

# HOCHDRUCKTESTS VON WASSERSTOFF- KRAFTSTOFFINJEKTOREN IN EINER DREISEKTOR-FETT-MAGER-BRENNKAMMER FÜR DAS ROLLS-ROYCE PEARL 15 WASSERSTOFF-DEMONSTRATOR- TRIEBWERKSPROGRAMM

Vortragender: S. Eisenring

Publikationsautoren: S. Eisenring<sup>1</sup>, T. Behrendt<sup>1</sup>, J. Berger<sup>1</sup>, P. Tiessen<sup>1</sup>, B. Janus<sup>1</sup>, C. Clemen<sup>2</sup>

Publikations-ID: DLRK2024-630101

<sup>1</sup> Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V., Institut für Antriebstechnik, Linder Höhe, 51147 Köln

<sup>2</sup> Rolls-Royce Deutschland Ltd. & Co. KG, Eschenweg 11, 15827 Blankenfelde-Mahlow

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

**Förderkennzeichen:**

20M2104A (RRD) und 20M2104B (DLR)



- Übersicht Versuchskampagne
- Experimentelles Setup
  - Messaufbau
  - Bildbearbeitung und -darstellung
- Resultate
  - Unterschiede im  $\text{NO}_x$ -Verhalten
  - Flammenbild bei nominellem Idle-Lastpunkt
  - Flammenbild bei Injektor AFR Variation
- Zusammenfassung

# ÜBERBLICK VERSUCHSKAMPAGNE

# Übersicht Versuchskampagne



## Ziele der Testkampagne

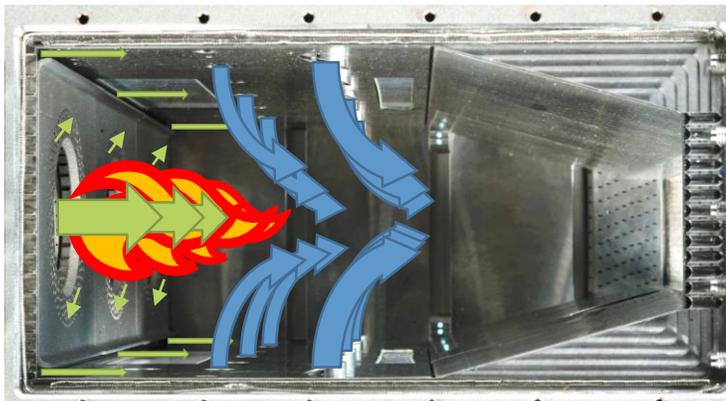
1. Validierung der bisherigen Beobachtungen bei atmosphärischen Bedingungen für zwei  $H_2$ -Injektoren von RRD bei mittleren Drücken in der **H**igh-**O**ptical Access **T**riple-**S**ector Messstrecke (HOTS)
2. Untersuchung der Flammenstabilisierung und des  $NO_x$ -Verhaltens bei Änderung der Stoichiometrie anhand der  $OH^*$ -Chemilumineszenz und Wasserdampfstrahlung

# EXPERIMENTELLES SETUP

# Experimentelles Setup - Messaufbau

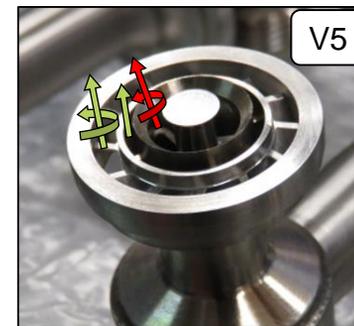
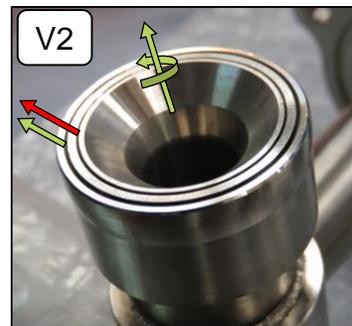
## HOTS – Messstrecke

Drei-Sektor Brennkammer  
 Optischer Zugang  
 Rich-Quench-Lean Technologie



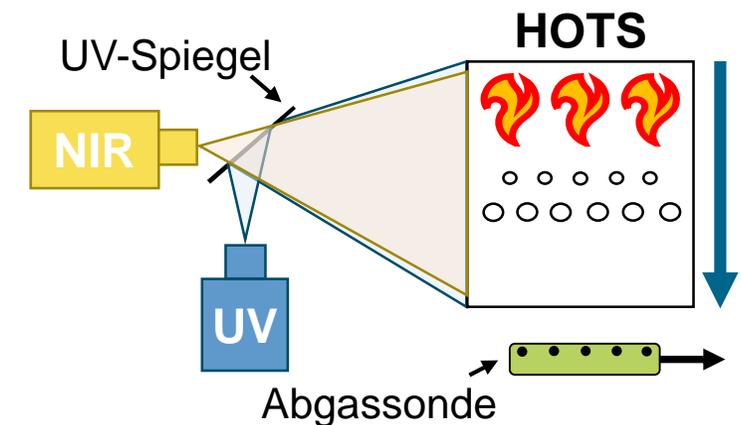
## RRD – Injektoren

V2: exzentrische Kraftstoffführung  
 V5: zentrale Kraftstoffführung  
 Kleinere Luftauslassfläche für V2,  
 d. h. weniger Kraftstoff bei gleichem Inj. AFR



## Messtechnik

Aufnahme von OH\*-Chemilumineszenz (UV)  
 und Wasserdampfstrahlung (NIR)  
 NO<sub>x</sub>-Messung im Abgas



- **Betriebsbedingung:** Idle-Lastpunkt
- **Messprogramm:** Injektor AFR-Variation (fett)

weniger Kraftstoff	Referenz AFR	mehr Kraftstoff
116%	100%	87%

## Bildbearbeitung

- Mittelung über 200 (UV) bzw. 400 (IR) Einzelaufnahmen
- Median-Filter (5x5 Pixel)

## Bilddarstellung

- Platzierung von strömungsrelevanten Brennkammergeometrien im Diagramm
- Platzierung der Fensterrahmen im Diagramm
- Line-of-Sight
- Entfaltung (**nur** in der Primärzone)

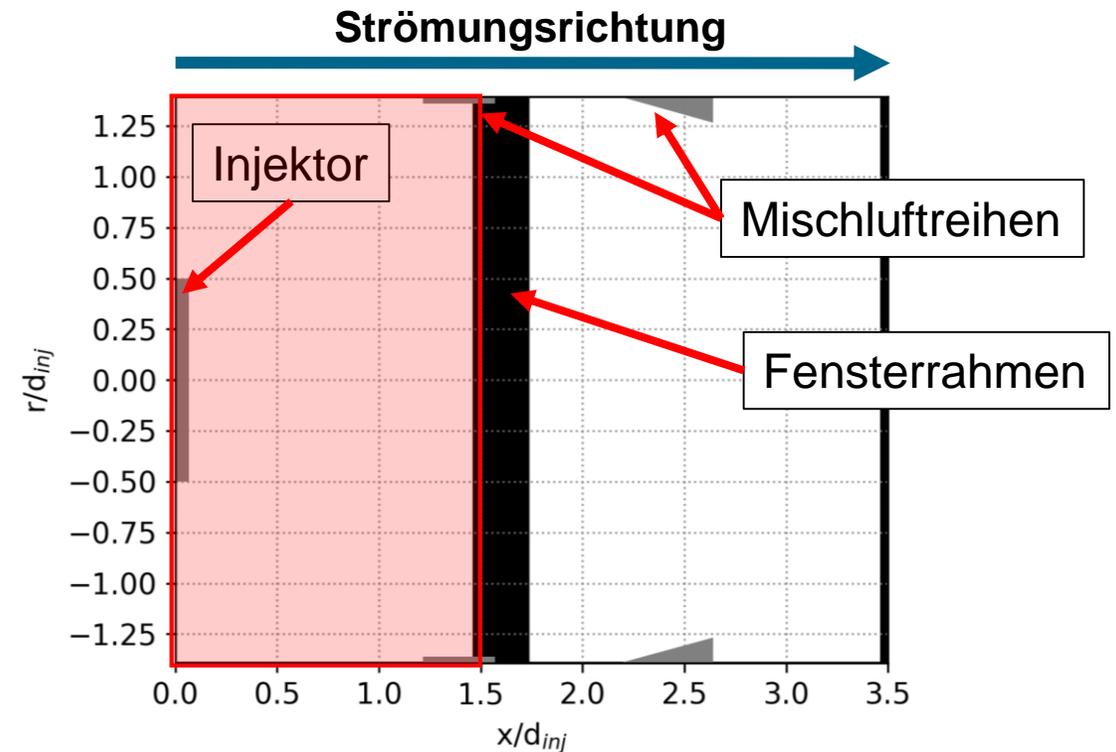


Fig. 1: Diagrammdarstellung der Kameraaufnahmen

# RESULTATE

## Beobachtung

1. Doppelter NO<sub>x</sub>-EI von V2 gegenüber V5 bei fetterem Injektor AFR
2. Hohe NO<sub>x</sub>-Sensitivität bezüglich Injektor AFR von V2 im Vergleich zu V5

## Hypothesen

1. **Absolute Differenz der NO<sub>x</sub>-EI's durch unterschiedliche zonale AFR's und Verbrennungsmodi erklärbar**
2. NO<sub>x</sub>-Insensitivität von V5 durch Intensivierung der Wärmefreisetzung in inneren Rezirkulationszone (IRZ) mit steigendem AFR erklärbar

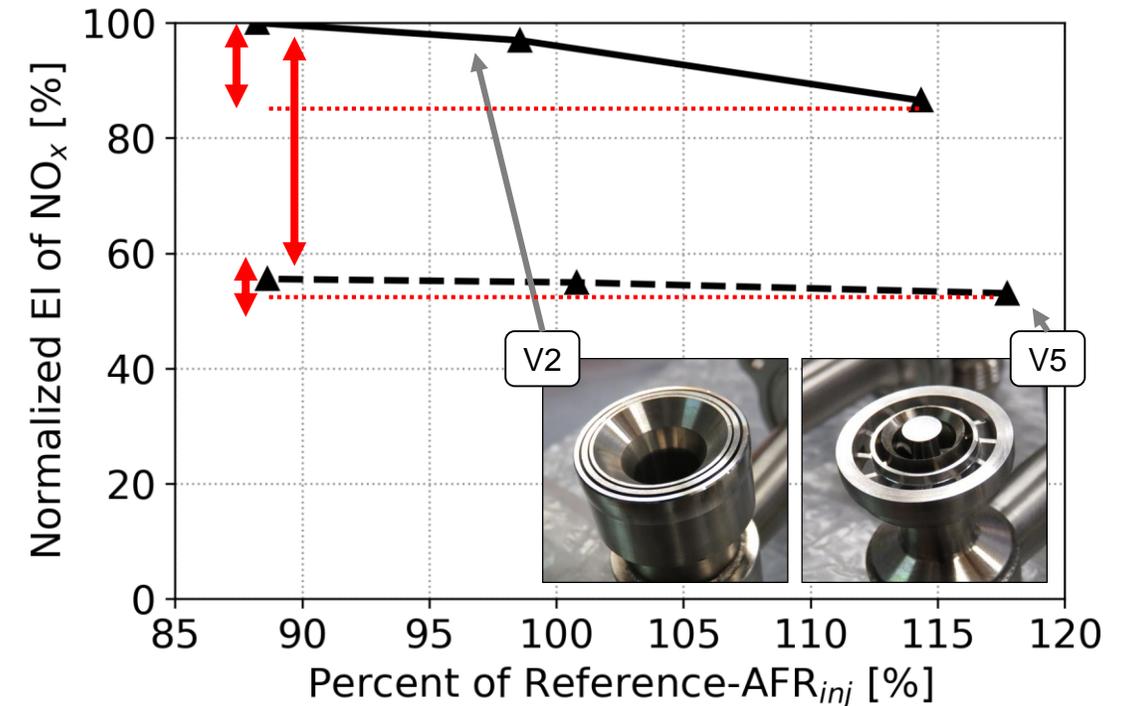


Fig. 2: NO<sub>x</sub>-Verhalten beider Injektoren

# Resultate – Flammenbild bei nominellem Idle-Lastpunkt I

## Beobachtungen V2

- Verankerte Flamme
- Wärmefreisetzung nahe zur Brennkammerwand
- Heisse Abgase in äusserer und innerer Rezirkulationszonen (ORZ und IRZ)

## Beobachtungen V5

- Abgehobene Flamme
- Schwache Wärmefreisetzung nahe zur Brennkammerwand
- Keine heissen Abgase in ORZ, heisse Abgase in IRZ

Primärzone  
magerer

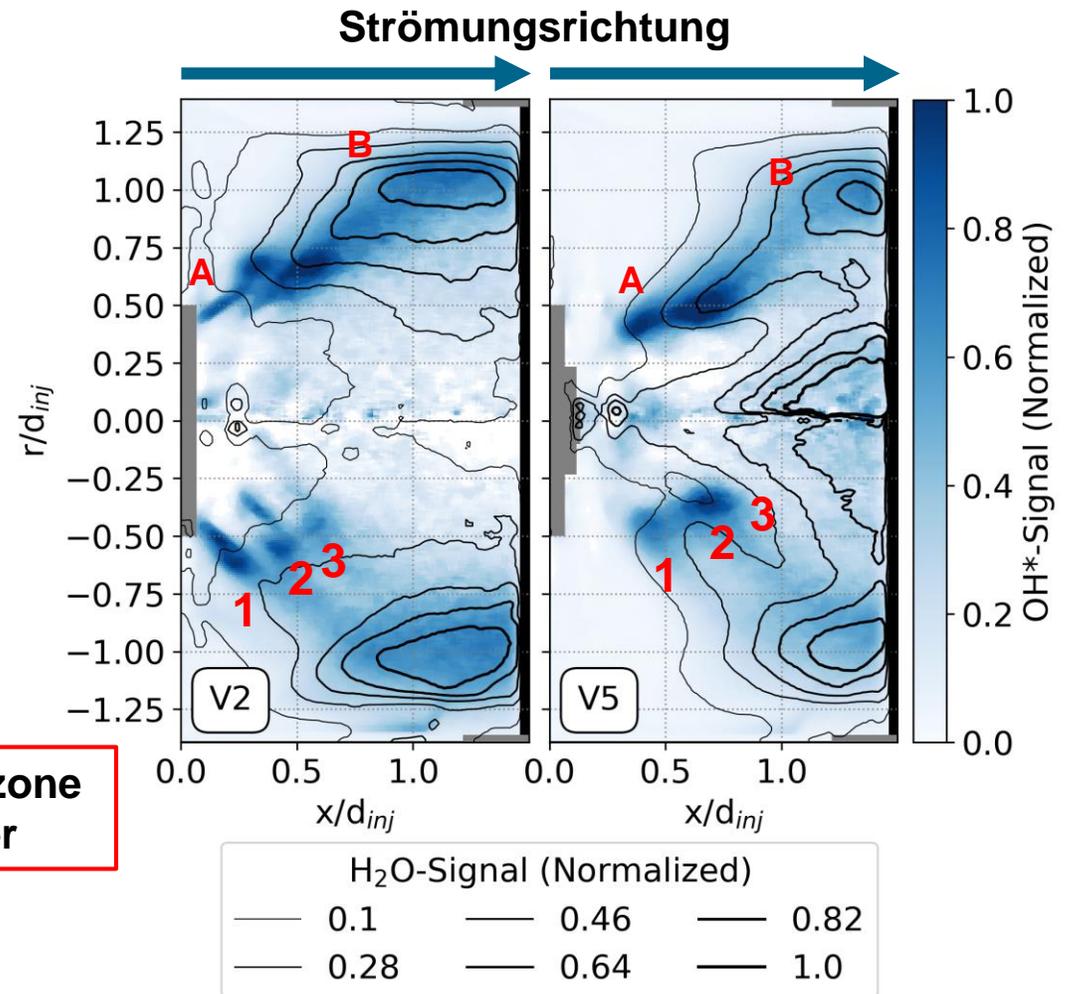
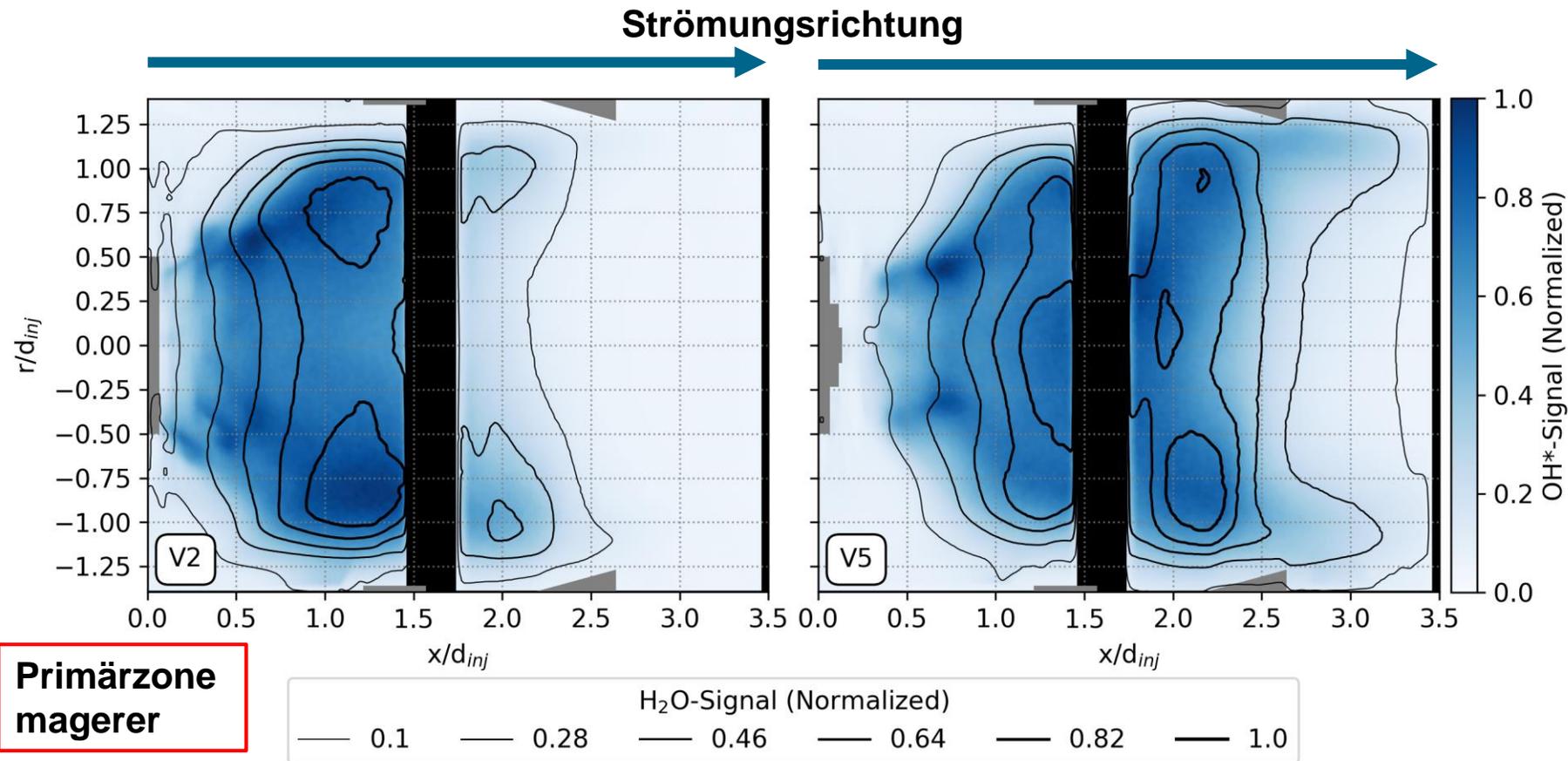


Fig. 3: Entfaltete OH\*- und Wasserdampfaufnahmen beim Referenz Injektor AFR

# Resultate – Flammenbild bei nominellem Idle-Lastpunkt II



**Fig. 4:** Line-of-sight OH\* und Wasserdampfaufnahmen beim Referenz Injektor AFR

- Wärmefreisetzung bei V2 in Primärzone abgeschlossen, wegen hohem globalem AFR und Interaktion zwischen Kraftstoff und Wandkühlluft
- Wärmefreisetzung bei V5 bis ans Ende der Mischzone, wegen Kraftstoffplatzierung und niedrigerem globalem AFR

# Resultate – Unterschiede im NO<sub>x</sub>-Verhalten (Recap)

## Beobachtung

1. Doppelter NO<sub>x</sub>-EI von V2 gegenüber V5 bei fetterem Injektor-AFR
2. Hohe NO<sub>x</sub>-Sensitivität bezüglich Injektor-AFR von V2 im Vergleich zu V5

## Hypothesen

1. Absolute Differenz der NO<sub>x</sub>-EI's durch unterschiedliche zonale AFR's und Verbrennungsmodi erklärbar
2. **NO<sub>x</sub>-Insensitivität von V5 durch Intensivierung der Wärmefreisetzung in inneren Rezirkulationszone (IRZ) mit steigendem AFR erklärbar**

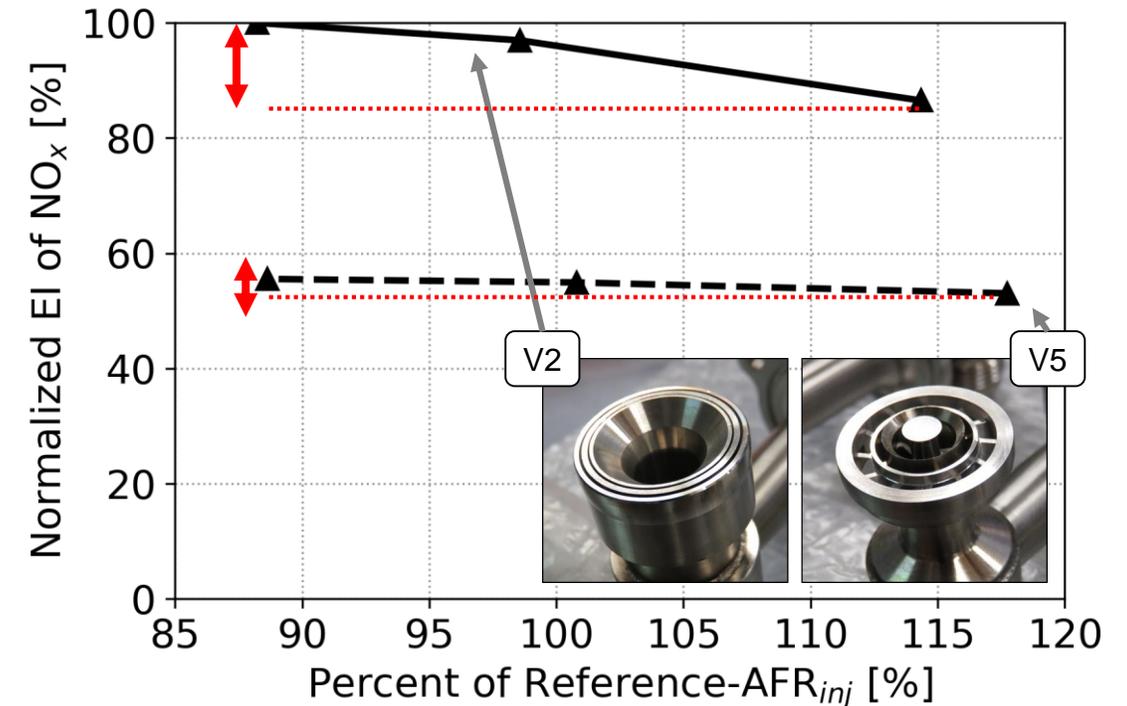


Fig. 3: NO<sub>x</sub>-Verhalten beider Injektoren

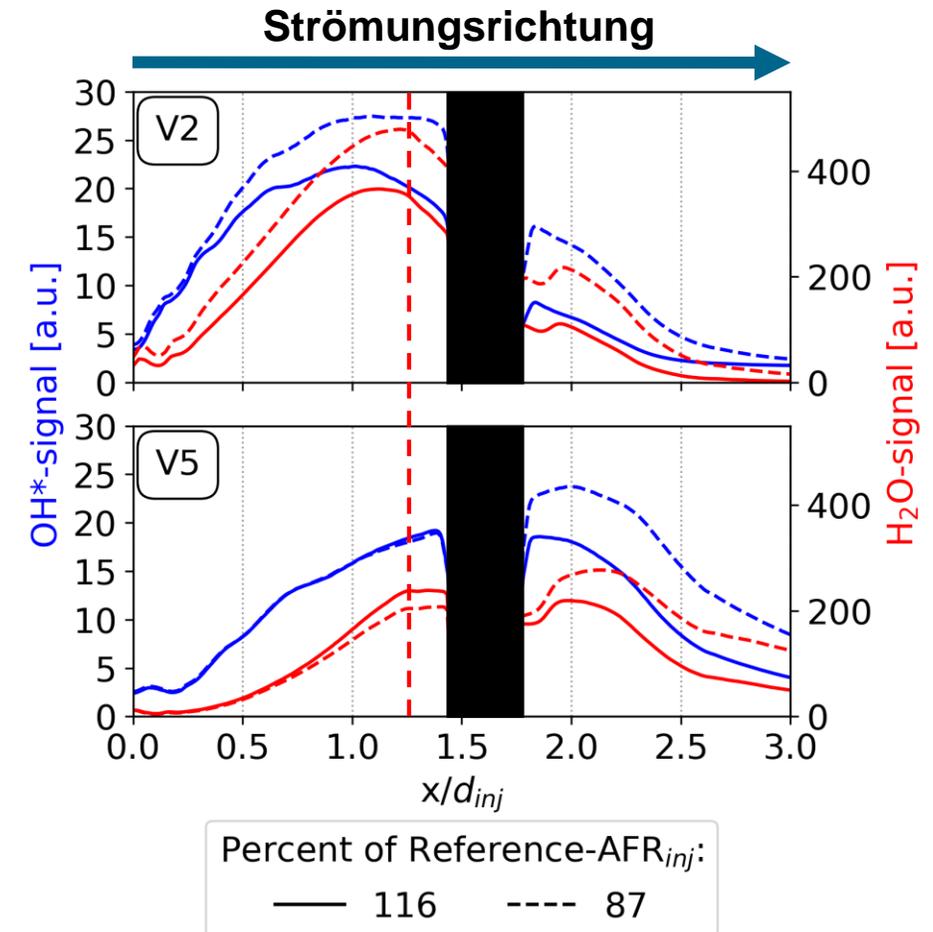
# Resultate – Flammenbild bei Injektor AFR Variation I

## Beobachtungen V2

- Wärmefreisetzung sinkt mit steigendem Injektor AFR
- Peak der Wärmefreisetzung verschiebt sich Richtung Injektor mit steigendem Injektor AFR
- H<sub>2</sub>O-Signal sinkt mit steigendem Injektor AFR

## Beobachtungen V5

- Wärmefreisetzung in PZ konstant über Injektor AFR, sinkt stromab der 1. Mischluftreihe
- Peak der Wärmefreisetzung in der Mischzone
- H<sub>2</sub>O-Signal steigt in PZ und sinkt stromab der 1. Mischluftreihe mit steigendem Injektor AFR



**Fig. 5:** Profil des radial-gemittelten OH\*- und Wasserdampfsignals über die Brennkammerlänge

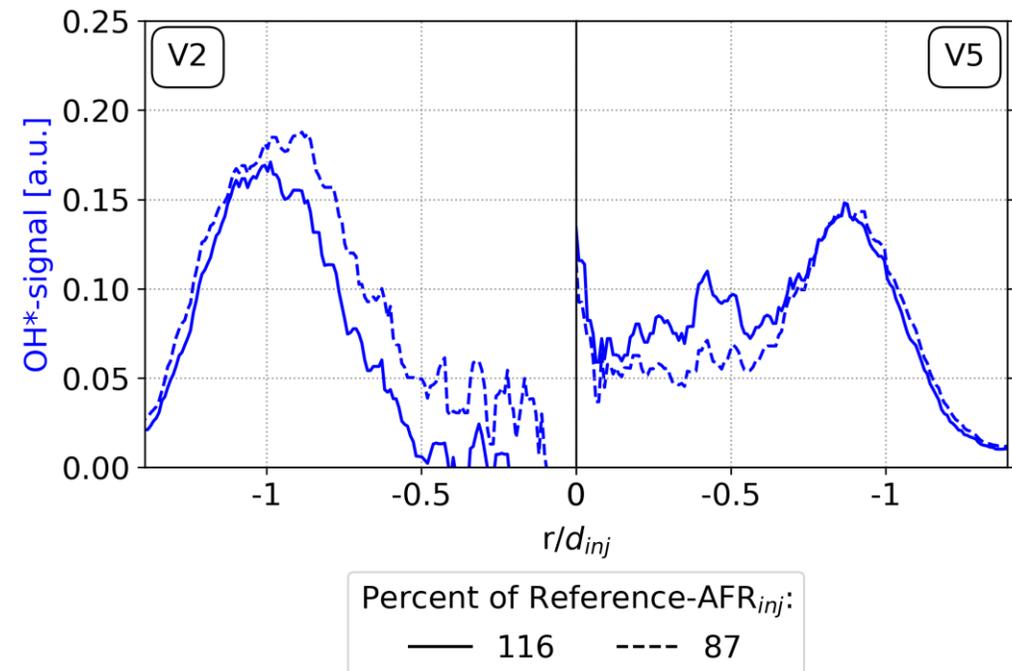
# Resultate – Flammenbild bei Injektor AFR Variation II

## Beobachtungen V2

- Schwache Wärmefreisetzung in der IRZ
- Wärmefreisetzung und H<sub>2</sub>O-signal in der IRZ sinkt mit steigendem Injektor AFR

## Beobachtungen V5

- Signifikante Wärmefreisetzung in IRZ, steigt mit steigendem Injektor AFR
- Erhöhung des H<sub>2</sub>O-Signals in der IRZ durch steigendes Injektor AFR



**Fig. 6:** Radiales Profil des entfalteten OH\*- und Wasserdampfsignals an axialer Position der 1. Mischluftreihe

# ZUSAMMENFASSUNG

## Ziele der Testkampagne

- ✓ Validierung der Beobachtungen der atmosphärischen Voruntersuchung von RRD bei mittleren Drücken
- ✓ Untersuchung der Flammenstabilisierung und des  $\text{NO}_x$ -Verhaltens bei Änderung der Stoichiometrie

## Zusammenfassung

- **Verankerte V2-Flamme** führt aufgrund der unvorgemischten Verbrennung zu **lokal höheren Temperaturen** am Injektoraustritt
- Ungleiche Luftverteilung in **V2-Primärzone** und Interaktion mit Wandkühlung führt zur **nahstoichiometrischen Verbrennung in der Primärzone**
- **Wärmefreisetzung in der IRZ von V5** intensiviert sich mit steigendem Injektor AFR
- Dadurch kommt es zu höheren Temperaturen und **höheren lokalen  $\text{NO}_x$ -Bildungsraten mit steigendem Injektor AFR in IRZ**

Viel  $\text{NO}_x$   
für V2

Konstanter  
 $\text{NO}_x$  für V5

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages



# DANKE FÜR DIE AUFMERKSAMKEIT! FRAGEN?

# Extra – Entfaltete Darstellung bei fetterem und magererem AFR

116% Ref. AFR

87% Ref. AFR

