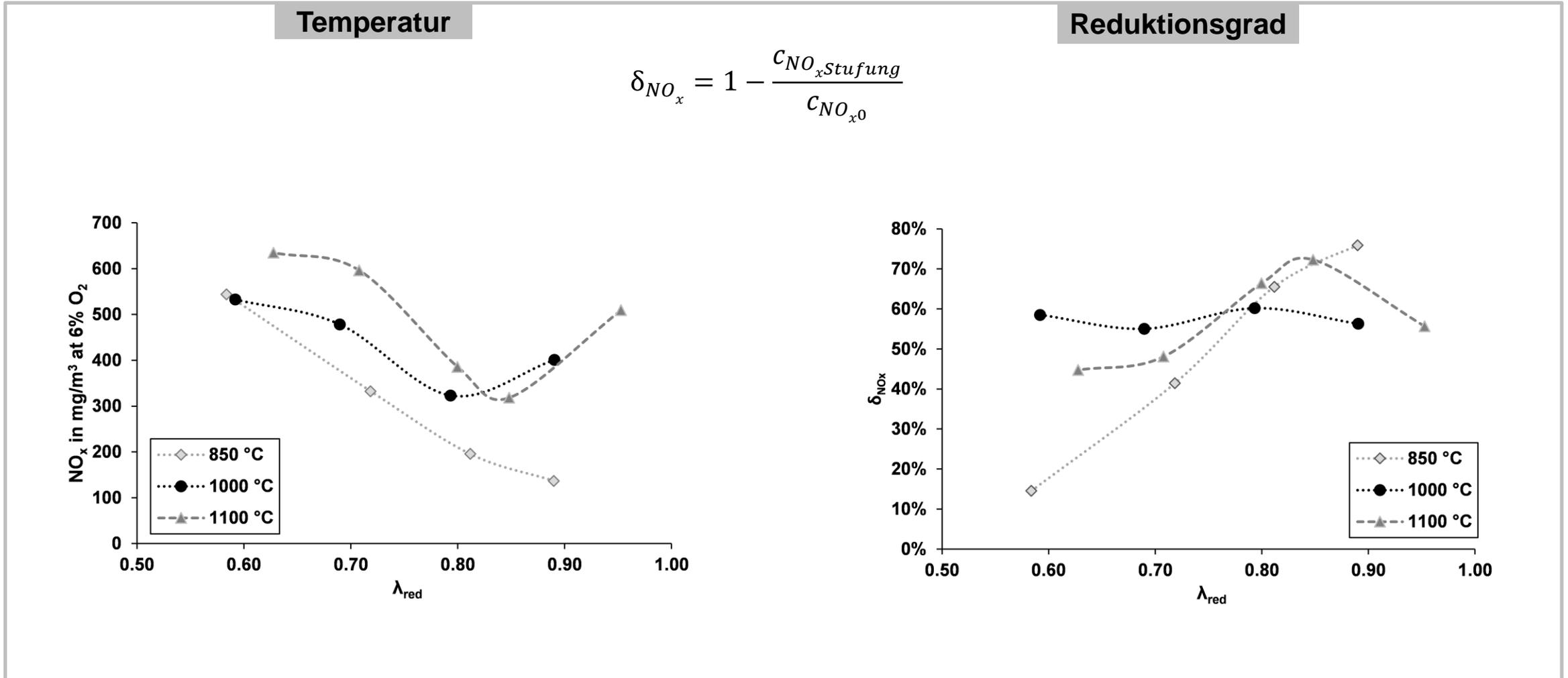
Temperatur: steigende Temperaturen haben zu Folge höhere NO_x-Werte

Brennstoff-N: durch den hohen N-Anteil sind hohe NO_x Werte zu erwarten

NO_x-Reduktion durch Luftstufung

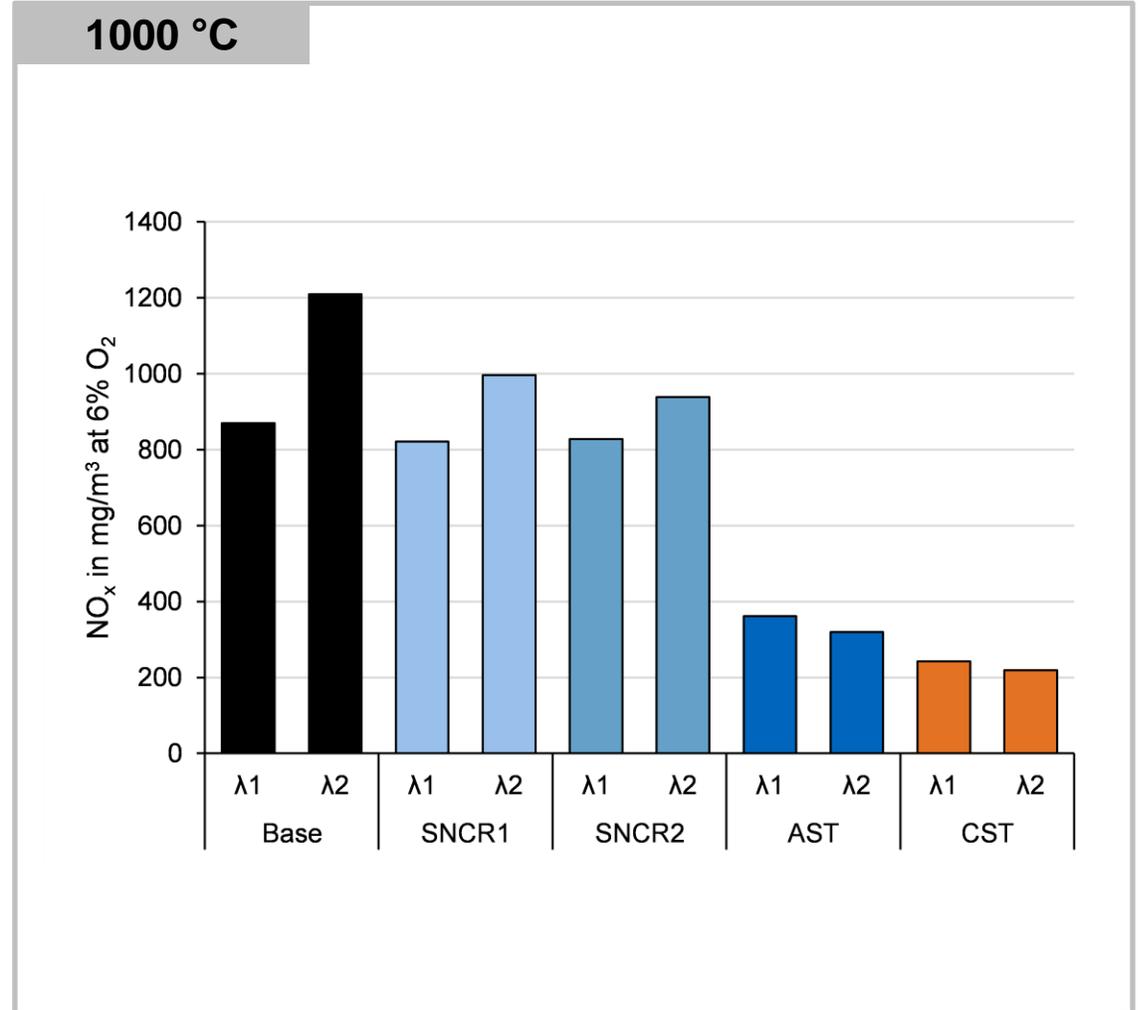
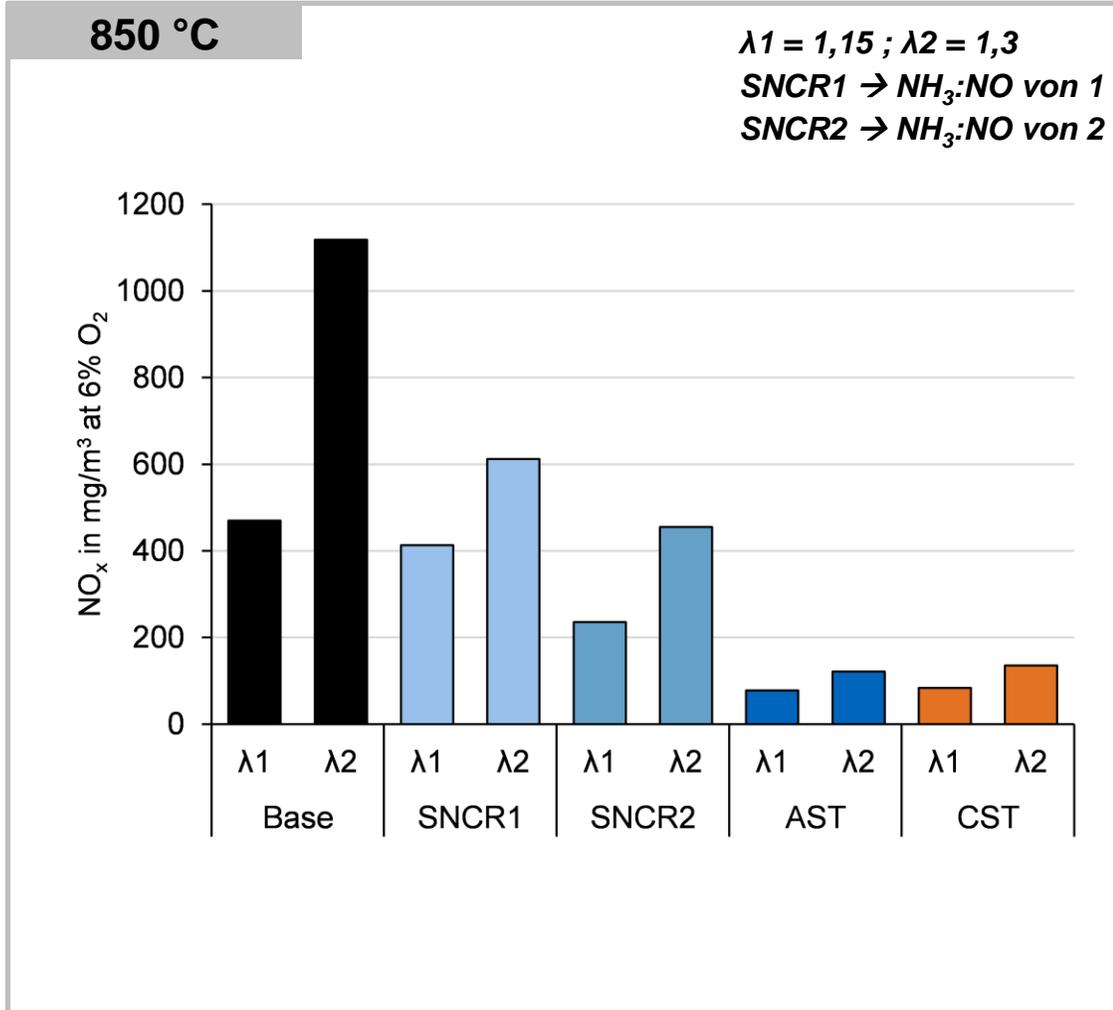
Einfluss der Stöchiometrie und Temperatur

Ziel $\lambda = 1,15$



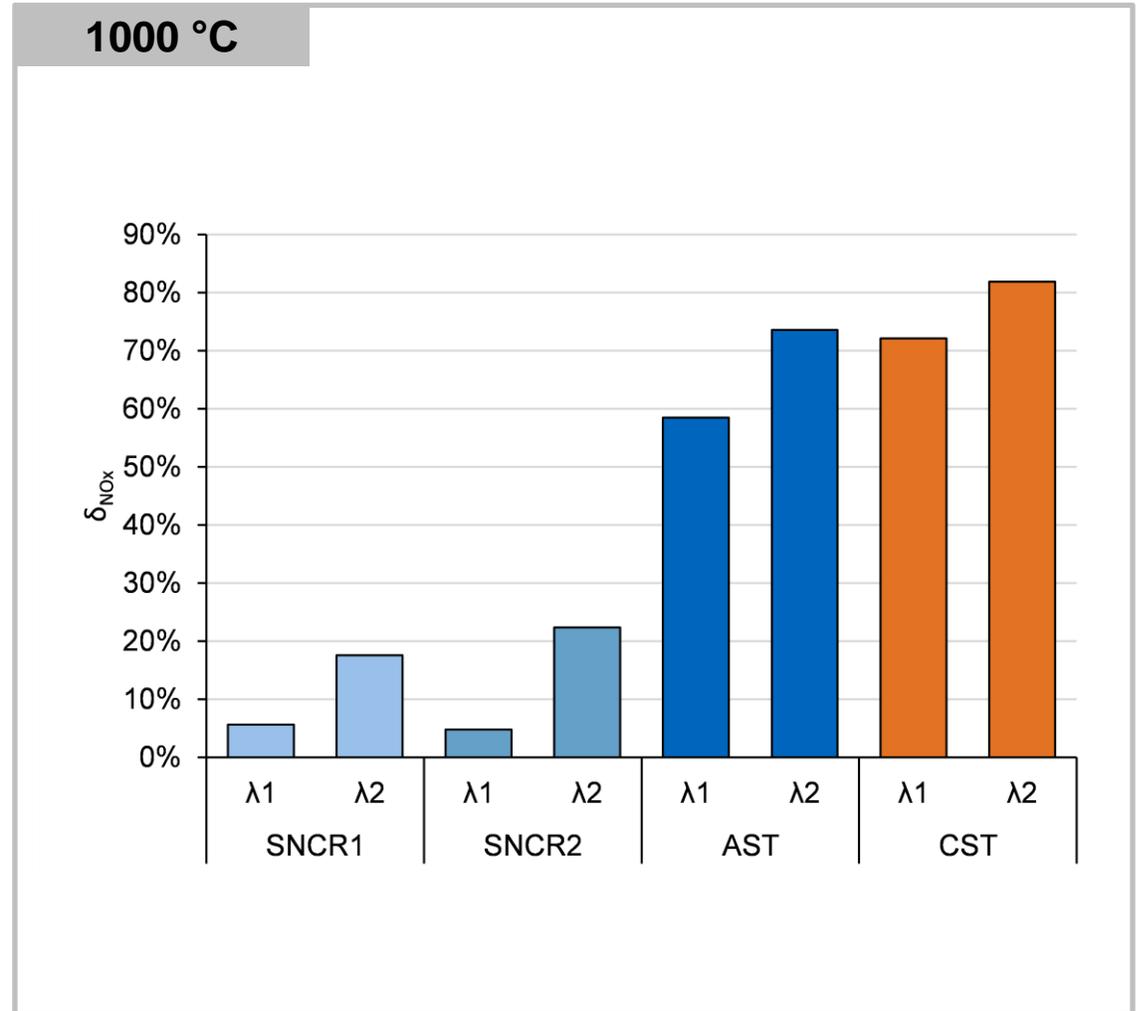
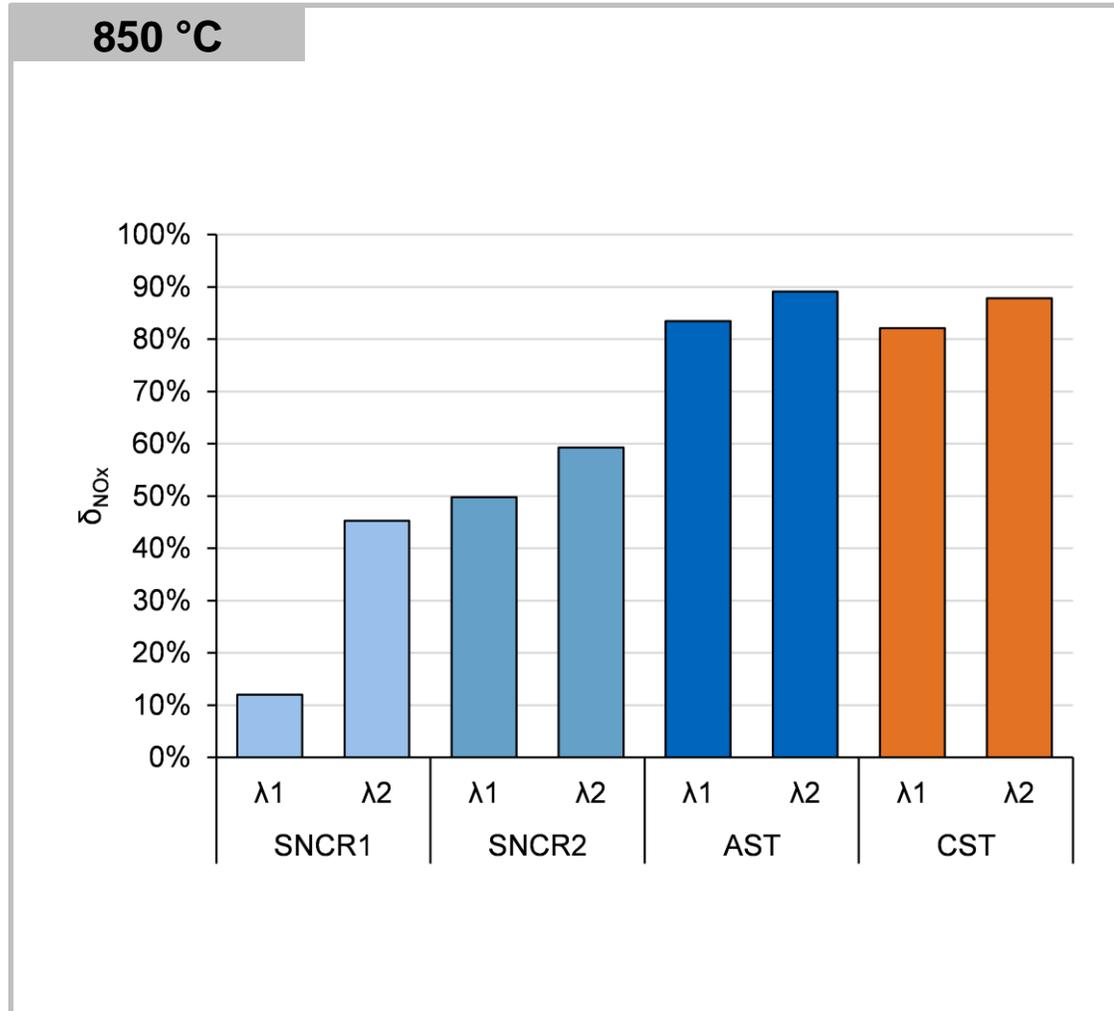
NO_x-Reduktion bei 850 und 1000 °C

Einfluss der Stöchiometrie bei der Reduktion mit Ammoniak und Luftstufung



NO_x-Reduktionsgrad bei 850 und 1000 °C

Einfluss der Stöchiometrie bei der Reduktion mit Ammoniak und Luftstufung



Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassung

- Luftstufung kann bei optimalen Bedingungen über 70% von NO_x reduzieren
- Luftstufung hat bessere Reduktionspotenzial als SNCR (als einzige Maßnahme)
- Temperatur und Stöchiometrie haben einen Einfluss
- Die Kombination der Reduktionsmaßnahmen hat niedrigere Emissionen erzielt
- Die optimale Betriebsbedingungen unterscheiden sich in der Temperatur
- Emissionen von Klärschlamm können unter dem Grenzwert gehalten werden (je nach Feuerungsgröße und -temperatur)

Ausblick

- Einsatz der Reduktionsverfahren bei optimalen Betriebsbedingungen
- Brennstoffeinfluss auf die Reduktionsmaßnahmen (andere Klärschlämme oder Brennstoffe)
- Simulationen der Messungen → Optimierungsmaßnahmen

Danke für die Zeit und
Aufmerksamkeit

Gabriel Roeder

gabriel.roeder@tum.de

Technical University of Munich

TUM School of Engineering and Design

Chair of Energy Systems



References

- [1] <https://www.umweltbundesamt.de/daten/luft/luftschaedstoff-emissionen-in-deutschland/stickstoffoxid-emissionen#entwicklung-seit-1990>
- [2] <https://www.umweltbundesamt.de/themen/luft/luftschaedstoffe-im-ueberblick/stickstoffoxide#undefined>
- [3] Glarborg, Peter; Miller, James A.; Ruscic, Branko; Klippenstein, Stephen J. (2018): Modeling nitro-gen chemistry in combustion. In *Progress in Energy and Combustion Science* 67, pp. 31–68
- [4] FNR, *Leitfaden Bioenergie: Planung, Betrieb und Wirtschaftlichkeit von Bioenergieanlagen*. Seite 102
- [5] Eberius, H.; Just, T.; Kelm, S.: *NO_x-Schadstoffbildung aus gebundenem Stickstoff in Propan-Luft-Flammen*. VDI-Bericht Nr. 498, Düsseldorf: VDI-Verlag