

# UserCylinder<sup>®</sup>: Wasserstoff- Brennverfahren

*Gabriele Sgroi  
Giovanni Cornetti  
Dirk Naber*

*Mahir Tim Keskin  
Michael Grill*

---

# Übersicht

- **MOTIVATION**
- **MESSDATENBASIS**
- **ABSTIMMUNG USERCYLINDER®**
- **ABSTIMMUNG WEITERE MODELLE**
- **ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK**

---

# Motivation

## Warum benötigt man 0D/1D-Simulation zur Entwicklung von Wasserstoffmotoren?

**Eine Wasserstoffverbrennung kann nur mit einem sehr leistungsstarken und sehr gut ausgelegten Aufladesystem erfolgreich sein. Gründe:**

- $H_2$ -Verbrennung hat einen höheren Ladedruckbedarf im Vergleich zu einer Nfz-Diesel-Verbrennung. Um die  $NO_x$  zu beherrschen, sollte auch bei 70%-100% Last mit  $\lambda \geq 2$  und zusätzlicher AGR gefahren werden. Alternativ würde stöchiometrischer Betrieb einen Betriebsartenwechsel erfordern und damit sehr hohe Anforderungen an das Transientverhalten des Aufladesystems stellen.
- Hoher Wirkungsgrad und frühe Schwerpunktlagen der  $H_2$ -Verbrennung senken die Abgasenthalpie für den ATL. Gleichzeitig höherer Ladedruckbedarf -> Herausforderung

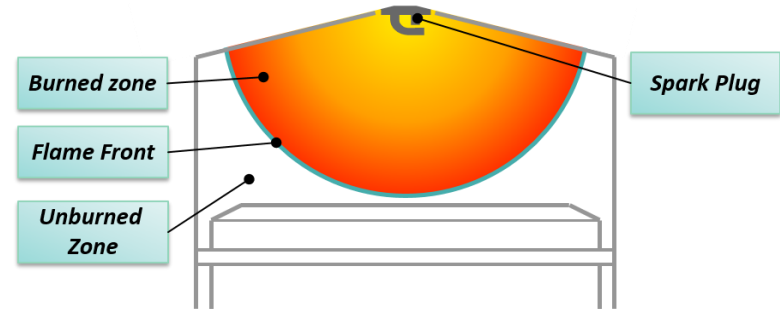
**Die Bewertung von Aufladevarianten sollte immer mit einer 1D-Simulation vor und begleitend zu Prüfstandsversuchen erfolgen. Gründe:**

- Ohne ATL-Matching auf die  $H_2$ -Verbrennung keine sinnvolle Bewertung am Vollmotor. Das ATL-Matching kann mit prädiktiven Brennverlaufsmodellen bereits vor dem ersten Prüfstandsversuch durchgeführt werden. Ein sinnvolles ATL-Matching erfordert immer eine 1D-Simulation.
- Die Vorab-Bewertung ob ein 1- oder 2-stufiges Aufladesystem für ein Nfz- $H_2$ -Konzept sinnvoller ist, kann ebenfalls vorab per 1D-Simulation bewertet werden.
- Mit transienten 1D-Simulationen können vorab kritische transiente Zustände ermittelt werden, in denen der Ladedruck einbrechen könnte. Z.B. Ausgleich über elektrischen Zusatzverdichter.

## Übersicht

- Bewährte Modelle zur ottomotorischen Verbrennung können weiterverwendet werden, aber die Untermodelle müssen angepasst werden:

- UserCylinder®:
  - Quasidimensionales Brennverlaufsmodell
  - Variablen: Flammenoberfläche, Turbulenz, Flammenfaltung und laminare Flammengeschwindigkeit



- Anzupassende Untermodelle

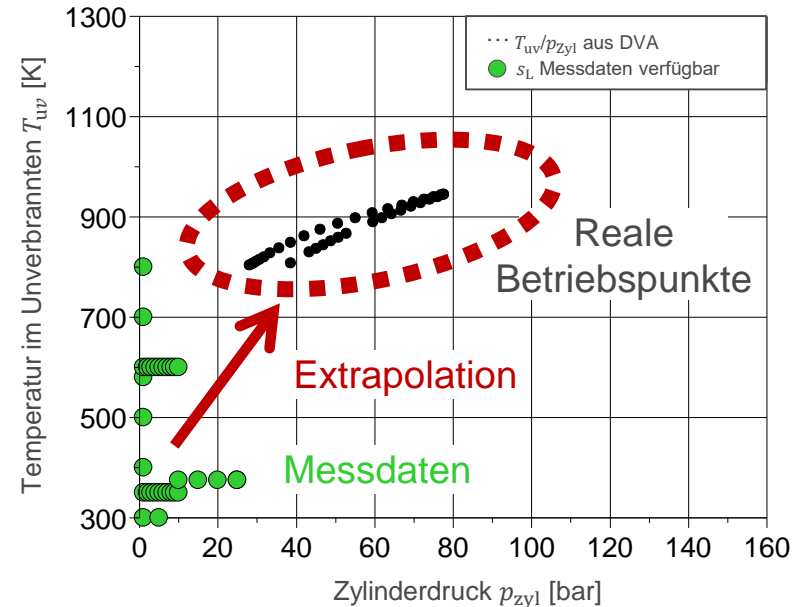
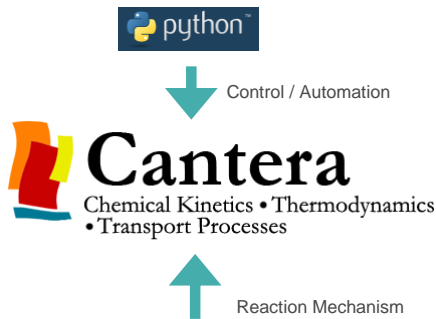
- Verdampfung
- Kalorik
- Selbstzündverhalten
- Laminare Flammengeschwindigkeit

→ Stoffwerte des Kraftstoffs benötigt

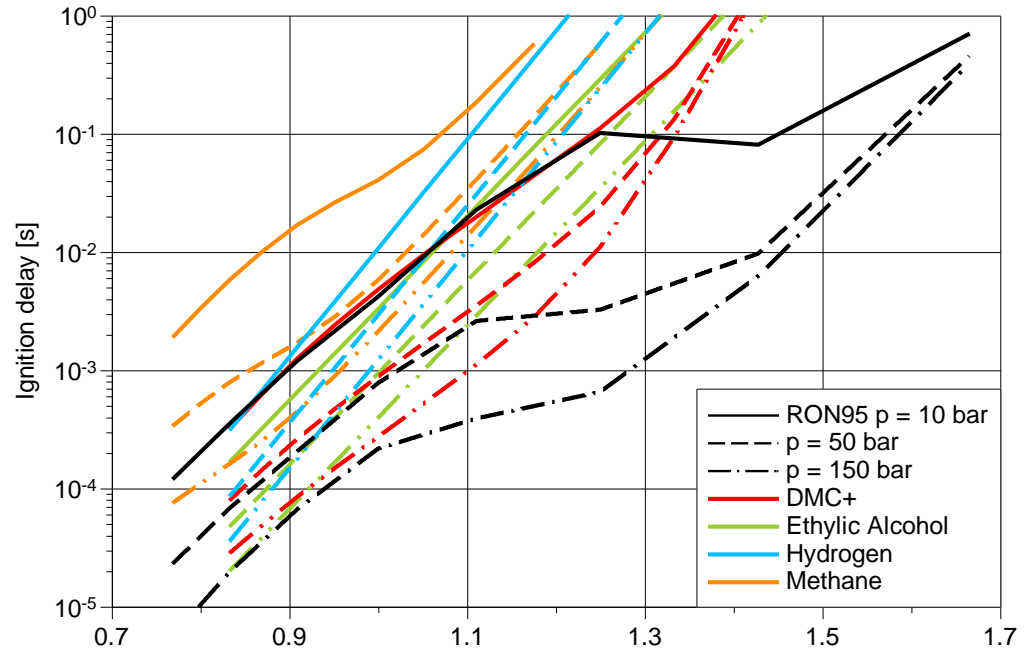
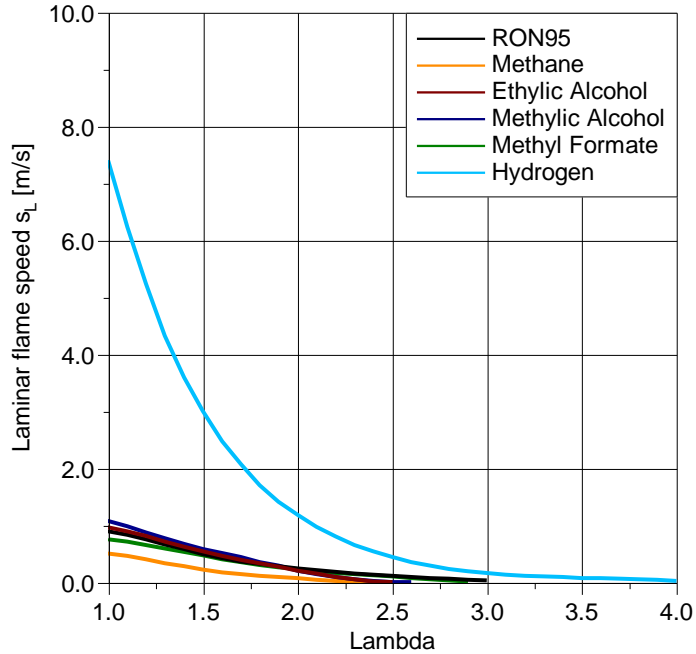
→ Modellerweiterungen benötigt

## Laminare Flammgeschwindigkeit und -dicke

- Für die im motorischen Betrieb relevanten Randbedingungen sind keine Messdaten verfügbar
- Früher: stark unsicherheitenbehaftete Extrapolation
- Heute: reaktionskinetischer Ansatz mit kraftstoffindividuellem Mechanismus und unter einem breiten Feld von Randbedingungen  $s_{L=}$   
 $f(p, T, \lambda, y_{egr}, y_{h2o})$



## Ergebnisse aus Reaktionskinetikrechnung





## Stark erweiterte Vorhersagefähigkeit durch Modellierungsansatz

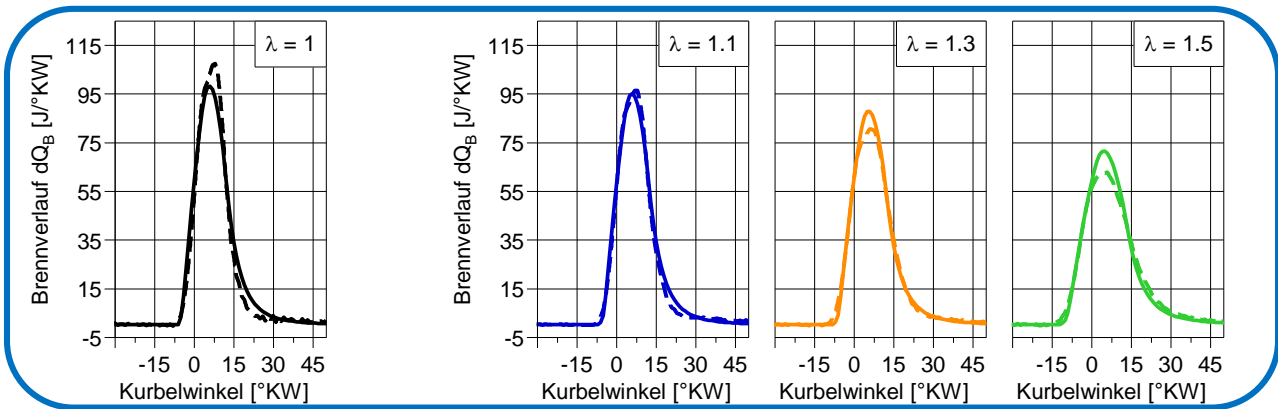
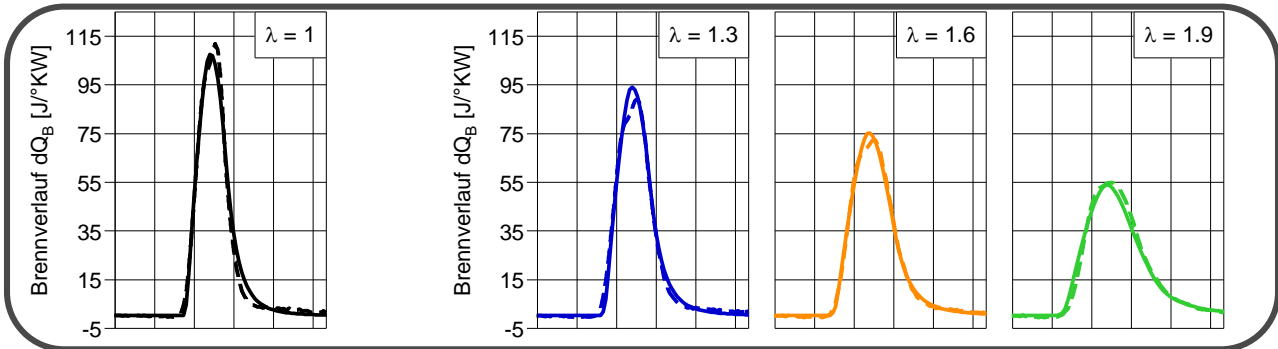
Kalibrierung:  
RON 98  
 $\lambda = 1$

Vorhersage  
Kraftstoffeinfluss  
 $\lambda \uparrow$

Vorhersage:  
Methanol  
 $\lambda \geq 1$

Vorhersage  
Kraftstoffeinfluss  
 $\lambda \uparrow$

Vorhersage:  
Methylformiat  
 $\lambda \geq 1$



---

# Messdatenbasis

## Messdaten

- Einzylinder basierend auf MTU BR2000
- Kolben mit Flachmulde
- Zentrale Zündkerze (aus Motorsport)
- 79 Einzelbetriebspunkte
- 2 verschiedene Lasten (ca. 7 bar und 11 bar) bei derselben Drehzahl ( $1200 \text{ min}^{-1}$ )
- Beinhaltet Variation von Zündzeitpunkt und AGR-Rate
- Übrige Parameter weitgehend konstant (z.B. Lambda)

Hub x Bohrung	130 x 150 mm
Hubraum	1991 cm <sup>3</sup>
Pleuellänge	273 mm
Verdichtungsverhältnis	11,5 :1
Ventile	4
Max. Drehmoment	350 Nm
Max. Drehzahl	1800 rpm
Max. Ladedruck	5,0 bar
Max. Zylinderdruck	180 bar

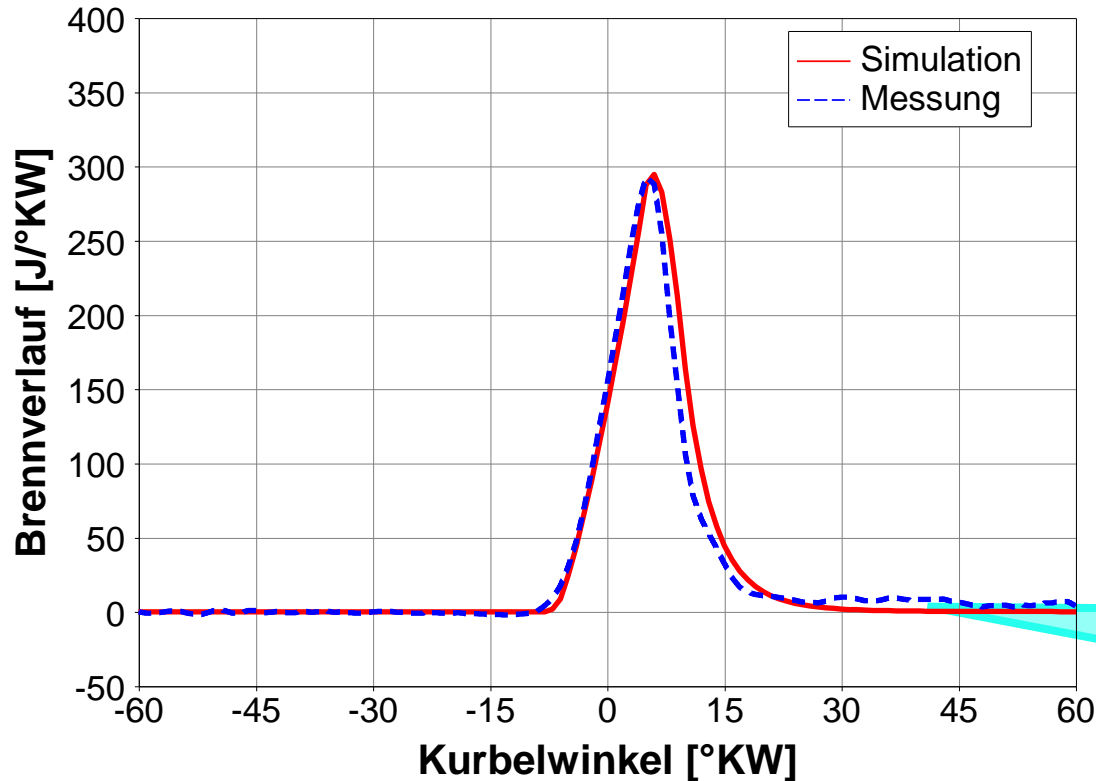
---

# Abstimmung UserCylinder®

## Brennverlaufsmodellabstimmung

- Auswahl eines **einzelnen Betriebspunkts** (im Prinzip beliebig)
- Automatisierte Optimierung **eines einzigen Abstimmparameters** zur Festlegung des Turbulenzniveaus
- Regelung der Schwerpunktlage auf den **50%-Umsatzpunkt** aus DVA

## Vergleich Messung/Simulation

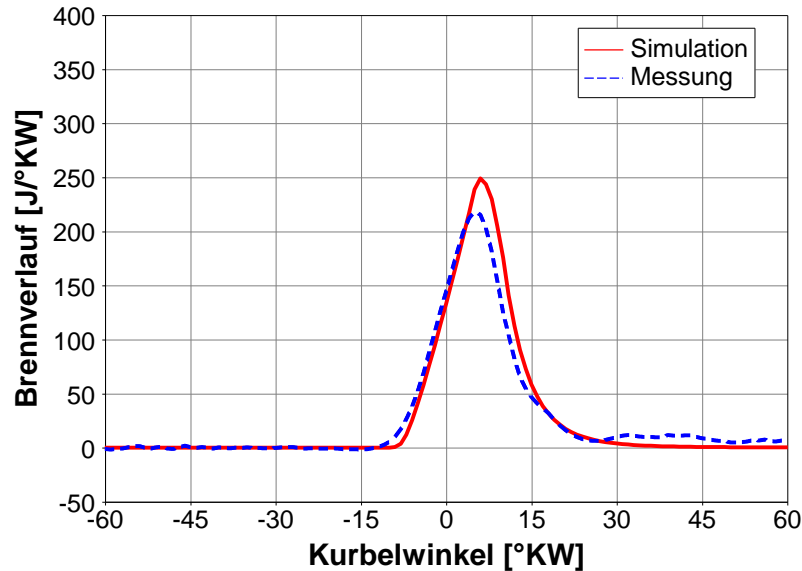


Drehzahl [min <sup>-1</sup> ]	1200
p <sub>mi</sub> [bar]	6.7
$\lambda$ [-]	1.83
ZZP [°KW v. ZOT]	12

*Abweichungen in der fallenden Flanke bzw. Ausbrand bedingt durch unplausiblen Ausbrand in der Messung (Brennverlauf wird nicht null).*

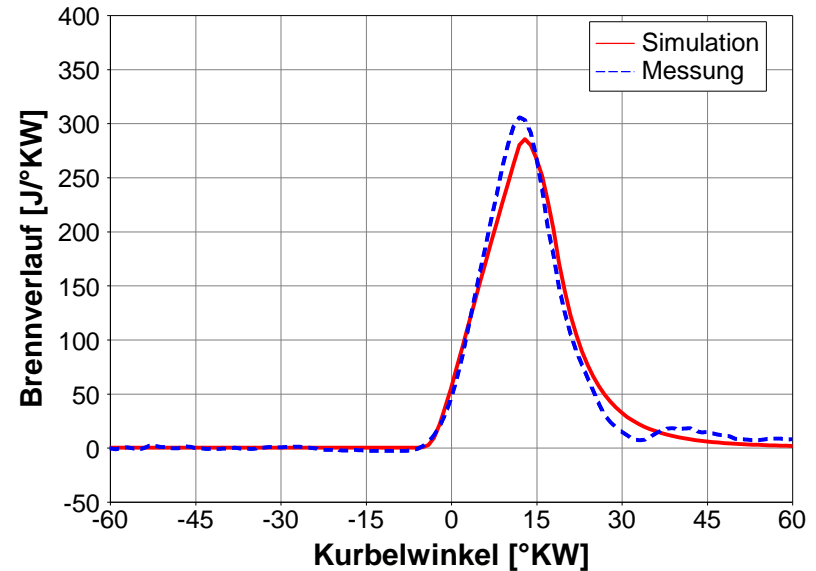
## Vergleich Messung/Simulation

Drehzahl [min <sup>-1</sup> ]	1200	$\lambda$ [-]	1.84
p <sub>mi</sub> [bar]	6.8	ZZP [°KW v. ZOT]	16



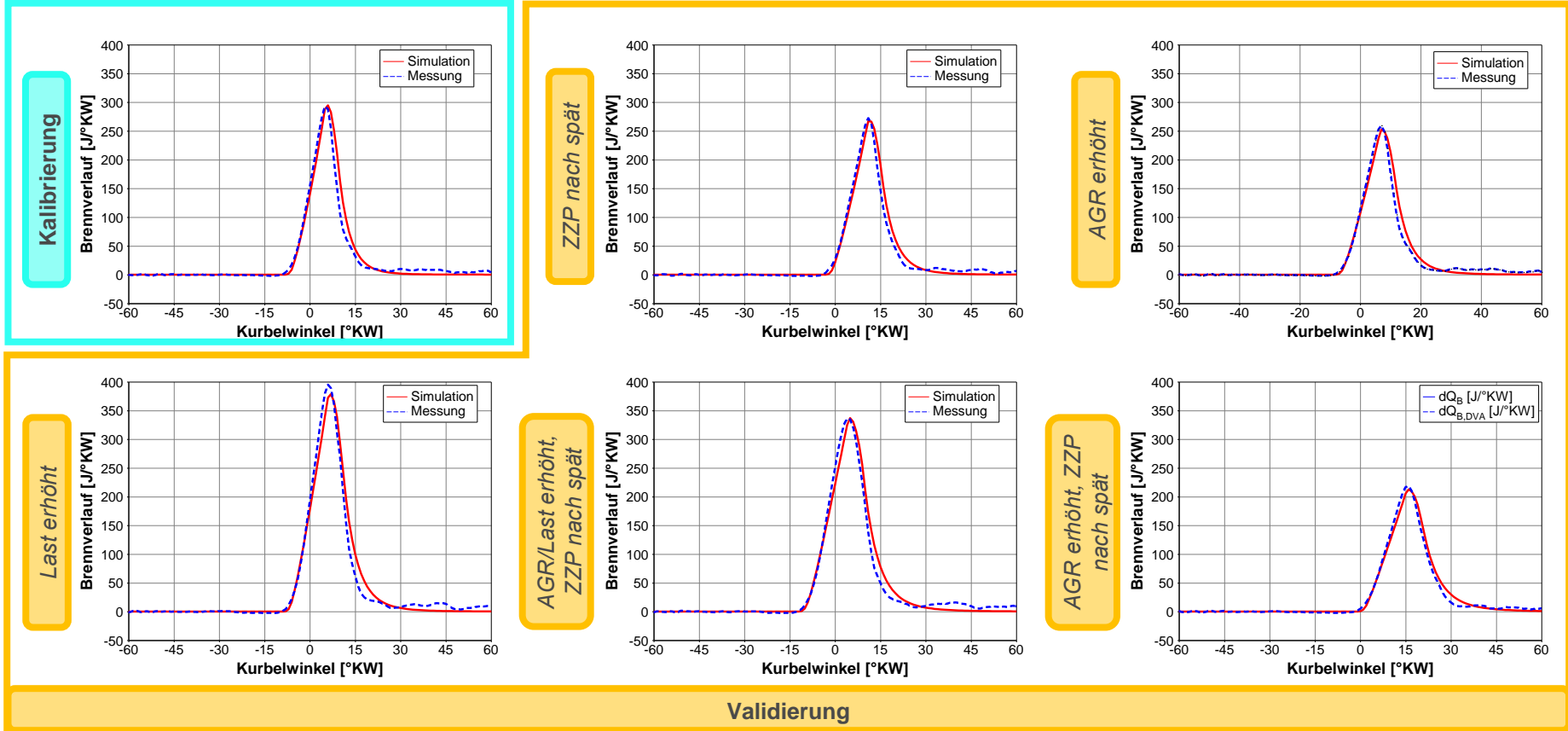
Resultierende Mitteldruckabweichung: **0.22 bar**  
Resultierende Spitzendruckabweichung: **2.30 bar**

Drehzahl [min <sup>-1</sup> ]	1200	$\lambda$ [-]	1.85
p <sub>mi</sub> [bar]	10.4	ZZP [°KW v. ZOT]	9



Resultierende Mitteldruckabweichung: **0.18 bar**  
Resultierende Spitzendruckabweichung: **0.20 bar**

Validierung an Hand von verschiedenen Variationen, Beispiele von ca. 80 BP



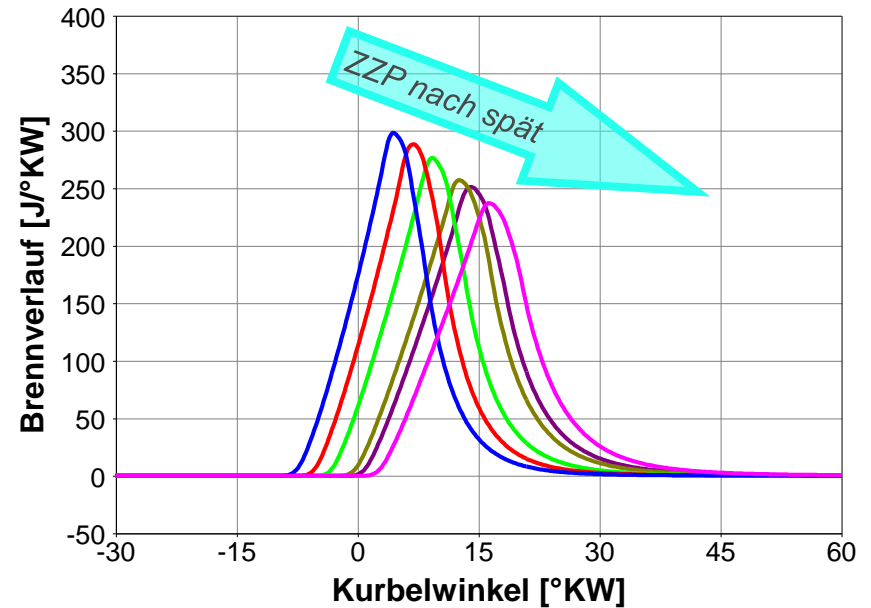
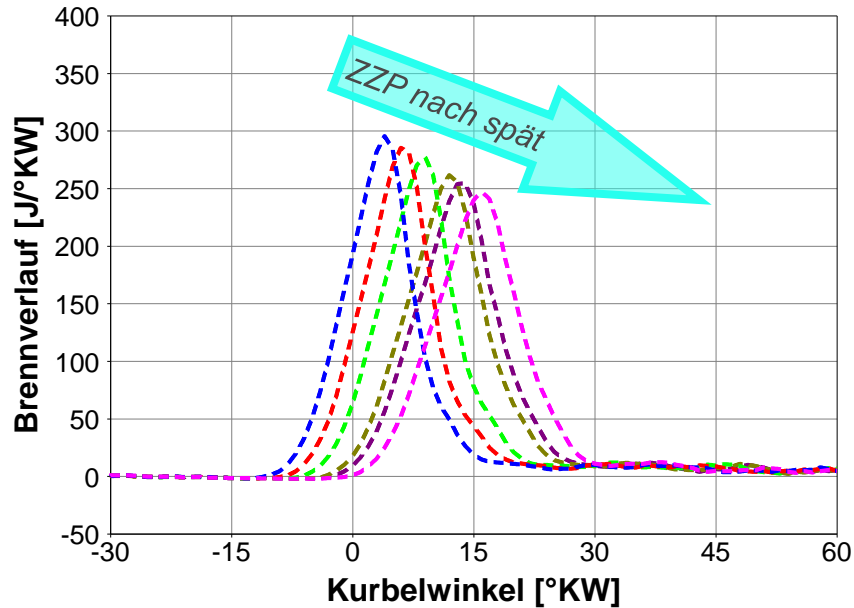
Validierung



## Messung

## Simulation

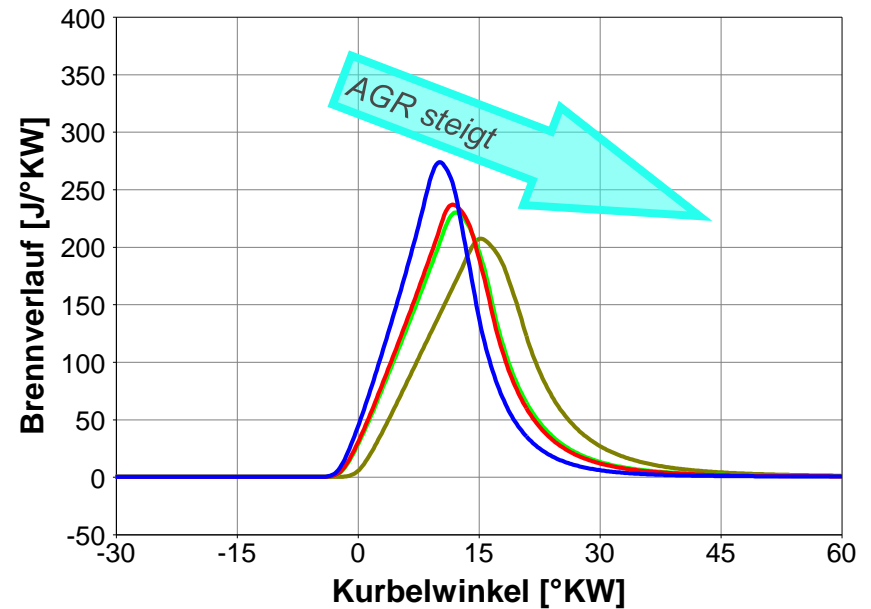
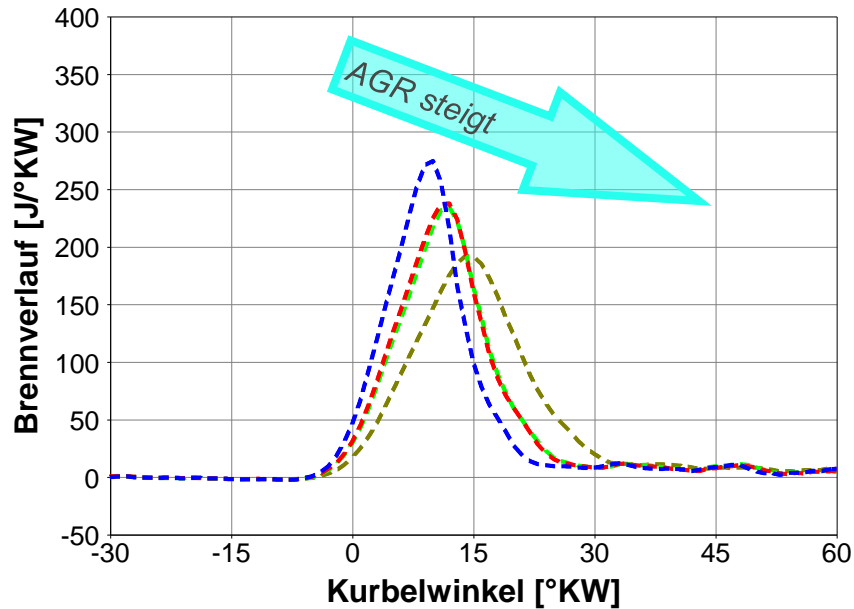
Drehzahl [min <sup>-1</sup> ]	1200	$\lambda$ [-]	1.83	pmi [bar]	6.7	ZZP [°KW v. ZOT]	Var.
-------------------------------	------	---------------	------	-----------	-----	------------------	------



## Messung

## Simulation

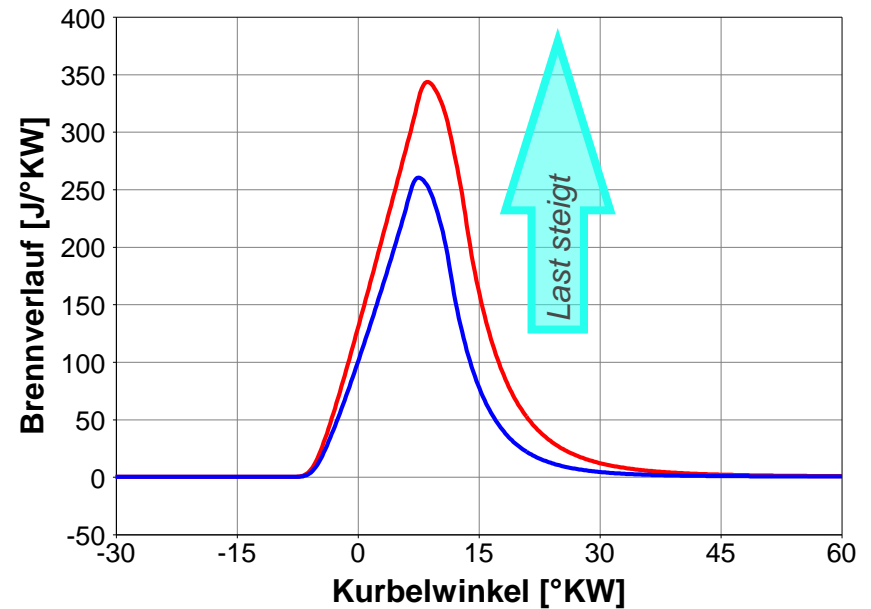
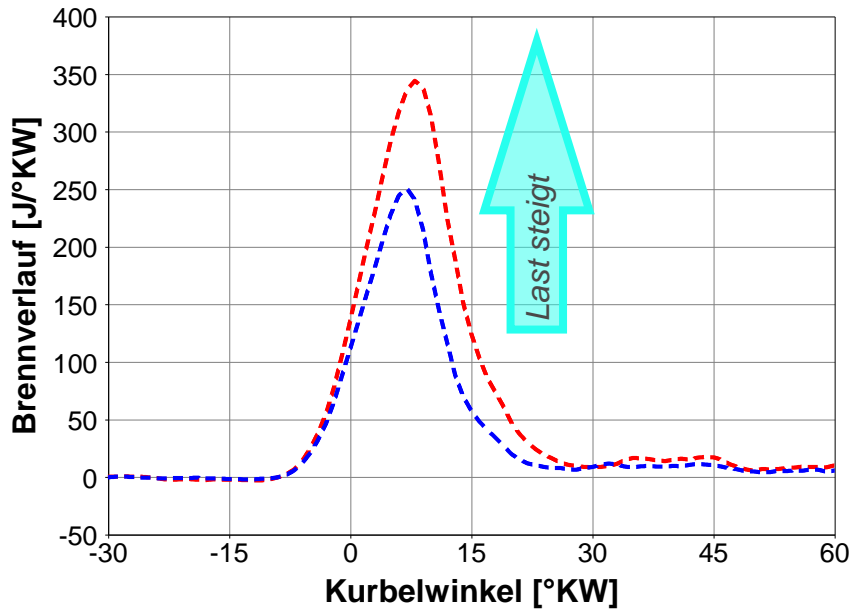
Drehzahl [min <sup>-1</sup> ]	1200	$\lambda$ [-]	1.82	p <sub>mi</sub> [bar]	6.7	ZZP [°KW v. ZOT]	13
-------------------------------	------	---------------	------	-----------------------	-----	------------------	----



## Messung

## Simulation

Drehzahl [min <sup>-1</sup> ]	1200	$\lambda$ [-]	1.86	pmi [bar]	7 bis 11	ZZP [°KW v. ZOT]	12
-------------------------------	------	---------------	------	-----------	----------	------------------	----

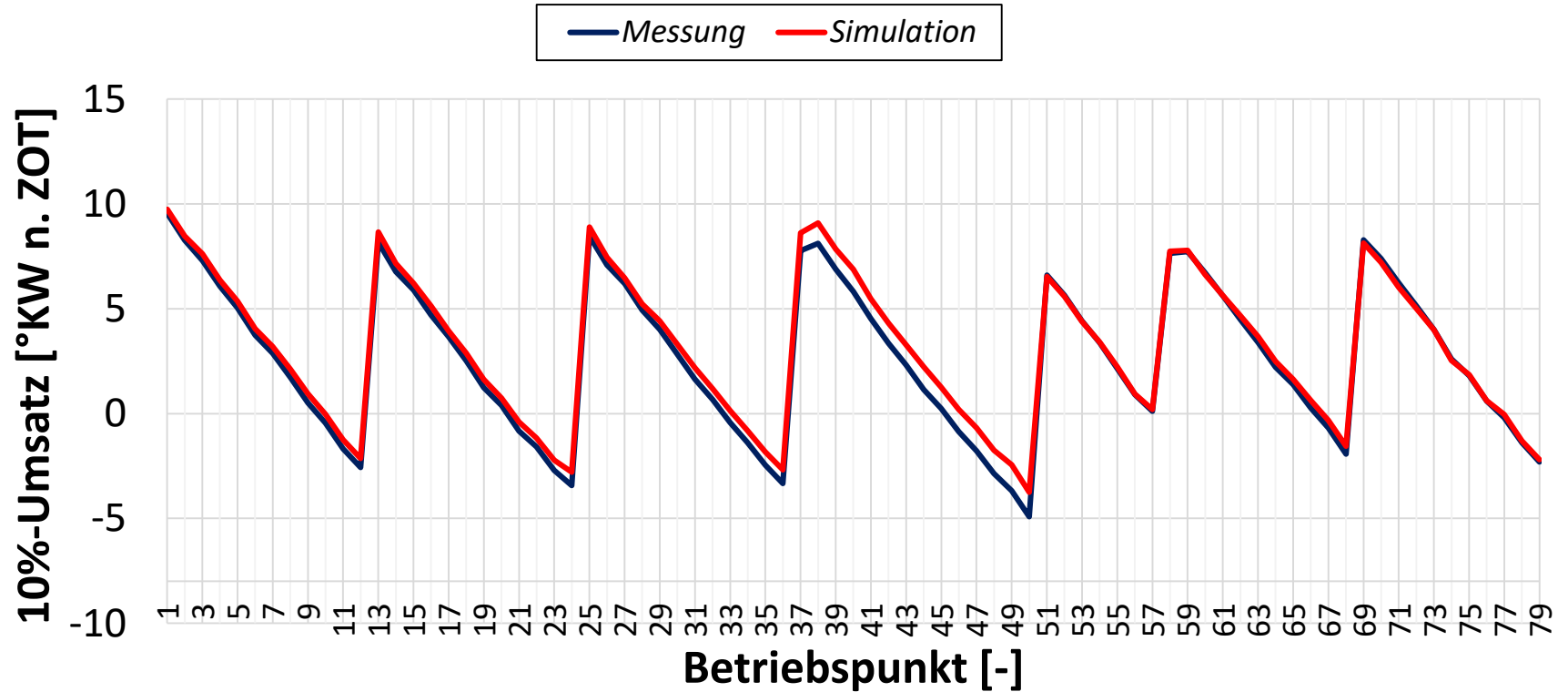


## Vergleich Messung/Simulation für alle untersuchten Betriebspunkte

- Sortierung von links nach rechts:
  - 1. Messreihe (BP1-12): ZKP-Verstellung nach früh ohne AGR bei niedrigerer Last
  - 2. Messreihe (BP13-24): ZKP-Verstellung nach früh mit niedrigerer AGR bei niedrigerer Last
  - 3. Messreihe (BP25-36): ZKP-Verstellung nach früh mit mittlerer AGR-Rate bei niedrigerer Last
  - 4. Messreihe (BP37-50): ZKP-Verstellung nach früh mit höherer AGR-Rate bei niedrigerer Last
  - 5. Messreihe (BP51-57): ZKP-Verstellung nach früh ohne AGR bei höherer Last
  - 6. Messreihe (BP58-68): ZKP-Verstellung nach früh mit niedrigerer AGR bei höherer Last
  - 7. Messreihe (BP69-79): ZKP-Verstellung nach früh mit höherer AGR-Rate bei höherer Last

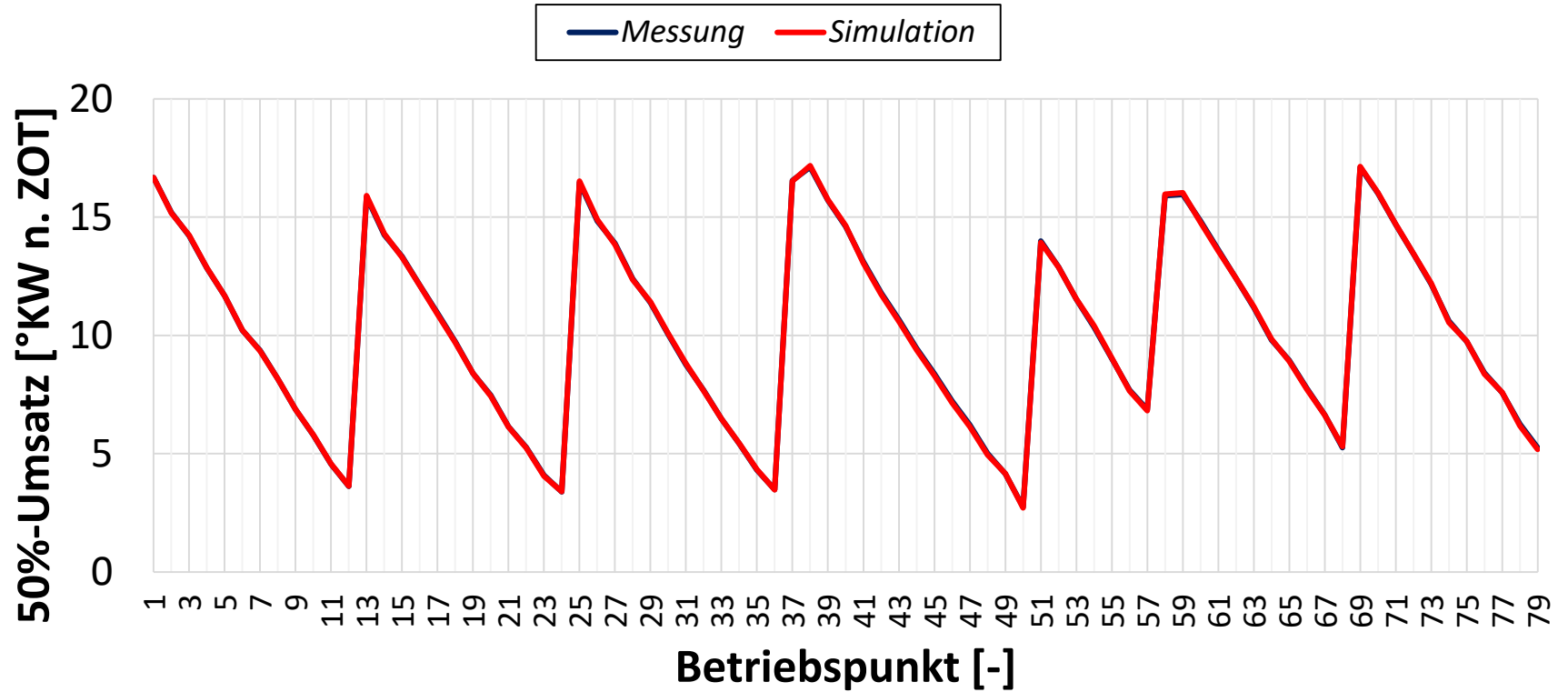
# Vergleich Messung – Simulation

10%-Umsatzlage



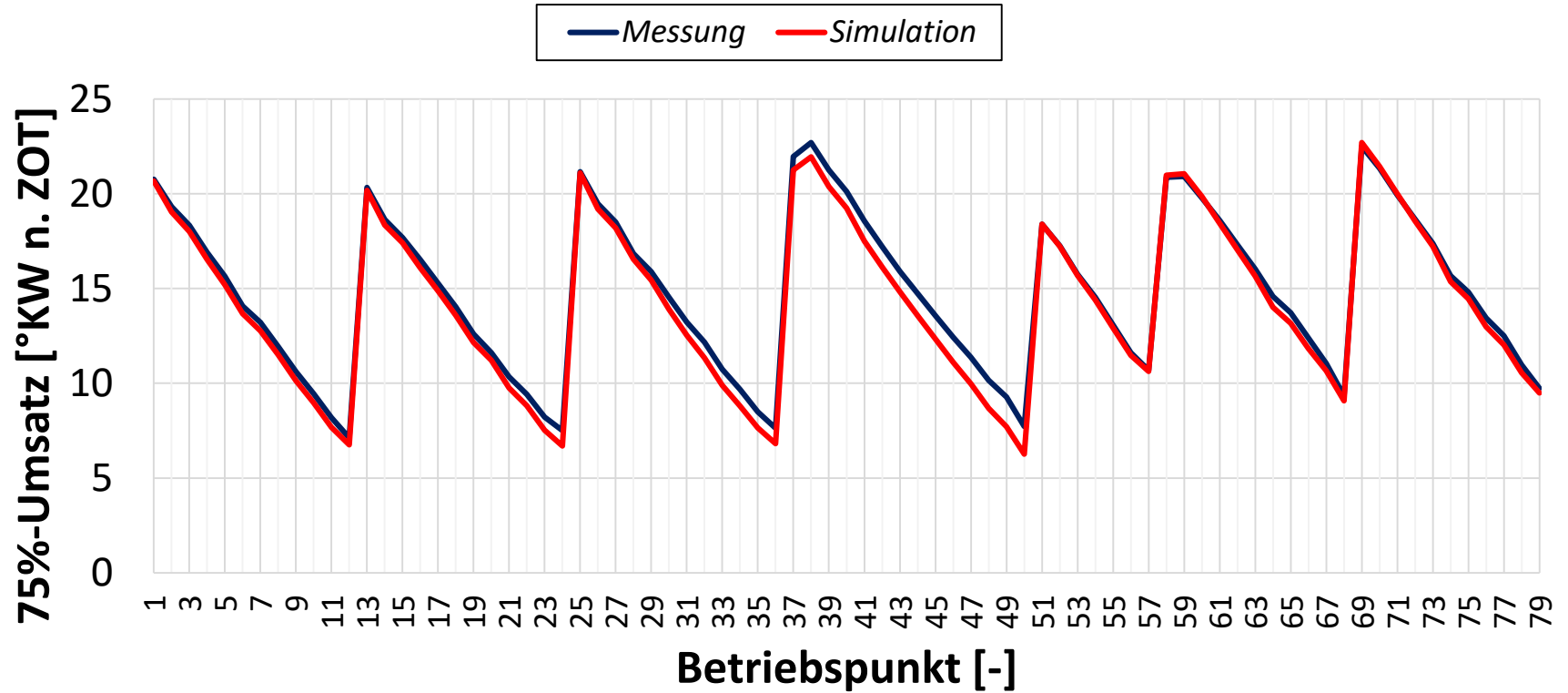
# Vergleich Messung – Simulation

50%-Umsatzlage



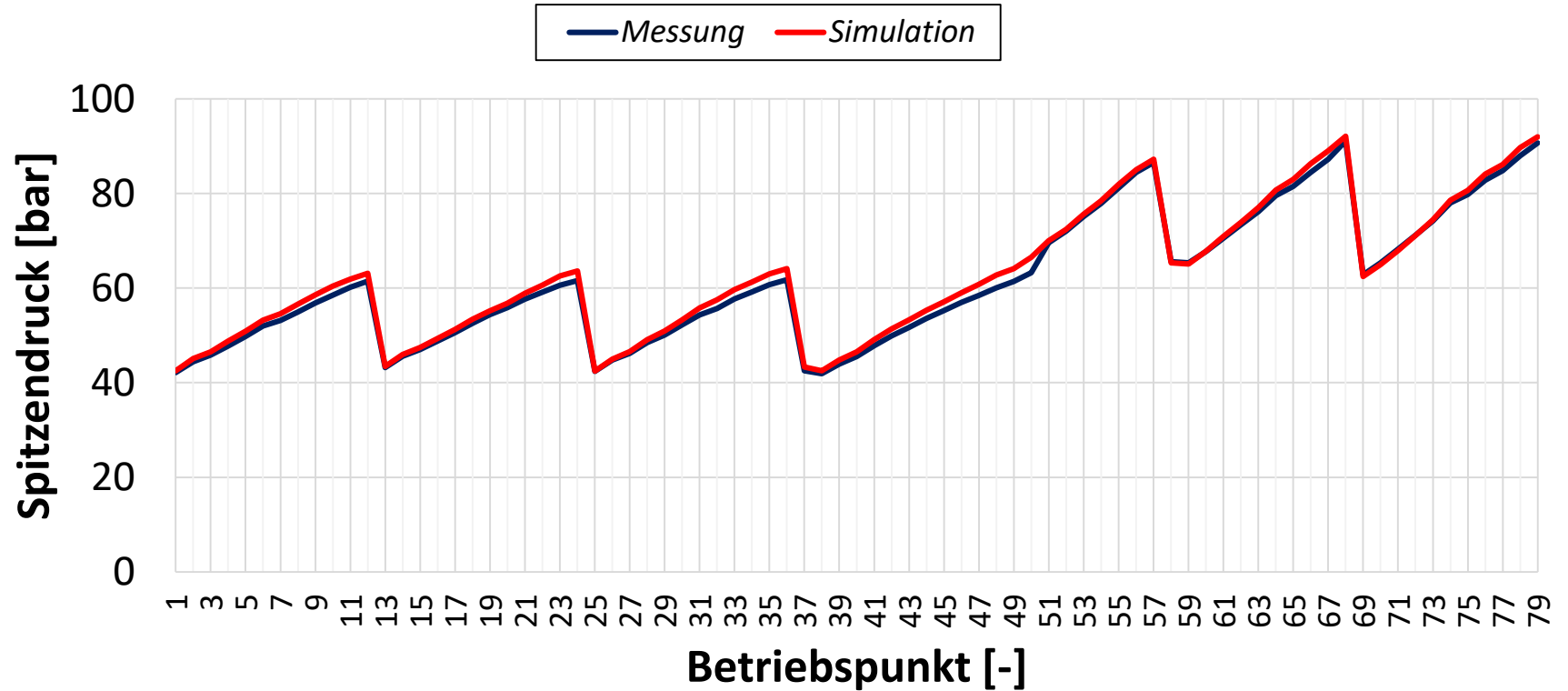
# Vergleich Messung – Simulation

75%-Umsatzlage



# Vergleich Messung – Simulation

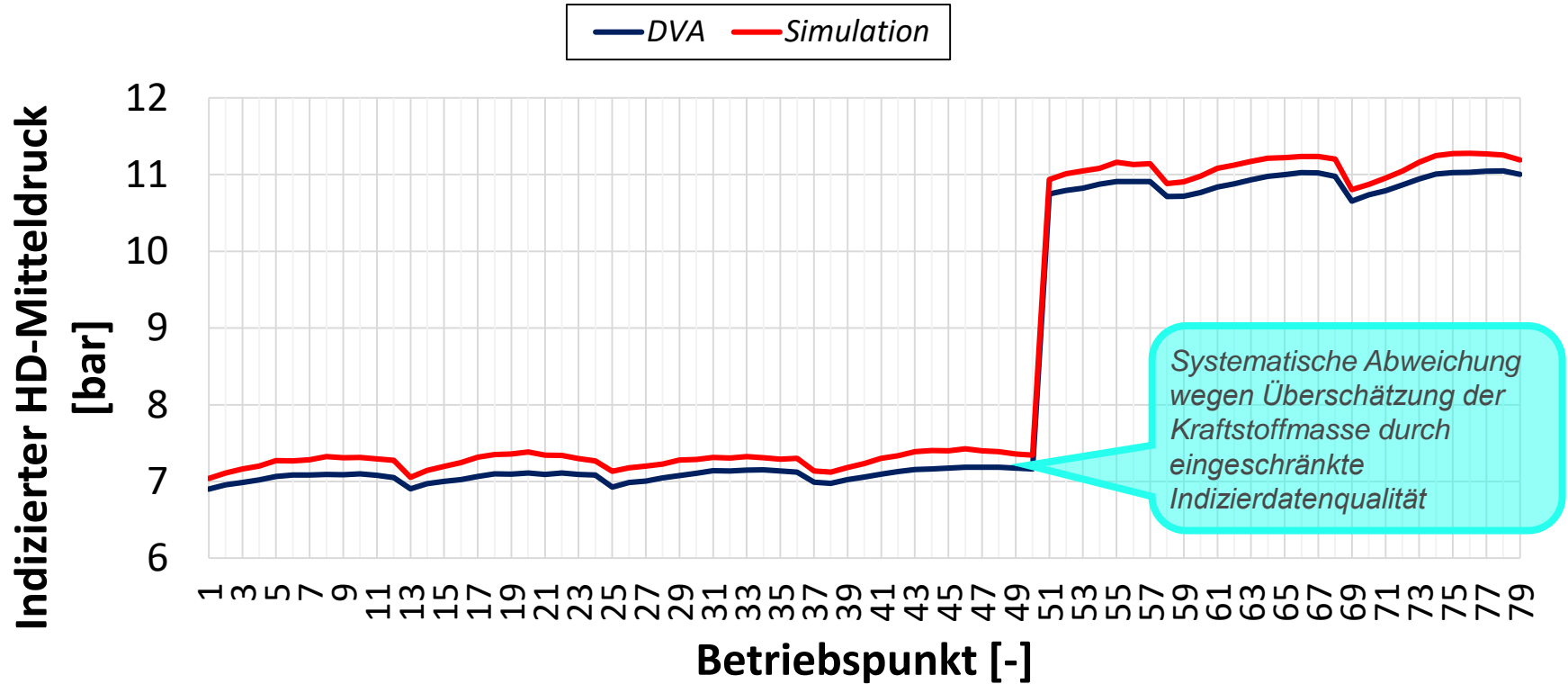
## Spitzendruck





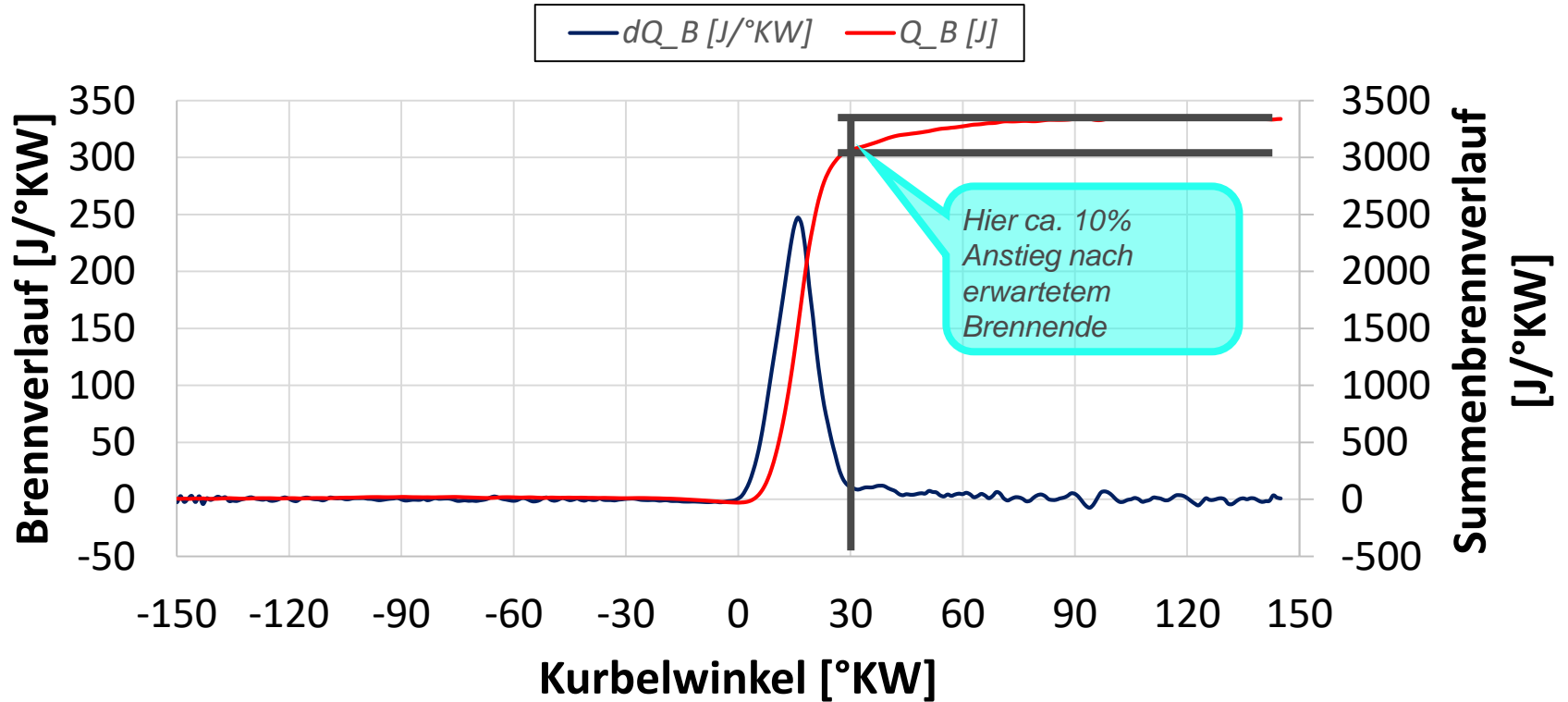
# Vergleich Messung – Simulation

## HD-Mitteldruck



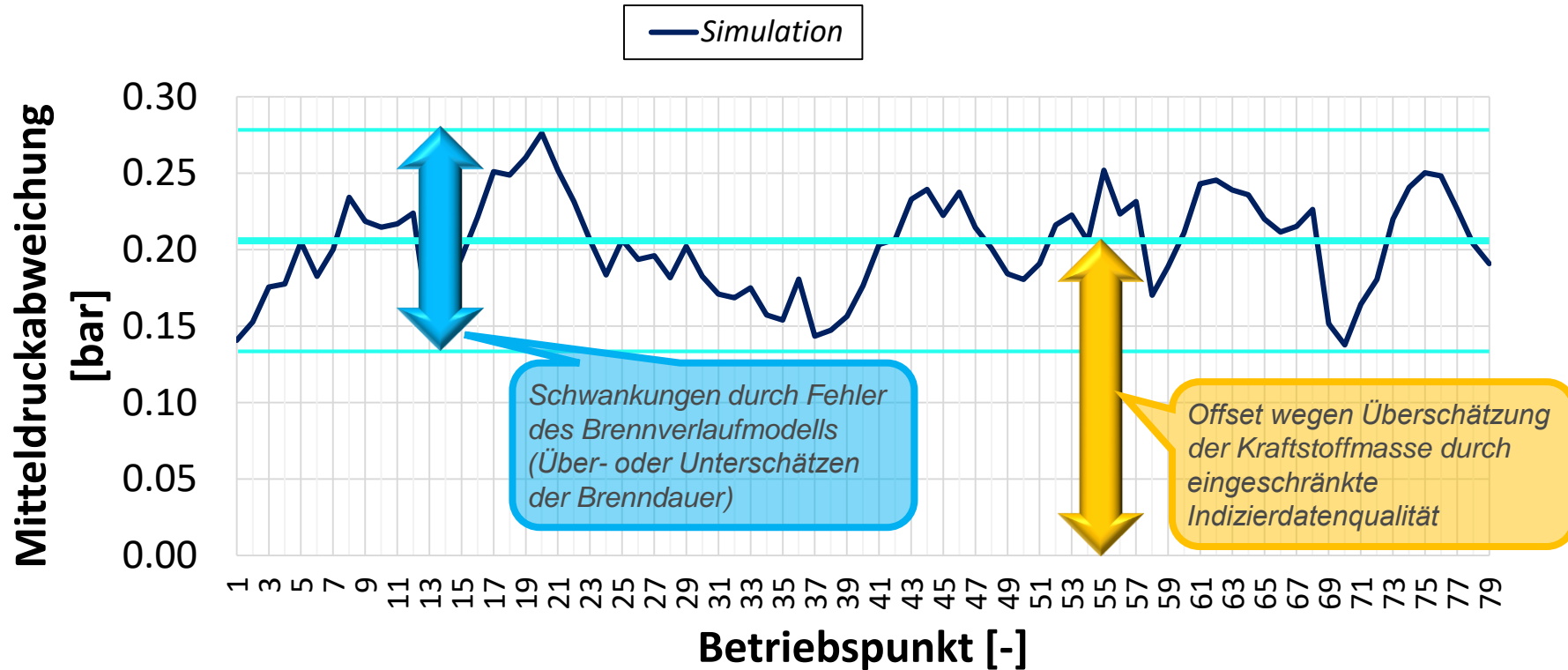
# Ausbrand in der Messung

Eingeschränkte Indizierdatenqualität



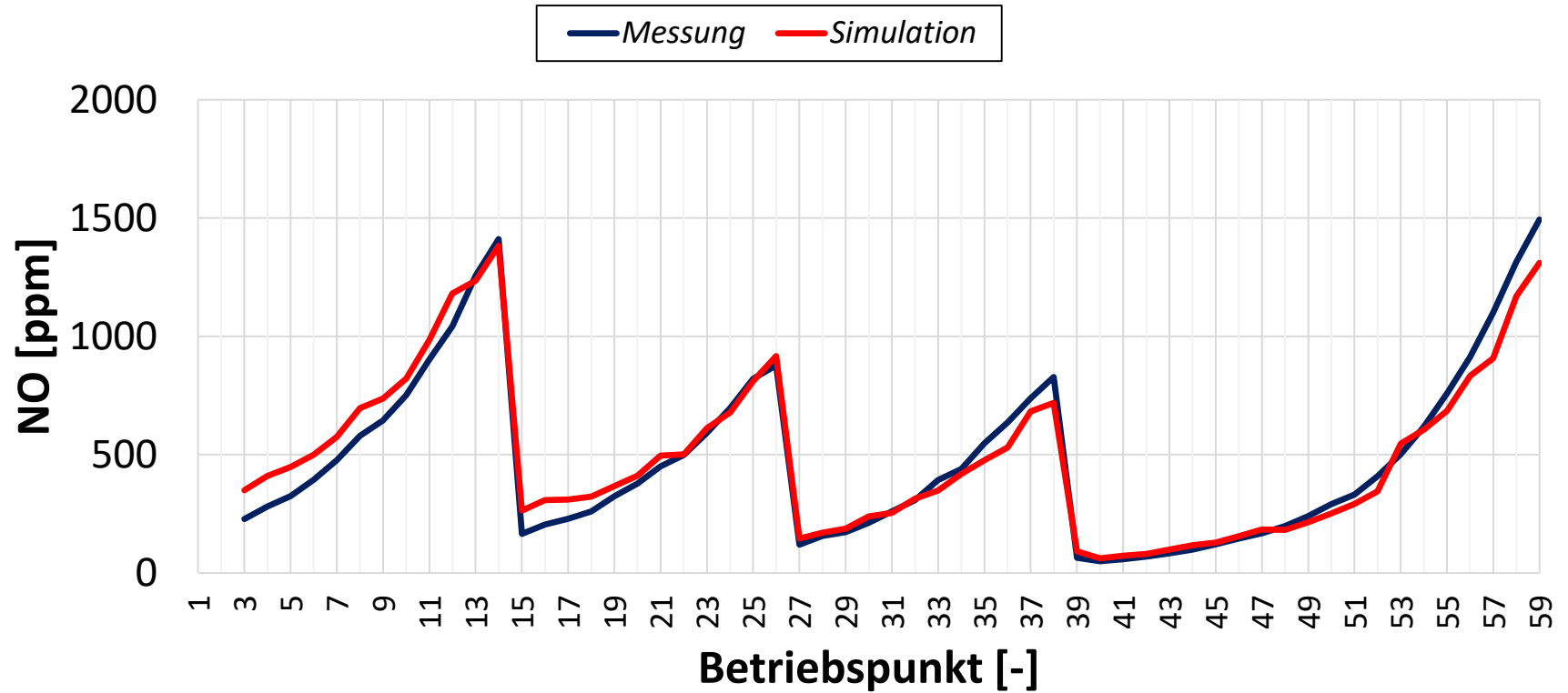
# Vergleich Messung – Simulation

## HD-Mitteldruck, Abweichung



# Vergleich Messung – Simulation

NO<sub>x</sub>-Modell



---

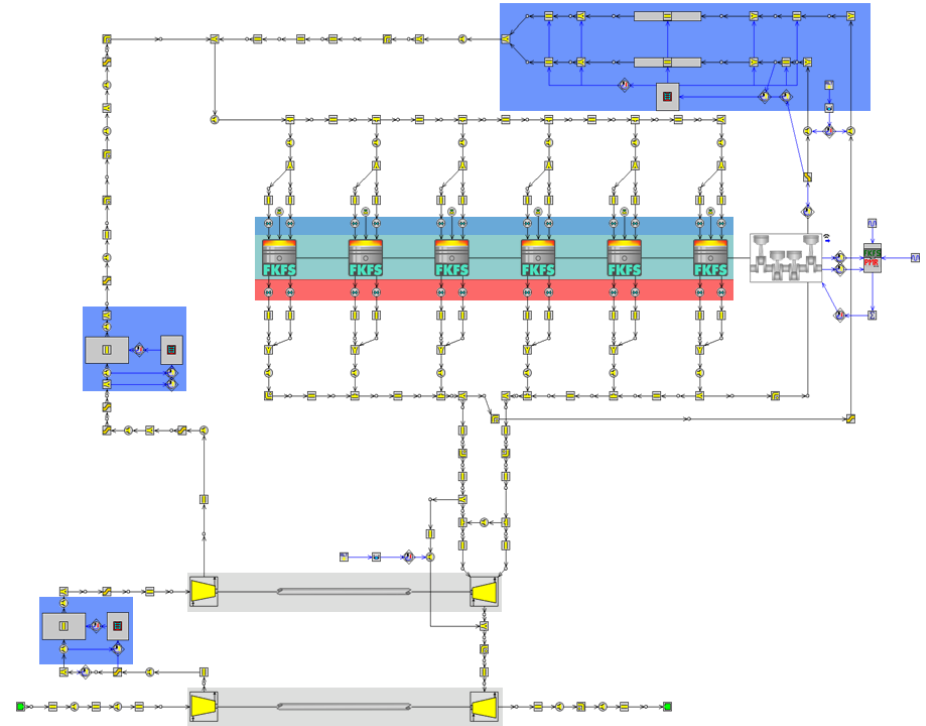
# Zusammenfassung

## Modellqualität

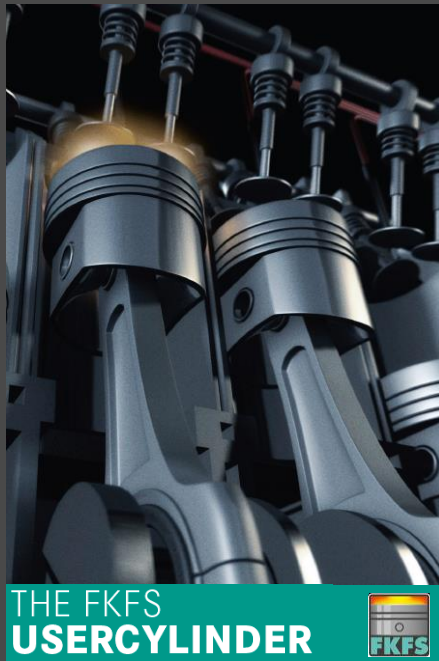
- Mit **einheitlichem** Parametersatz nach Abstimmung an **einem** Betriebspunkt werden alle Brennverläufe (ca. 80) hervorragend wiedergegeben
- Das Modell reagiert sowohl qualitativ als auch quantitativ korrekt auf Änderungen von Steuergrößen.
- Mitteldruck-Abweichung gering und systematisch (generell ca. 0.2 bar zu hoch wegen Überschätzung der Kraftstoffmasse durch eingeschränkte Indizierdatenqualität), auch der Spitzendruck wird sehr gut getroffen
- Auch die Brennverlaufs*form* wird sehr gut getroffen; die verbleibenden, äußerst geringen Abweichungen im Abstimmungspunkt sind größtenteils auf die problematische Indizierdatenqualität mit unplausiblem Ausbrandverhalten zurückzuführen
- Das Stickoxidmodell liefert ebenfalls eine sehr gute Übereinstimmung
- **Basiskonfiguration zur Untersuchung von Wasserstoffbrennverfahren einsatzbereit**

## Virtueller Versuchsträger

- Am FKFS wird die gezeigte Abstimmung in einen virtuellen Versuchsträger (MAN D2676) integriert.
- **Dieser kann für Konzeptuntersuchungen und zur virtuellen Motorauslegung verwendet werden.**



# Vielen Dank.



Dr.-Ing.

**Mahir Tim Keskin**

Simulation 0D/1D

Pfaffenwaldring 12 | 70569 Stuttgart  
keskin@fkfs.de

fkfs.de