



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für  
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK  
**Bundesamt für Energie BFE**

Schlussbericht 18. April 2012

# **Entwicklung schneller Mess- und Rechenverfahren für die Charakterisierung energieeffizienter Diesel- brennverfahren an der Nahtstelle zur Abgasnachbe- handlung**

---



Laboratorium für Aerothermochemie und Verbrennungssysteme  
Aerothermochemistry and Combustion Systems Laboratory

**Auftraggeber:**

Bundesamt für Energie BFE  
Forschungsprogramm 102859  
CH-3003 Bern  
[www.bfe.admin.ch](http://www.bfe.admin.ch)

**Kofinanzierung:**

Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e.V, Postfach 710864,  
D-60498 Frankfurt  
Projekt FVV Nr. 609862 Russgeregelter Dieselmotor

Bundamt für Umwelt BAFU  
Vertrags-Nr.:07.0086.PJ/1252-1882 Russgeregelter Dieselmotor

Competence Center Energy and Mobility, CH-5332 Villigen/PSI (NEADS)

**Auftragnehmer:**

ETH Zürich  
Institut für Energietechnik  
Laboratorium für Aerothermochemie  
und Verbrennungssysteme  
Sonneggstrasse 3  
CH-8092 Zürich  
[www.lav.ethz.ch](http://www.lav.ethz.ch)

**Autoren:**

Prof. K. Boulouchos	ETHZ – LAV	<a href="mailto:boulouchos@lav.mavt.ethz.ch">boulouchos@lav.mavt.ethz.ch</a>
C. Barro	ETHZ – LAV	<a href="mailto:barro@lav.mavt.ethz.ch">barro@lav.mavt.ethz.ch</a>
P. Obrecht	ETHZ – LAV	<a href="mailto:obrecht@lav.mavt.ethz.ch">obrecht@lav.mavt.ethz.ch</a>
L. Sharifian	ETHZ – LAV	<a href="mailto:sharifian@lav.mavt.ethz.ch">sharifian@lav.mavt.ethz.ch</a>
Ph. Vögelin	ETHZ – LAV	<a href="mailto:voegelin@lav.mavt.ethz.ch">voegelin@lav.mavt.ethz.ch</a>

**BFE-Bereichsleiter:** S. Hermle

**BFE-Programmleiter:** St. Renz

**BFE-Vertrags- und Projektnummer:** 153670 / 102859

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.

## Inhaltsverzeichnis

1. Zusammenfassung.....	6
2. Ziele der Arbeit.....	10
3. Methode .....	10
4. Arbeitspaket 1: Aufbau eines Prüfstands „Heavy Duty – Diesel Motor“ .....	11
4.1. Gegenstand.....	11
4.2. Versuchsträger .....	11
4.2.1. Modifizierter Zylinderkopf .....	12
4.2.2. Aufbau und Ausrüstung des Versuchsträgers.....	13
4.2.3. Steuerung und Überwachung des Prüflings.....	15
4.2.4. Messtechnik und Messdatenerfassung .....	16
4.3. Erreichte Ziele .....	17
5. Arbeitspaket 2: Applikation des LAV Gasentnahmeventils.....	18
5.1. Gegenstand.....	18
5.2. Konstruktion der Sonde.....	18
5.3. Durchgeführte Versuche .....	19
5.3.1. Öffnungs- und Schliess-Verhalten der Sonde.....	19
5.3.2. Verwendetes schnelles Massenspektrometer.....	20
5.3.3. Optimierung der Probeentnahmen.....	21
5.4. Einsatz der Sonde an Verbrennungsmotoren.....	22
5.4.1. Einzylinder-Forschungsmotor MTU 396.....	22
5.4.2. Probeentnahme im Auslass des Motors.....	23
5.4.3. Ergebnisse der Messungen im Auspuff.....	24
5.4.4. Einbau der Entnahmesonde im Zylinderkopf des MTU 396.....	26
5.4.5. Ergebnisse mit der in den Brennraum eingebauten Sonde .....	28
5.5. Erreichte Ziele .....	28
5.6. Ausblick .....	28
6. Arbeitspaket 3: Synergetische Anwendung schneller Messverfahren für Russ- und Stickoxidemissionen und relevante Motorparameter .....	29
6.1. Gegenstand.....	29
6.2. Mitfinanzierung .....	29
6.3. Durchgeführte Arbeiten .....	29
6.4. Grundlegende Untersuchungen .....	30
6.4.1. Anwendung des In-Zylinder-Pyrometers (Optical Light Probe OLP) .....	30

6.4.2.	Korrelation der Russdichte im Zylinder (KL) mit gemessenen Russemissionen .....	32
6.4.3.	Variabilität und Mittelung von KL-Verläufen .....	35
6.4.4.	Abhängigkeit von der Einbaulage.....	36
6.4.5.	Zylinder-zu-Zylinder Variation der Russbildung und -oxidation.....	38
6.4.6.	Variabilität des Luftverhältnisses und der AGR der einzelnen Zylinder .....	39
6.5.	Untersuchung von Lasttransienten.....	42
6.5.1.	Prüfstands Aufbau und Steuerung.....	42
6.5.2.	Beschreibung der Modelltransienten.....	44
6.5.3.	Datenerfassung und Auswertung .....	44
6.5.4.	Resultate der transienten Messungen.....	46
6.6.	Erreichte Ziele und Ausblick.....	49
6.7.	Anhang: Detaildiagramme aller Modelltransienten und kurze Erläuterungen.....	50
7.	Arbeitspaket 4: Schnelle Modelle, Russgeregelter Dieselmotor.....	59
7.1.	Gegenstand .....	59
7.2.	Mitfinanzierung .....	59
7.3.	Ziel des Projekts .....	59
7.4.	Modellbildung und –entwicklung .....	60
7.4.1.	Eigenschaften des weiter zu entwickelnden Basis-Modells .....	60
7.4.2.	Anwendung des Basis-Russmodells .....	61
7.4.3.	Durch zusätzliche Modelleingänge verbessertes Modell .....	61
7.4.4.	Weiterentwicklung des verbesserten Modells .....	62
7.5.	Messungen / experimentelle Ergebnisse .....	65
7.5.1.	Stationäre Ergebnisse .....	65
7.5.2.	Transiente Ergebnisse.....	67
7.6.	NEFZ .....	70
7.7.	FTP 72 (UDDS) .....	71
7.8.	FVV Arbeitskreissitzungen „Russgeregelter Dieselmotor“ .....	72
7.9.	Erreichte Ziele .....	72
7.10.	Publikationen .....	72
8.	Work package 5: Numerical Simulation of NOx reduction in an NH3-SCR system .....	73
8.1.	Scope of activities.....	73
8.1.1.	Numerical model.....	73

8.1.2.	Transient simulation and steady state.....	74
8.1.3.	Highly transient performance .....	77
8.1.4.	Non-isothermal operation .....	79
8.2.	Main results achieved.....	80
8.3.	Activities within the project (seminars, workshops etc.).....	80
8.4.	References .....	80
9.	Publikationen.....	81
9.1.	Arbeitspaket 4: Russgeregelter Dieselmotor.....	81
9.2.	Arbeitspaket 5: Numerical Simulation of NO <sub>x</sub> reduction in an NH <sub>3</sub> -SCR system .....	81

## 1. Zusammenfassung

Um die Anforderungen an ein Abgasnachbehandlungssystem von Dieselmotoren zu definieren, ist eine genaue Kenntnis der Rohemissionen (Russ und NO<sub>x</sub>) des Motors erforderlich. In früheren Projekten konnten mittels, eines im Rahmen eines KTI - Projekts entwickelten, miniaturisierten Pyrometers vertiefte Kenntnisse der Bildung von Russ im Zylinder unter stationären Bedingungen gewonnen werden. Diese Prozesse sind, wegen der wesentlich erhöhten Anforderungen an die Messtechnik, unter Lasttransienten noch nicht ausreichend verstanden. Da gerade solche Transienten einen ganz wesentlichen Beitrag an die Russemissionen liefern, sind vertiefte Untersuchungen dieser Prozesse, in Hinblick auf die Erfüllung kommender Abgasgrenzwerte, unbedingt erforderlich. Das gleiche gilt auch für NO<sub>x</sub>-Emissionen und insbesondere für die Abgasnachbehandlungssysteme auf SCR-Basis, insbesondere im instationären Betrieb.

### Arbeitspaket 1: Aufbau eines Prüfstands „Heavy-Duty Motor“

Als Versuchsträger dient ein Vier-Zylinder Heavy Duty Dieselmotor des Typs Liebherr D624 mit 6.6 lt Hubraum. Der Motor wurde durch die ETH mit einer Common-Rail Einspritzanlage und Abgasrezirkulation ausgerüstet. Zudem wurde jeder Zylinderkopf mit zwei Bohrungen zum Brennraum versehen, wo jeweils ein Drucksensor und eine optische Sonde zur Messung der Russstrahlung gleichzeitig eingebaut werden können.

Der gesamte Prüfstand wurde im Rahmen dieses Projekts vollständig neu aufgebaut, instrumentiert und mit im Haus entwickelten Datenerfassungs- und Überwachungssystemen ausgestattet. Die elektrische Leistungsbremse wurde mit einem neuen Steuergerät ausgerüstet, welches erlaubt beliebige Lasttransienten zu fahren.

Motor und Prüfstand konnten erfolgreich in Betrieb genommen werden, erste gemessene Betriebspunkte des Motors ergaben eine gute Übereinstimmung mit bereits bekannten Daten.

Das für diesen Prüfstand ursprünglich vorgesehene Steuergerät der DUAP, Herzogenbuchsee konnte nicht eingesetzt werden, an dessen Stelle gelangt ein solches der Bodensee Steuergeräte (BSG der MALI Group) zum Einsatz.

Der Prüfstand wurde abschliessend mit den zur Untersuchung von Lasttransienten erforderlichen Messgeräten ausgerüstet und in Betrieb genommen.

Produktionsmessungen in Synergie mit dem KTI-Projekt Nr. 10604.1 „Entwicklung eines marktauglichen Messsystems zur Erfassung der Inzylinder Russkonzentration und –temperatur“ konnten 2011 durchgeführt und damit das Arbeitspaket 1 erfolgreich abgeschlossen werden. Ergebnisse dieses Arbeitspakets sind zum Aufbau/Validierung der schnellen Modelle in Arbeitspaket 4 eingeflossen.

### Arbeitspaket 2 Applikation des schnellen LAV Gasentnahmeventils

Die Sonde hat sich in ihrer ersten Version (Prototyp) als geeignet erwiesen, unter den nach dem Auslassventil eines Dieselmotors herrschenden Bedingungen (Druck bis 2 bar, Temperaturen bis 700 °C), zuverlässig Proben zu entnehmen

Es hat sich gezeigt, dass, um eine stabile Anzeige am Airsense Massenspektrometer zu erreichen, eine Öffnungszeit des Ventils von 30 ms erforderlich ist. Infolge der langen Halte- und Abkling-Phasen des Spektrometers ist es zwar möglich die Emissionen eines einzelnen Zyklus zu messen, jedoch nicht die Emissionen jedes einzelnen Zyklus aus einer Folge von Einzelmessungen. D.h. sollte mehrere Einzelzyklen untersucht werden, ist zwischen zwei Entnahmen ein genügend grosser zeitlicher Abstand einzuhalten.

Da nicht das Entnahmeventil das limitierende Element des Ansprechverhaltens ist – dessen Zykluszeit liegt unter 1.5 ms, d.h. unter 10 Grad Kurbelwinkel bei 1200 min<sup>-1</sup> – darf davon ausgegangen werden, dass unter Einsatz eines schnelleren Messgerätes Einzelzyklen oder gar Phasen von Einzelzyklen auch aus kontinuierlichen Folgen von Zyklen mittels des Entnahmeventils analysiert werden können.

Ferner ist es gelungen, das Ventil unmittelbar im Brennraum eines Dieselmotors einzusetzen. Das Ventil konnte in seiner ersten Version der Dauerbelastung durch hohe Drücke und Temperaturen auf die Dauer nicht standhalten, sodass geringfügige Leckagen auftraten. Auf Grund dieser Erfahrungen unter den im Brennraum herrschenden Bedingungen, wurde die Schliessnadel des Ventils als Schwachstelle identifiziert und modifiziert.

Das Ventil steht zwar grundsätzlich für zukünftige Messungen zur Verfügung, wegen des nicht vernachlässigbaren Risikos eines Motorschadens durch allfällige weitere noch nicht erkannte Schwachstellen, konnten wir dieses im Rahmen der hier beschriebenen Versuche nicht mehr einsetzen. Wir hätten gegebenenfalls die termingerechte Durchführung aller geplanten Versuche nicht mehr gewährleisten können.

### .Arbeitspaket 3: Synergetische Anwendung schneller Messverfahren

Die 2011 am MTU Einzylinder-Motor durchgeführten Versuche mit dem Drei-Wellenlängen Pyrometer (Optical Light Probe - OLP) wurden an dem gemäss Arbeitspaket 1 fertig eingerichteten Prüfstand fortgesetzt und in Synergie des KTI-Projekts 10604 „*Entwicklung eines marktauglichen Messsystems für die Erfassung der Inzylinder-Russkonzentration und Temperatur eines Serien-Dieselmotors*“ mit Kistler Winterthur als Umsetzungspartner abgeschlossen.

Durchgeführte Untersuchungen am voll indizierten Dieselmotor:

- Finden einer gültigen Korrelation zwischen der im Zylinder mittels OLP festgestellten Russbildung und der im Auspuff emittierten Russmasse.
- Möglichkeiten und Grenzen der Messung des im Zylinder gefangenen Anteils an Restgas und rezirkuliertem Abgas mittels OLP.
- Anwendung der OLP an Modelltransienten zur Identifikation von einzelnen Arbeitsspielen, welche hohe Russmassen emittieren.
- Überprüfen der Robustheit für den industriellen Einsatz im Rahmen umfangreicher Messkampagnen

Diese Arbeiten konnten weitestgehend erfolgreich abgeschlossen werden. Es hat sich gezeigt, dass mittels der OLP wertvolle Aufschlüsse über die Russbildung und -oxidation im Zylinder unter verschiedenen, sowohl unter stationären als auch transienten Betriebsbedingungen, gewonnen werden können. Es konnten insbesondere interessante Aussagen zum Einfluss von Vor- und Nacheinspritzungen auf die Russbildung- und Oxidation gemacht werden. Ebenso konnte der Einfluss rezirkulierten Abgases und Mechanismen zur Erhöhung der Turbulenzen im Brennraum auf die Russbildung und -oxidation geklärt werden. Dank dieser Ergebnisse konnten wesentlich Fortschritte in Arbeitspaket 4 (Modellierung) erzielt werden.

Eine gültige Korrelation zwischen der im Zylinder mittels OLP festgestellten Russbildung im Zylinder und der im Auspuff emittierten Russmasse konnte gefunden werden. Es zeigte sich jedoch, dass diese von der Einbaulage der OLP und der Konfiguration des Brennverfahrens abhängig ist. Damit muss für jede Applikation eine neue Korrelation und damit Kalibration des Messsystems bestimmt werden. Für industrielle Anwendungen ist dieser Vorgang durchaus denkbar und üblich.

Es liess sich erwartungsgemäss ein Zusammenhang zwischen der aus den OLP – Signalen berechneten mittleren Russtemperatur und dem im Zylinder gefangene Anteil an Restgas, bzw. rezirkuliertem Abgas feststellen (fallende Russtemperatur mit steigendem Anteil Abgas). Die Korrelation ist jedoch im gegenwärtigen Entwicklungsstand der Sonde mit zu grossen Unsicherheiten behaftet, sodass daraus noch keine genügend genaue Aussagen über den Anteil an gefangenen Abgas an der Zylinderfüllung möglich sind.

Grundsätzlich ist die Möglichkeit gegeben, durch konstruktive Massnahmen die Konstruktion der OLP soweit zu verbessern, dass die Anwendung der Pyrometrie hinsichtlich Genauigkeit und Auswertungsmöglichkeiten der Messdaten wesentlich erweitert werden können.

Der OLP-Einsatz bei transientem Motorbetrieb zeigte die Russentwicklung zyklusaufgelöst und mit guter Übereinstimmung zu den Abgasmessungen an. Es lassen sich damit auch wenige Arbeitszyklen finden, die für hohe Russemissionen verantwortlich sind. Als Messpunkte dienten konstruierte Modelltransienten, wo gezielt einzelne Parameter variiert wurden. Die erfassten vielfältigen Messgrößen und Berechnungen waren konsistent über alle Modelltransienten.

Ein neuer Ansatz vergleicht aus den OLP-Messungen die maximale scheinbare Schwarzkörpertemperatur (Mass für die Strahlungsintensität) mit den NO<sub>x</sub>-Messungen im Abgas. Es stellte sich für konstante Drehzahlen ein vielversprechender Zusammenhang heraus, der aber weiter untersucht werden muss.

#### Arbeitspaket 4: Schnelle Modelle, Russgeregelter Dieselmotor (Ein Projekt der FVV, in Zusammenarbeit mit IDSC/ETHZ)

Basierend aus dem Wissen der am LAV hergeleiteten Russmodelle, wurde ein virtueller Russensor (VSS) entwickelt, der ohne unterstützende Russmessung auskommt. Mit dem VSS können die Russemissionen aufgrund von Steuergerätevariablen und mittels aus den Zylinderdruckdaten gewonnen charakteristischen Verbrennungsgrößen, zyklusaufgelöst und online prognostiziert werden. Die Modellstruktur ist abgeleitet aus dem mittels 3-Farben-Pyrometrie optisch gemessenen repräsentativen Russbildeverlauf. Das Modell verwendet 3 sequentielle Phasen, welche den innermotorischen Russverlauf nachbilden und wird anhand von Abgas-Russmessungen kalibriert. Diese drei Phasen sind: eine reine Bildungs-, eine Misch- und eine reine Oxidationsphase. Die stationäre Korrelation des virtuellen Russensors auf die mit PASS (Photo-Acoustic Soot Sensor) gemessenen Abgas-Russemissionen ist sehr gut. Weiter ist der virtuelle Russensor in der Lage, die transienten Effekte auf die Russemissionen genügend genau wiederzugeben.

Die erfolgreiche Integration des virtuellen Russensors in die Regelungsstruktur wird auf mehreren Fahrzyklen demonstriert. Diese Resultate zeigen das Potential von virtuellen Sensoren bezüglich erweiterter Regelstrategien und bieten die Möglichkeit, den Ansatz der Verwendung des Zylinderdruckverlaufs auf weitere Schadstoffe (vor allem NO<sub>x</sub>) anzuwenden.

Arbeitspaket 5: Die Reduktion von NO<sub>x</sub> in einem Ammonia SCR System über einen Fe-Zeolith konnte, mittels des im Rahmen des Projekts entwickelten 1D+1D Modells für den katalytischen Konverter, erfolgreich simuliert werden. Ein Verfahren zur Kalibration der die Reaktionskinetik und die Systemeigenschaften repräsentierenden Modellparameter wurde vorgeschlagen und erfolgreich angewendet. Hundertachtzig über einen breiten Betriebsbereich verteilte Fälle wurden experimentell und mittels Simulation untersucht um die Güte der berechneten Parameter zu überprüfen. Die erfolgreiche Validierung des Modells an Hand experimenteller Daten für den dynamischen Betrieb eines für Dieselmotoren repräsentativen SCR-Systems zeigte, dass mit dem entwickelten Modell ein robustes und für einen breiten Einsatzbereich geeignetes Werkzeug für die Simulation von SCR-Systemen für Fahrzeug-Anwendungen zur Verfügung steht. Somit wurden die Ziele dieses Arbeitspakets vollumfänglich erfüllt.

#### Fazit

In den Arbeitspaketen 1, 3, 4 und 5 konnten alle Anforderungen vollumfänglich, in Arbeitspaket 2 grösstenteils erfüllt werden.

Für das FVV-Projekt „Schnelle Modelle, Russ geregelter Dieselmotor“ (Arbeitspaket 4) wurde, wegen des erfolgreichen Abschlusses und den viel versprechenden Ergebnissen, auf Vorschlag der das Projekt begleitenden Obleute, von der Projektgruppe des FVV der Prozess für ein Folgeprojekt freigegeben; ein definitiver Entscheid steht noch aus.

In Arbeitspaket 2 „ Applikation des LAV Gasentnahmeventil“ konnten alle vorgesehenen Versuche durchgeführt werden, lediglich auf einen erneuten Einsatz des verbesserten und einsatzbereiten Ventils zur Probeentnahme aus dem Zylinder wurde letztendlich verzichtet, um – im Fall einer nicht voll-

ständigen auszuschliessenden Havarie des Ventils - eine Beschädigung des Motors und damit einen grossen Zeitverzug zu vermeiden.

#### Publikationen

Aus dem Projekt – Arbeitspakete 1 bis 5 – ergaben sich insgesamt 12 Publikationen - vollständige Liste siehe Kapitel .9.)

## **Ausgangslage**

Am LAV wurden im Rahmen verschiedener Projekte Arbeiten zur Untersuchung und Charakterisierung der Russ-Bildung und –Emission in Dieselmotoren durchgeführt. So wurde in Zusammenarbeit mit der Industrie (Kistler Winterthur) im KTI-Projekt Nr: 6048.1 EBS ein miniaturisiertes Drei-Wellenlängen-Pyrometer (Optical Light Probe OLP) entwickelt und am LAV wird ein schnelles Entnahmeventil entwickelt, welches aus dem Brennraum des Motors Abgas- aber auch Russ-Proben entnehmen kann. Auch wurden bereits verschiedene Zeit- und Zyklus-aufgelöste Modelle zur Vorausberechnung der Russemissionen entwickelt und anhand von Messungen validiert.

## **2. Ziele der Arbeit**

Vollständige experimentelle Erfassung der massgebenden Motorparameter (Thermodynamische Zustände im Zylinder, Partikelmasse- und NOx- Emissionen) im stationären und instationären Betrieb.

Entwicklung umfassend validierter Modelle für den Brennverlauf und die Russemissionen unter stationären und instationären Betriebsbedingungen.

Numerische Simulation eines SCR-deNOx – Katalysators..

## **3. Methode**

Für den für die Versuche vorgesehenen 4-Zylinder Motor (Liebherr D924) wird ein Prüfstand neu aufgebaut. Der Motor wird vollständig indiziert. (Arbeitspaket 1) D.h. jeder Zylinder wird mit einem Drucksensor zur Erfassung des indizierten Drucks und einem Drei- Wellenlängen- Pyrometer zur winkelaufgelösten Erfassung der Russtemperatur und –dichte ausgestattet. Aufgezeichnet werden die Signale mit einem eigens für dieses Projekt beschafften Transientenspeicher (20 Kanäle, 14 Bit Auflösung, 16 Megasamples/Kanal Speicher). In einer ersten Phase dieses Vorhabens ist der Prüfstand aufzubauen und zu instrumentieren.

Zusätzlich steht ein MTU Ein-Zylinder Dieselmotor mit 4 lt Hubvolumen als Versuchsträger für vertiefte Untersuchungen an der Dieselerverbrennung zur Verfügung.

Das sehr schnelle miniaturisierte Drei-Wellenlängen-Pyrometer sowie das in Entwicklung stehende schnelle Probeentnahmeventil sollen für grundsätzliche Untersuchungen zur Schadstoffbildung eingesetzt werden. Das Ventil erlaubt Proben direkt aus dem Brennraum zu entnehmen und ermöglicht, durch seine sehr kurzen Öffnungszeiten von in der Größenordnung 1 ms, zeitaufgelöste Untersuchungen der Entwicklung von Russ oder Schadstoffen. Als Analysewerkzeuge stehen entweder ein schnelles Massenspektrometer des Typs Airsense von V&F oder verschiedene Geräte zur Bestimmung von Partikel-Masse und –Größenverteilung zur Verfügung.

## 4. Arbeitspaket 1: Aufbau eines Prüfstands „Heavy Duty – Diesel Motor“

### 4.1. Gegenstand

Aufbau, Ausrüstung, Instrumentierung und Inbetriebnahme eines neuen Prüfstands „Heavy Duty – Diesel Motor“.

Der Prüfstand soll sowohl Messungen unter stationären Betriebsbedingungen als auch unter Lasttransienten ermöglichen. Die auszuführenden Arbeiten beinhalten den Aufbau und die Instrumentierung des Motors (Thermodynamische und optische Indizierung aller vier Zylinder), sowie Entwurf und Implementation der Prüfstandssteuerung und der Messdatenerfassung. In Zusammenarbeit mit Kistler Instrumente AG führte das LAV das KTI Projekt Nr. 10604.1 zum Thema „Entwicklung eines marktauglichen Messsystems für die Erfassung der Inzylinder - Russkonzentration und –temperatur eines Serien-Dieselmotors“ aus. Der fertig instrumentierte Prüfstand wurde für dieses Projekt in Betrieb genommen und erstmals erfolgreich eingesetzt. Die erzielten Erkenntnisse und Ergebnisse wurden auch für die in Arbeitspaket 4 auszuführenden Arbeiten verwendet.

### 4.2. Versuchsträger

Als Versuchsträger dient ein Liebherr D924 4-Zylinder-Motor mit folgenden Daten:

Bohrung	122 mm
Hub	142 mm
Hubvolumen	6.64 lt

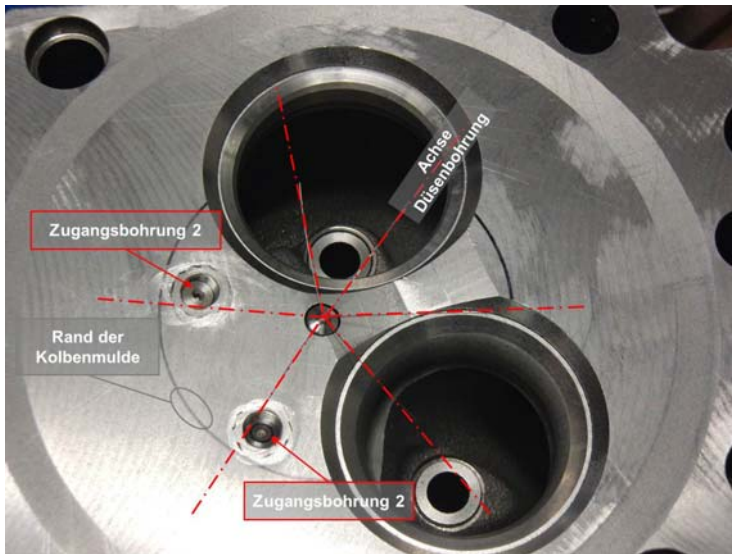
Tabelle 1: Spezifikationen des Liebherr D924 Dieselmotors

Der Motor, original mit einer konventionellen Einspritzung ausgerüstet, wurde im Rahmen eines früheren Projekts (A. Bertola 2003, Diss. ETH No. 15373) am LAV mit einer Common-Rail Einspritzanlage versehen.

#### 4.2.1. Modifizierter Zylinderkopf

Der 2-Ventil-Zylinderkopf dieses Motors entspricht nicht mehr ganz dem Stand der Technik, hat aber gerade dadurch den Vorteil, dass genügend Raum für den brennraumbündigen Einbau mehrere Sensoren pro Zylinder vorhanden ist. So können beispielsweise die Druckindizierung und die optische Sonde für pyrometrische Messungen gleichzeitig optimal eingebaut werden

Abbildung 1 zeigt den Zylinderkopfboden mit den zwei in den Brennraum mündenden Zugangsbohrungen sowie der Einspritzdüse. Die strichpunkttierten Linien markieren die Achsen der Düsenbohrungen bzw. der Einspritzstrahlen. Infolge der konstruktiven Gegebenheiten, so ist der Injektor nicht parallel zu der Zylinderachse, kann die Lage der Einspritzstrahlen bezüglich den Zugangsbohrungen nicht verändert werden.

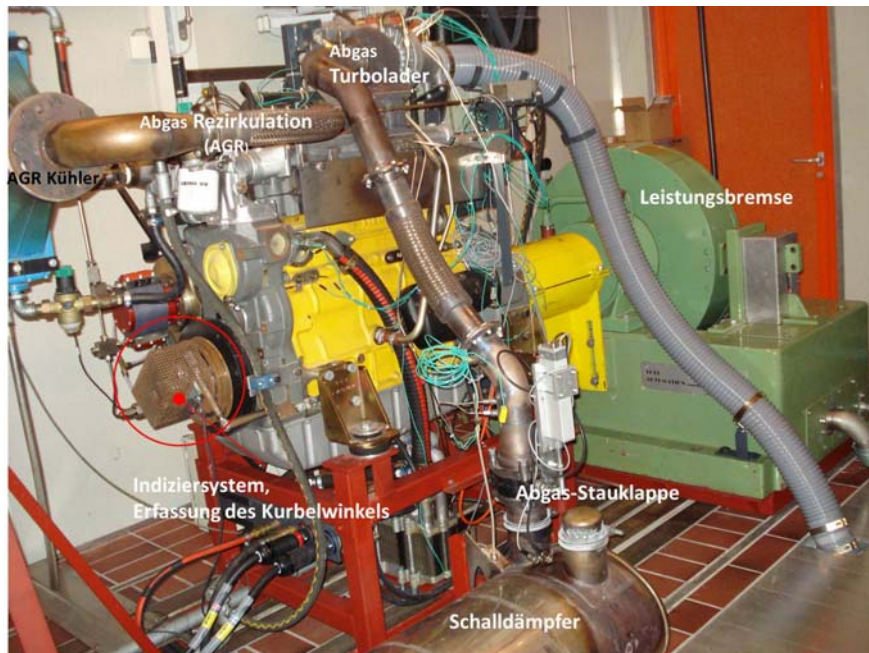


**Abbildung 1: Zugangsbohrungen im Zylinderkopf**

Die beiden Zugangsbohrungen zum Brennraum führen teilweise durch Kühlwasserkanäle und sind mit den Kühlkanal abdichtenden Hülsen versehen, welche der Aufnahme der für den Einbau vorgesehenen Sensoren dienen. Beide Bohrungen erlauben einen brennraum-bündigen Einbau von Sensoren und ermöglichen damit eine präzise Druckindizierung bei gleichzeitiger Erfassung des Russleuchtens mittels des miniaturisierten Pyrometers (OLP) von Kistler. Die Applikation dieser Messtechnik findet sich in Abschnitt 6 „Synergetische Anwendung schneller Messverfahren..“ beschrieben.

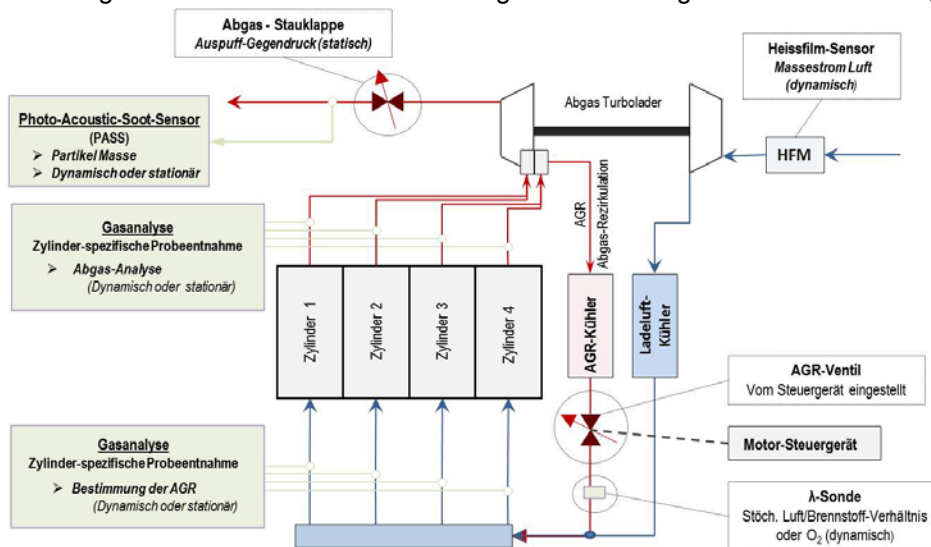
#### 4.2.2. Aufbau und Ausrüstung des Versuchsträgers

Die folgende *Abbildung 2* zeigt den fertig auf dem Prüfstand aufgebauten Motor:



**Abbildung 2:** Aufbau des Motors auf dem Prüfstand

Zur Untersuchung des Verhaltens des Motors unter Lasttransienten ist eine Zylinder-individuelle Bestimmung des Anteils an rezirkuliertem Abgas und der Abgaszusammensetzung zentral.



**Abbildung 3:** Instrumentierung für Last-Transienten

*Abbildung 3* zeigt schematisch die zur Untersuchung von Zylinder zu Zylinder Variabilität und von Last-Transienten zusätzlich angebrachten Messstellen und Module:

- **Entnahme-Stellen** für Gasproben im Ein- und Auslass jedes Zylinders.
- **Lambda – bzw. Sauerstoff-Sonde im AGR-Pfad** unmittelbar vor der Beimischung des Abgases zu der Frischluft zur Bestimmung des Anteils an beigemischtetem Abgas in der Frischluft unter Lasttransienten.

Diese Instrumentierung erlaubt auch unter transienten Bedingungen die momentane Zusammensetzung des Abgases unmittelbar vor der Beimischung zu bestimmen und damit aus der in der Frischluft gemessenen Abgas-Komponente CO<sub>2</sub> den Anteil an rezirkuliertem Abgas in der Frischluft für jeden Zylinder und Zyklus zu berechnen. Der zusätzliche Sensor (Lambda-Sonde) wird benötigt, weil wegen

der Transportzeit die Zusammensetzung des Abgases unmittelbar vor der Beimischung zur Frischluft unter transienten Bedingungen nicht mit der im Auspuff nach Auslass gemessenen übereinstimmt.

Die unten folgenden *Abbildung 4* und *Abbildung 5* zeigen die Anordnung der in *Abbildung 3* schematisch dargestellten Elemente am Motor im Prüfstand.

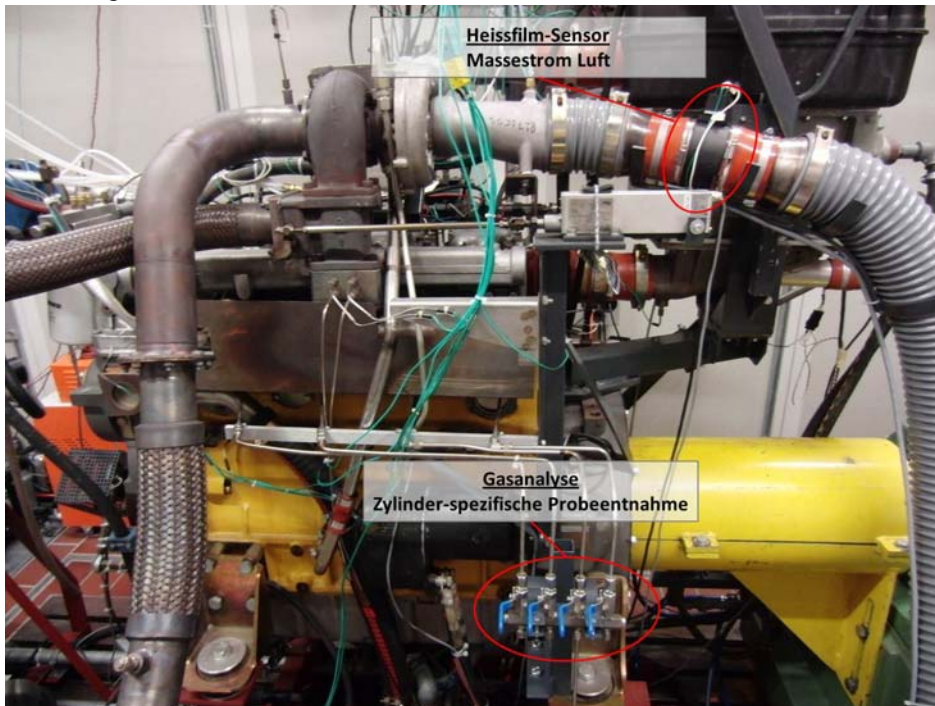


Abbildung 4: Anordnung der Messstellen



Abbildung 5: Anordnung von Lambda-Sonde und AGR-Ventil

### 4.2.3. Steuerung und Überwachung des Prüflings

Nach einer Totalrenovierung des Labors, anstelle einer grossen Halle wurden Einzelboxen eingebaut, war auch die gesamte Steuerung und Überwachung des aufgebauten Motors neu zu konzipieren und zu bauen. Sowohl die Planung als auch die Realisierung der Anlage waren durch Instituts-eigene Kräfte im Rahmen dieses Arbeitspakets zu realisieren. Die folgenden *Abbildung 6* und *Abbildung 7* zeigen einige Elemente der realisierten Steuerung/Überwachung:

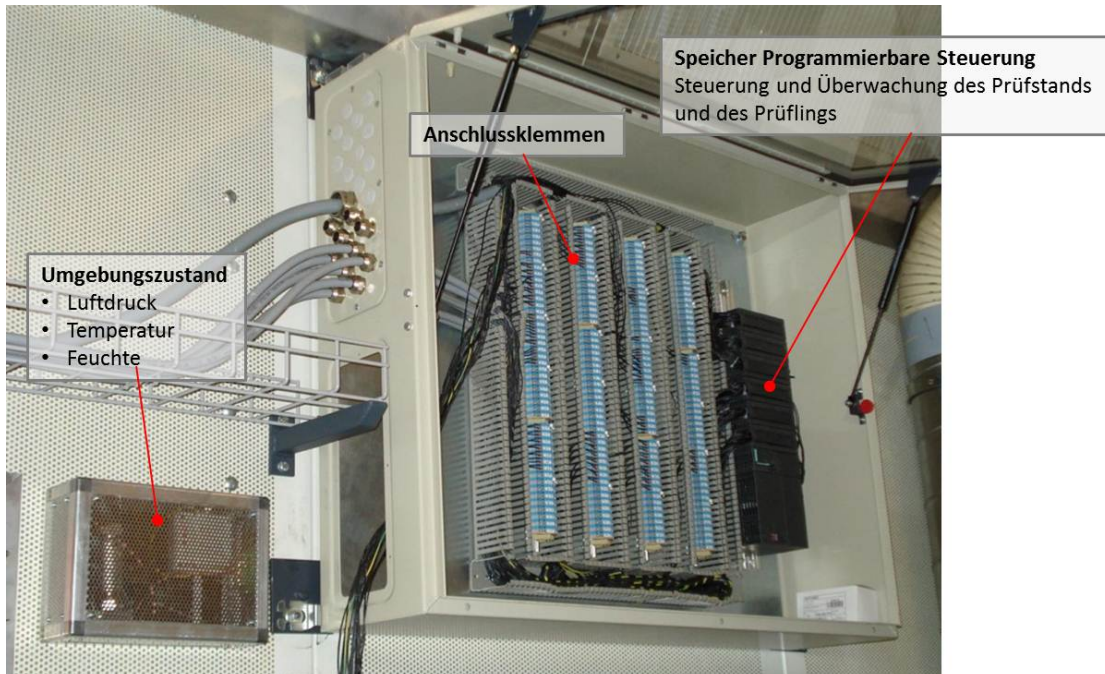


Abbildung 6: Anschlussklemmen und Steuerung/Überwachung



Abbildung 7: Bedienpult

#### 4.2.4. Messtechnik und Messdatenerfassung

Ebenso wie die Steuerung und Überwachung des Prüftandes, war auch die Computer-gestützte Erfassung der verschiedenen Messgrößen wie Drücke, Temperaturen und anderen Größen neu aufzubauen. Als Basis dienen Input- / Output-Module von Wago Contact, die in beliebiger Anzahl in Gruppen zu sogenannten Messknoten zusammengeschaltet und über Ethernet mit einer Messdatenerfassung verbunden werden. Diese Lösung – mit dezentralen Messknoten – erlaubt die Mess-Signale führenden Verbindungen zu den Sensoren möglichst kurz zu halten, was insbesondere bei Thermoelementen sehr vorteilhaft ist. Die folgende *Abbildung 8* zeigt schematisch den Systemaufbau und *Abbildung 9* die Realisierung eines Messknotens:

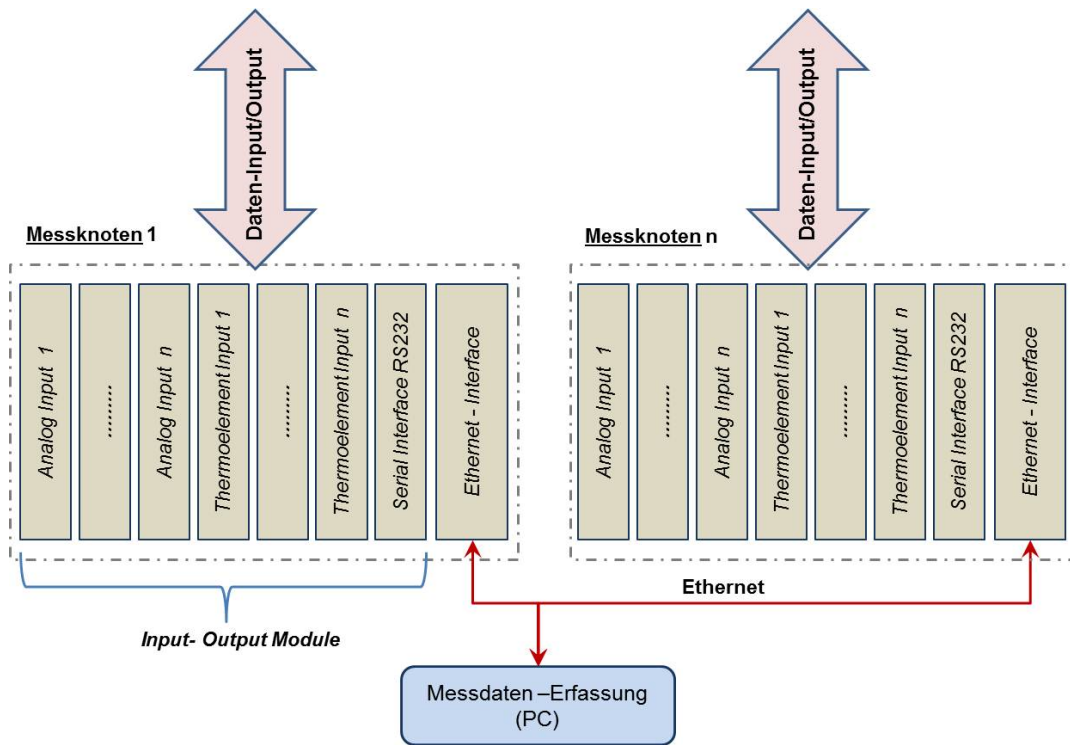


Abbildung 8: Messdatenerfassung auf Basis von WAGO Modulen

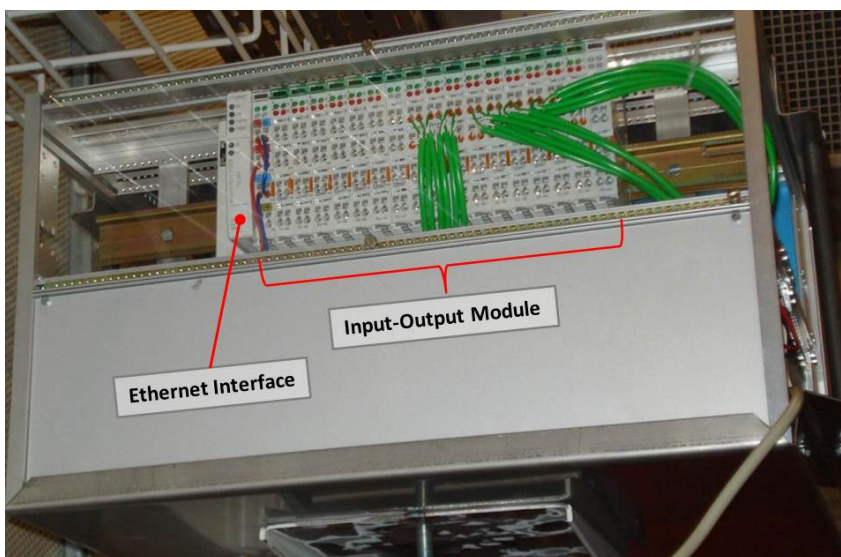


Abbildung 9: Realisierung eines Messknotens

Die folgende *Abbildung 10* zeigt das Bedienfeld des fertig Instrumentierten Prüfstands:

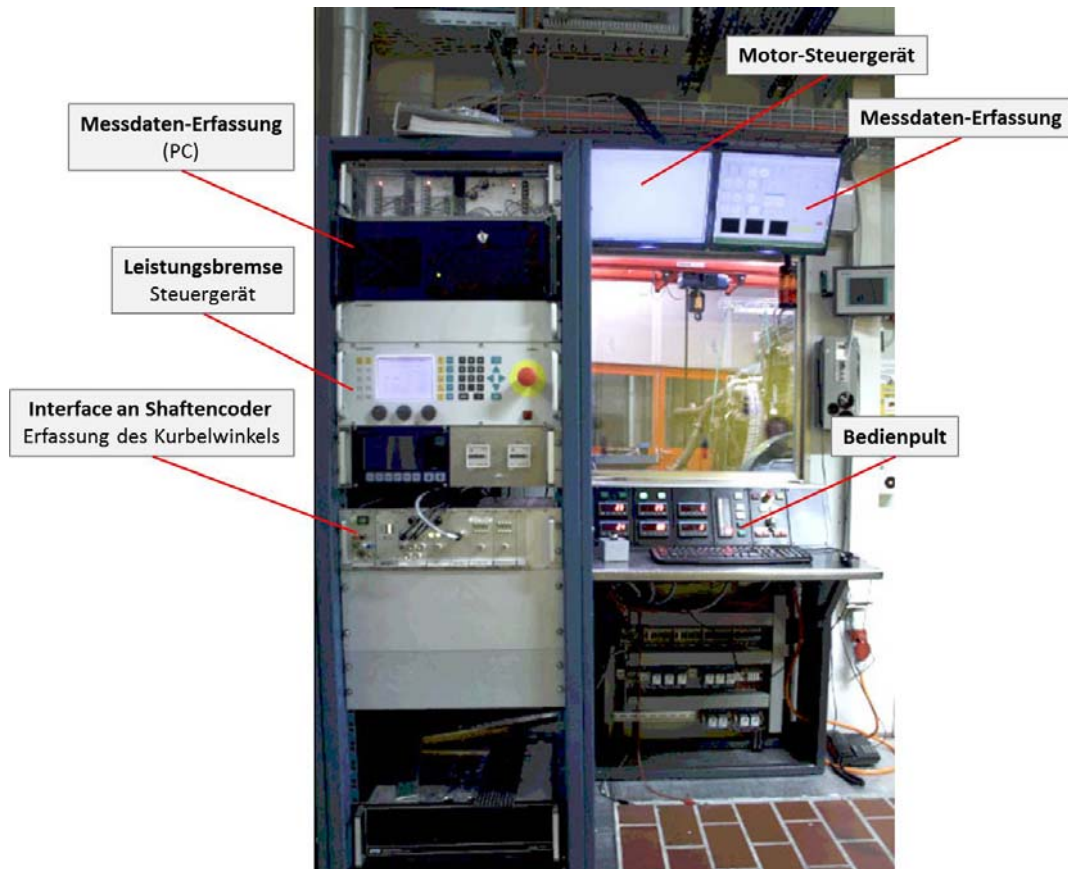


Abbildung 10: Bedienfeld des Prüfstands

#### 4.3. Erreichte Ziele

Die gesetzten Ziele, Aufbau und Instrumentierung eines Prüfstandes für Heavy Duty Dieselmotoren, wurden vollumfänglich erreicht. Der an allen vier Zylindern indizierte Liebherr D924 Dieselmotor konnte nicht nur für die in diesem Projekt vorgesehenen Messungen (Arbeitspakete 6 und 7), sondern zusätzlich auch für ein KTI-Projekt zur Entwicklung eines In-Zylinder Pyrometers zur zeitaufgelösten Messung der Russtemperatur und Russdichte im Zylinder, eingesetzt werden.

Konzept und Software des Prüfstands wurden zudem auf einen zweiten, ebenfalls neu aufgebauten Prüfstand übertragen.

## 5. Arbeitspaket 2: Applikation des LAV Gasentnahmeventils

### 5.1. Gegenstand

Das am LAV entwickelte schnelle Gasentnahmeventil soll vorerst im Einlass- und Auslass-System ersten Tests unterzogen, sowie später im Zylinder eingesetzt und zur Zeit-aufgelösten Analyse der Bilde-Prozesse von Schadstoffen (NO und Russ) angewendet werden. Insbesondere soll das Ventil im Zusammenspiel mit dem Airsense – Massenspektrometer zur Zeit-aufgelösten Untersuchung der Bildung gasförmiger Schadstoffe tauglich gemacht werden.

### 5.2. Konstruktion der Sonde

Die Gas-Entnahmesonde die in diesem Projekt zum Einsatz bei In-Zylinder-Messungen kommen soll, wurde vollständig am LAV entwickelt. *Abbildung 11* zeigt eine Ansicht der Sonde.

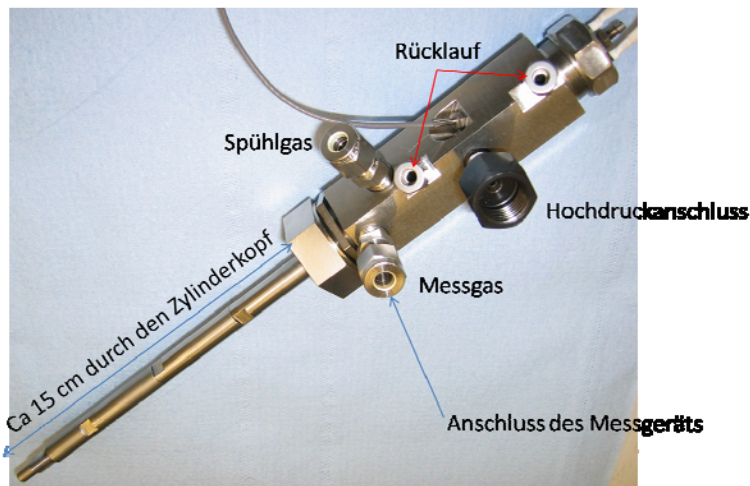


Abbildung 11: Entnahmesonde

Der Steuerteil des Entnahmeventils beruht auf demjenigen eines Common-Rail-Injektors welches anstelle der Düsennadel die Ventilnadel betätigt.

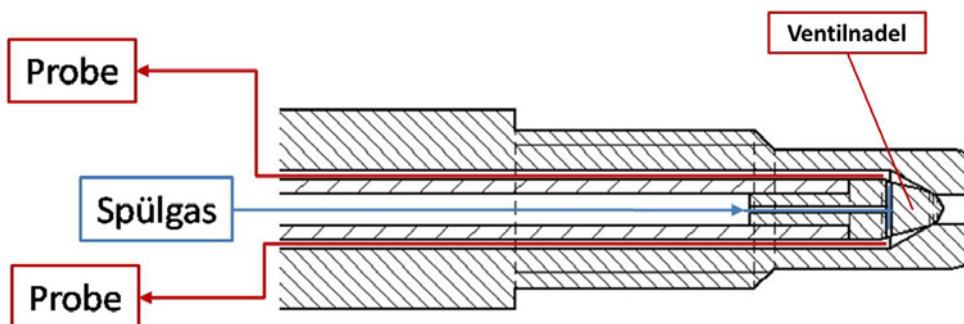


Abbildung 12: Sondenspitze mit Probe- und Spülgasführung

Die obige *Abbildung 12* zeigt die Konstruktion von Nadel und Sondenspitze sowie die Führung des Spül- und Probegases. Die Spülung des Ventils wurde im Hinblick auf den Einsatz des Ventils zur Gewinnung von Proben aus Flammen vorgesehen. Durch eine Verdünnung der Probe kann eine Kondensation des in den Verbrennungsgasen enthaltenen Wassers und eine Ablagerung von Russ verhindert werden

### 5.3. Durchgeführte Versuche

#### 5.3.1. Öffnungs- und Schliess-Verhalten der Sonde

Die Ergebnisse der Untersuchungen des Öffnungs- und Schliessverhaltens des Ventils in Abhängigkeit der Bestromungsdauer sind in *Abbildung 13* dargestellt. Bei einer Bestromungsdauer von 0.8ms erreicht die Nadel erstmals den vollen Hub. Jedoch ist bei dieser Bestromungsdauer die Schliessbewegung etwas langsamer, als bei den übrigen.

Die erste Reaktion auf den Öffnungspuls erfolgt nach ca. 0.2ms, der volle Hub ist nach ca. 0.9 ms erreicht, die erste Reaktion auf den Schliesspuls erfolgt nach ca. 0.3ms und nach ca. 0.6ms ist die Nadel wieder geschlossen. Leider kann die Zeit nicht sehr exakt bestimmt werden, da der Übergang zwischen geschlossen und zusammendrücken der Nadel resp. entspannen der Nadel und tatsächlichem Öffnen nur annähernd bestimmt werden kann.

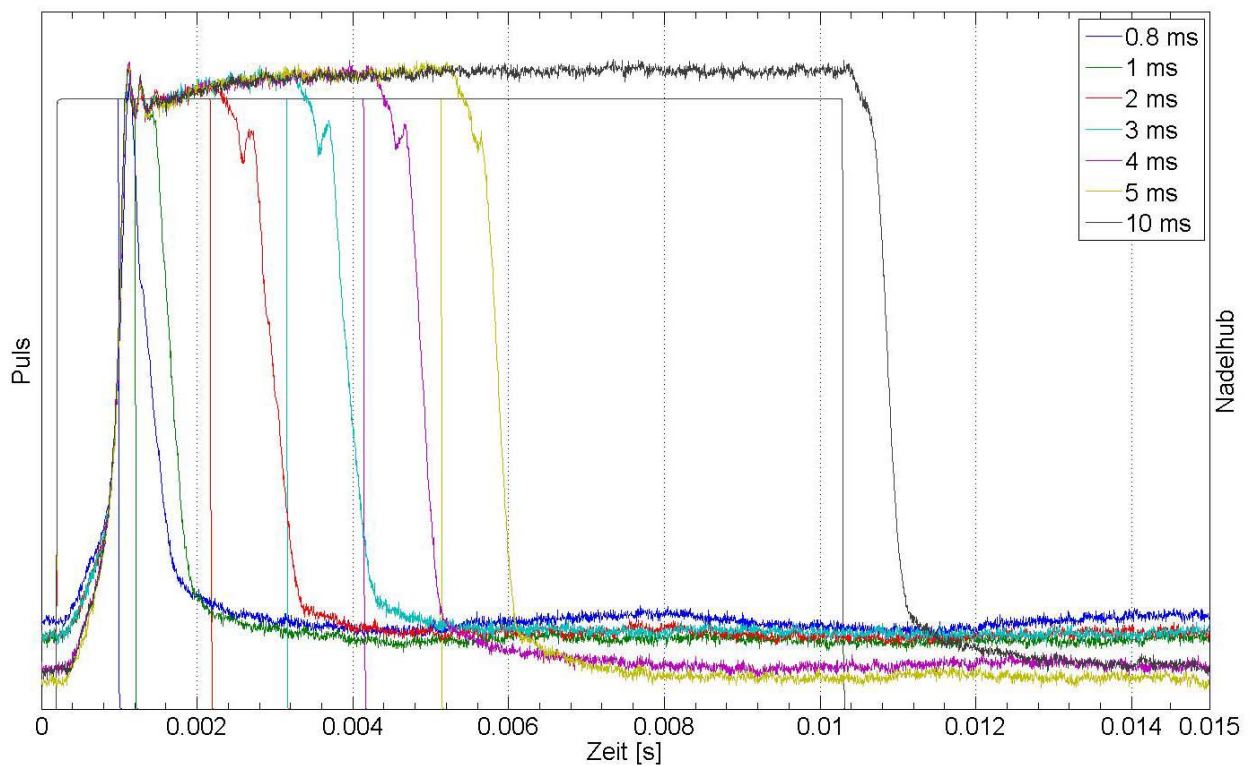


Abbildung 13: Öffnungs- und Schliessverhalten für verschiedene Bestromungszeiten

### 5.3.2. Verwendetes schnelles Massenspektrometer

Beim verwendeten Massenspektrometer handelt es sich ein Produkt der Firma V&F mit den folgenden Eigenschaften:

- Ionisierung: Ionenstoss
- Primärgase: Xe, Kr, Hg
- Ansprechzeit 10 ms
- Umschaltzeit Primärgase: 400 ms

Das Massenspektrometer wurde speziell für den Einsatz an Verbrennungsmotoren konzipiert. *Abbildung 14* zeigt schematisch den Aufbau des Geräts, *Abbildung 15* dessen Ansicht.

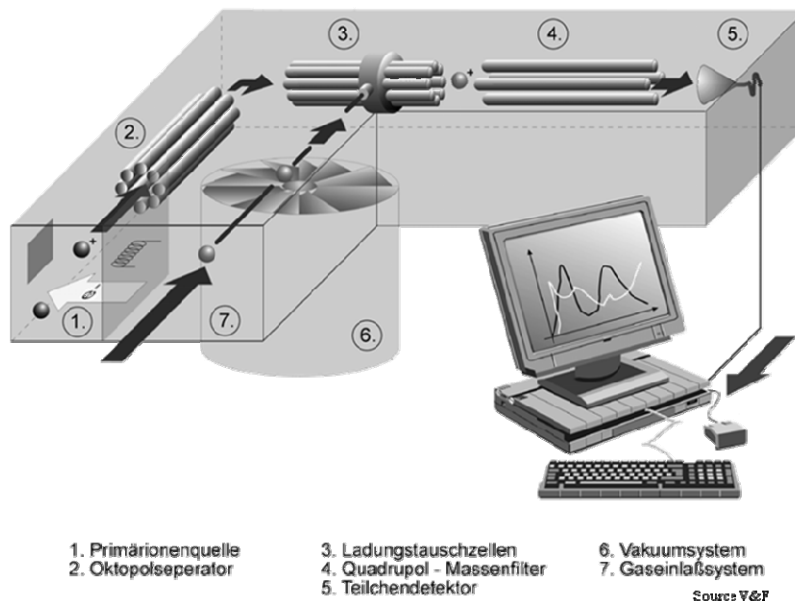


Abbildung 14: Schematischer Aufbau des Massenspektrometers



Abbildung 15: Massenspektrometer

### 5.3.3. Optimierung der Probeentnahmen

In einer ersten Phase wurde die Entnahmesonde an einem speziell aufgebauten Prüfstand (Abbildung 16) auf ihre Funktionstüchtigkeit unter hohen Drücken überprüft.

Vorgehen: Der Behälter wird mit einem definierten Gasgemisch gefüllt. Unter unterschiedlichen Drücken werden Entnahmen gemacht und mit dem Massenspektrometer des Typs „Airsense“ analysiert. Dabei wird die Abhängigkeit des Messsignals auf Gasdruck, Entnahmedauer und Entnahme-Frequenz untersucht. Ebenfalls wurde die Bewegungscharakteristik der Nadel aufgezeichnet.

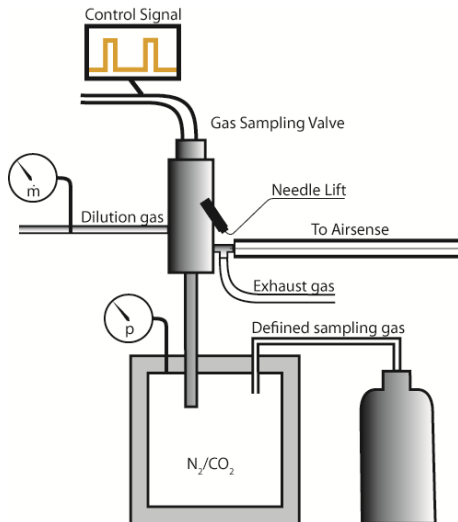


Abbildung 16: Versuchsaufbau und Testumgebung zur Optimierung der Probeentnahme

In umfangreichen Versuchen an der Testumgebung konnte die folgende optimale Anbindung des Massenspektrometers an die Entnahmesonde gefunden werden (Abbildung 17):

- Die Probekapillare wird über den Bypass bis in die Entnahmesonde soweit verlängert, dass eine Vermischung des nur kurzzeitig entnommenen „Probegas-Pfropfens“ mit Spülgas weitgehend vermieden wird.

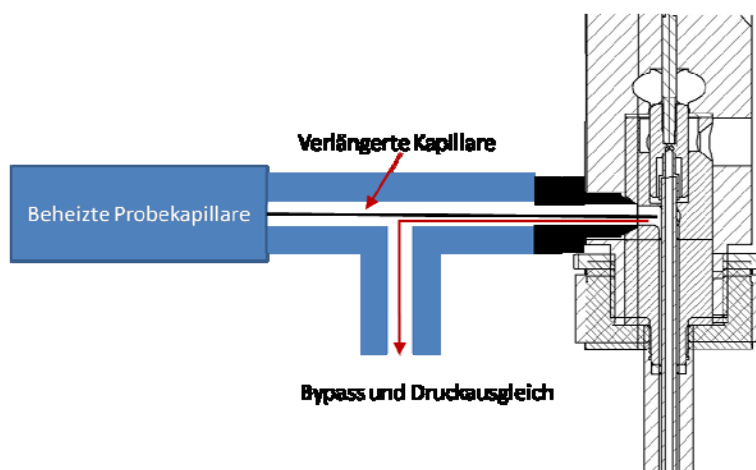


Abbildung 17: Modifizierter Anschluss des Massenspektrometers

Da die mit dem Gerät mitgelieferte beheizte Probekapillare eine solche Verlängerung nicht gestattet, wurde eine geeignete neue Probekapillare beschafft.

Durch diese Anordnung konnten die Ansprechzeiten des Massenspektrometers auf ein Minimum reduziert werden.

## 5.4. Einsatz der Sonde an Verbrennungsmotoren

### 5.4.1. Einzylinder-Forschungsmotor MTU 396

Der Einzylinder Forschungsmotor basiert auf einem MTU 396 ‚Heavy-Duty‘ Motor und weist mit 185mm Bohrung und 165mm Hub ein Hubvolumen von rund 4 Liter auf. Der original mit einer konventionellen Einspritzung ausgerüstete Motor wurde am LAV erfolgreich auf eine Common-Rail – Einspritzung umgebaut. *Abbildung 18* gibt eine Übersicht über den Prüfstand mit den notwendigen Hilfsaggregaten wie Fremdaufladung, Abgasrückführung und Schleppmotor.

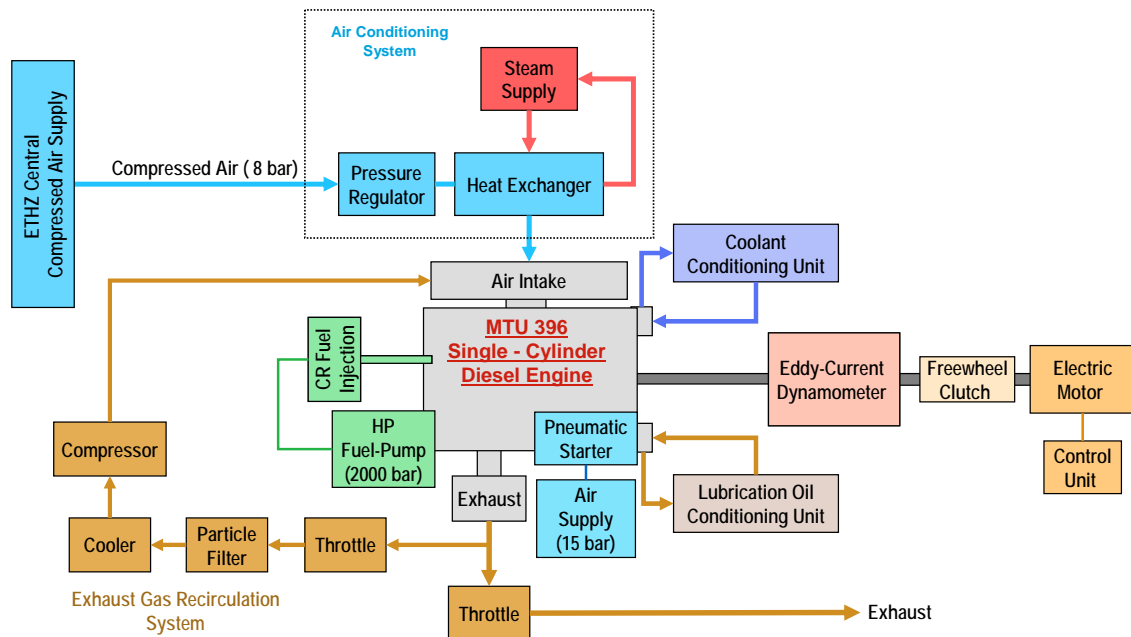


Abbildung 18: Anlage-Schema des MTU396 Forschungsmotors

Der sehr aufwendige Aufbau ermöglicht die Einstellung beliebiger Druckdifferenzen zwischen Ein- und Auslass bei gleichzeitig frei einstellbarer Abgasrückführung (AGR). Der Druck im Einlass kann zwischen Umgebungsdruck und 5 bar Überdruck variabel eingestellt werden. Ebenso kann die Einlass-Temperatur sehr genau eingestellt werden, der Einstellbereich reicht von ca. 15° C (Laborkühlwasser) bis ca. 100° C. Ein leistungsstarker Elektromotor erlaubt den Schleppbetrieb bis ca. 1400 U/min; als Starthilfe gelangt ein pneumatischer Anlasser zum Einsatz.

#### 5.4.2. Probeentnahme im Auslass des Motors

Um die Tauglichkeit der Sonde unter erhöhter Temperatur zu überprüfen, wurde in einer ersten Phase die Gas-Entnahmesonde im Auslass-System in ca. 30 cm Entfernung von den Auslassventilen eingebaut (Abbildung 19). Da hier die Gas-Entnahmesonde wegen Schwingungen des Motors grosse Drehmomente auf die Befestigung ausüben würde, wurde der Aktuatorkopf zum Auslassrohr hin abgestützt.

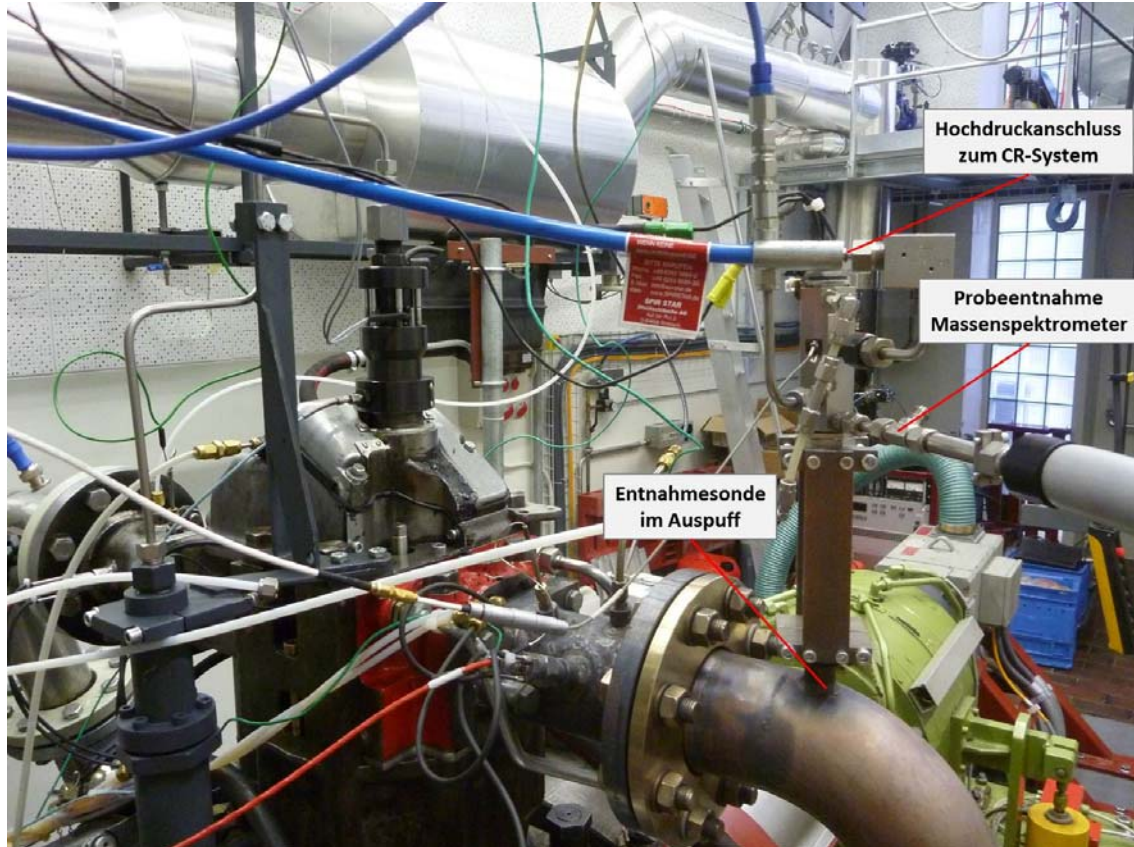


Abbildung 19: Eingebaute Gas-Entnahmesonde im Auslass-System des Einzylindermotors

### 5.4.3. Ergebnisse der Messungen im Auspuff

Die Gas-Entnahmesonde wurde bei verschiedenen Betriebspunkten des Motors getestet. Dabei variierten, neben der Zusammensetzung des Abgases, auch dessen Druck und Temperatur an der Entnahmestelle. Der Auslassgegendruck wurde zwischen 1.3 bar und 2 bar, die Temperatur zwischen 400°C und 700°C variiert. Mit dem Massenspektrometer wurde der Anteil NO im Abgas erfasst und mit Ergebnissen der konventionellen Stickoxidmessung mittels Abgasanalyseanlage verglichen. Der von der Abgasanalyseanlage gemessene Wert lag zwischen 560ppm und 3000ppm NOx.

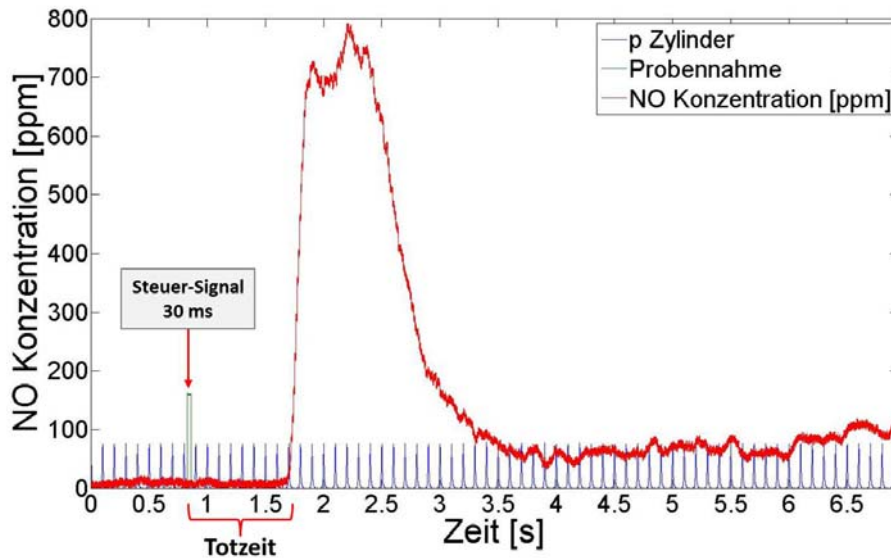


Abbildung 20: Einzelentnahme

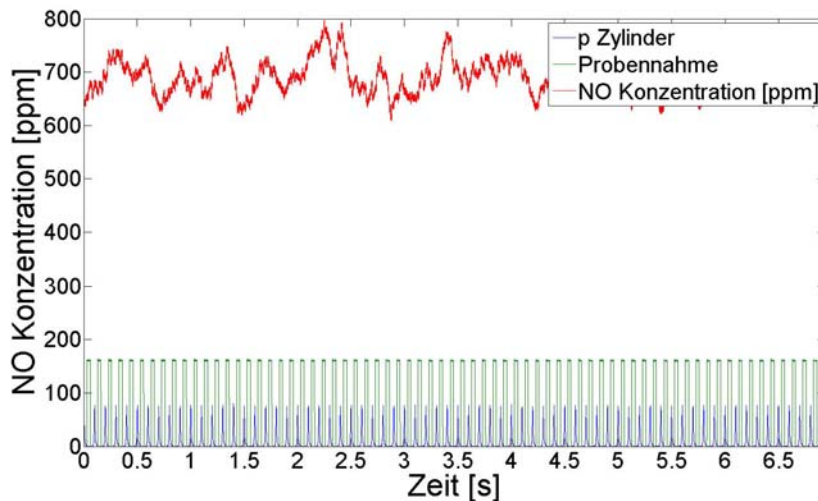


Abbildung 21: Folge von Einzelentnahmen

Die Gas-Entnahmesonde wurde während der Gaswechselphase für 30ms geöffnet. Mit dieser Öffnungszeit erreichte das Massenspektrometer den Maximalausschlag an einer Einzelmessung, d.h. die gleiche angezeigte Konzentration wie bei einer kontinuierlichen Entnahme bei jedem Zyklus. Den typischen Verlauf einer Einzelmessung zeigt *Abbildung 20* bzw. *Abbildung 21* denjenigen einer kontinuierlichen Probeentnahme vom jeweils 30 ms an allen aufeinanderfolgenden Zyklen

Das NO-Signal des Massenspektrometers ist mit einer Totzeit von 0.9s – d.h. 9 Arbeitsspielen bei einer Drehzahl von 1200min<sup>-1</sup> - behaftet. Nachdem das NO-Signal den Endausschlag erreicht hat, bleibt es bei der Öffnungsdauer von 30 ms über 0.6s stabil, bevor es wieder abfällt; der anschließende Signalabfall dauert ebenfalls 0.9s bis das NO-Signal wieder einen stabilen Grundpegel erreicht. Um in kurzer Zeit wieder ganz null zu erreichen, muss der Messpfad gespült werden.

Es zeigt sich somit, dass mit dem zur Verfügung stehenden Massenspektrometer durchaus Aussagen über die Emissionen/Schadstoffbildung eines einzelnen Arbeitsspiels möglich sind, aber nicht an einzelnen Zyklen einer Folge von unmittelbar aufeinander folgenden Arbeitsspielen.

Werden die Ergebnisse der Messungen mittels Gas-Entnahmesonde und Massenspektrometer mit den Werten der konventionellen Abgasanalyse verglichen (*Abbildung 22*), so kann festgestellt werden, dass die mittels der Gas-Entnahmesonde gemessenen Werte in der Regel unter den mittels Abgasanalyse ermittelten Werten liegen. Dies ist durchaus plausibel, da das Massenspektrometer sehr selektiv die molekulare Masse von NO (30.008) misst und dessen Isotope nicht erfasst, während die konventionelle Abgasanalyse sowohl sämtliche Isotope von NO als auch schon zu NO<sub>2</sub> oxidiertes NO erfasst.

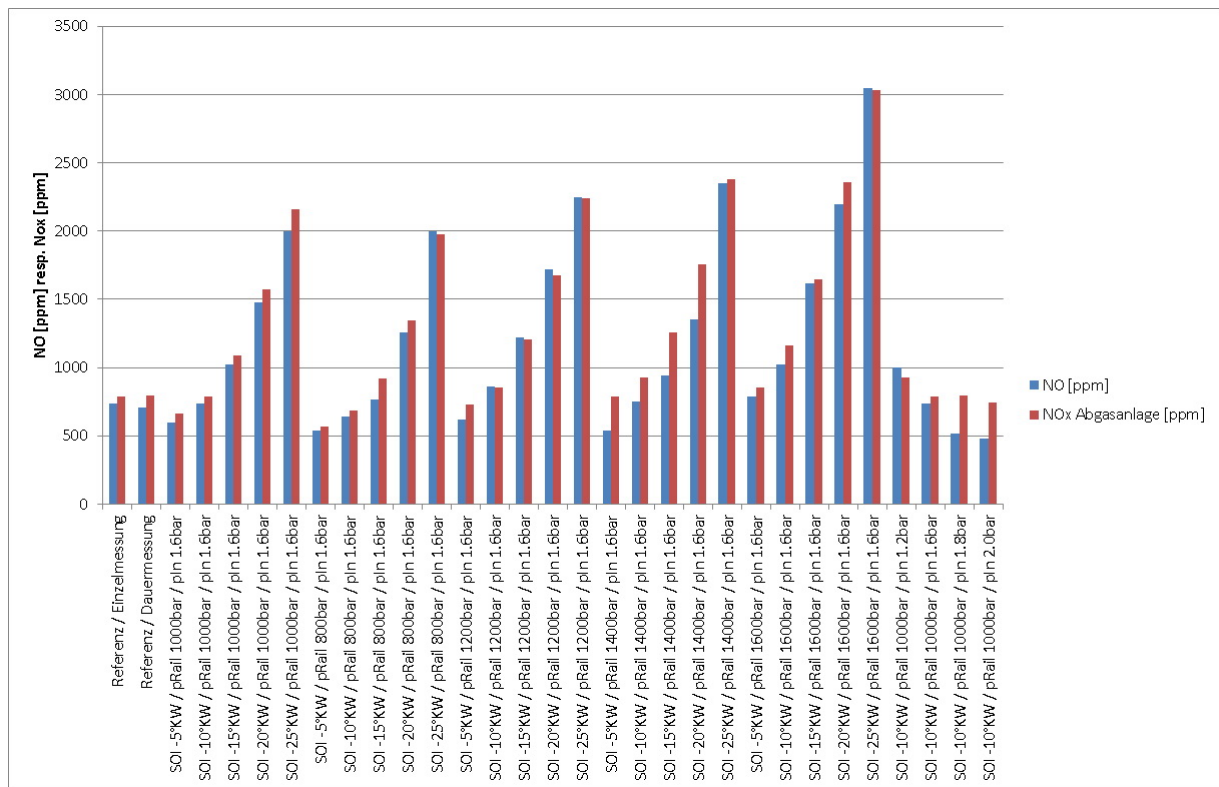
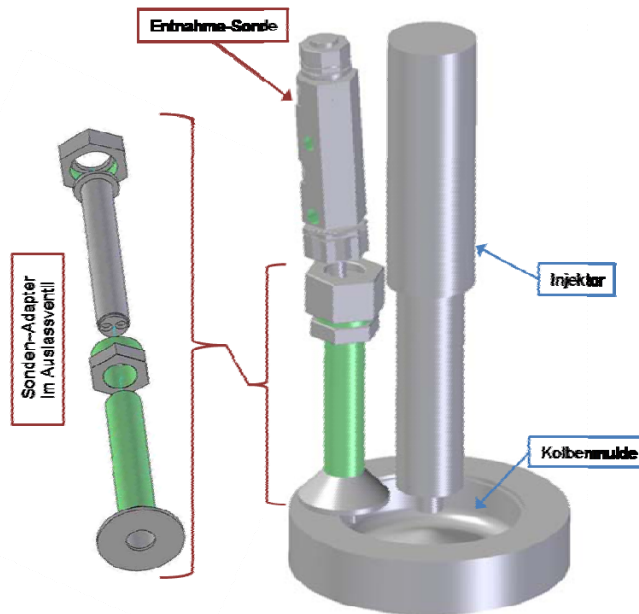


Abbildung 22: NO-Messung, Vergleich Massenspektrometer vs konventionelle Messanlage

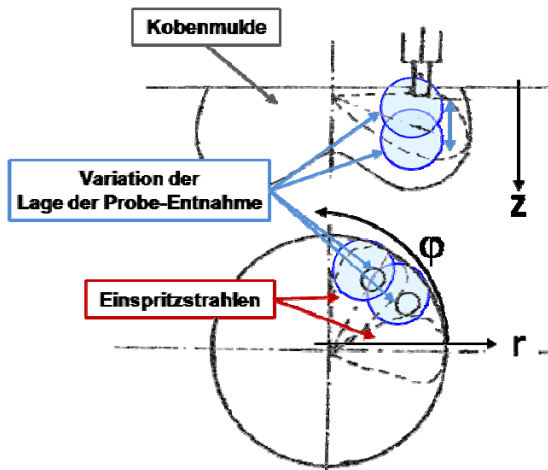
#### 5.4.4. Einbau der Entnahmesonde im Zylinderkopf des MTU 396

Damit die Entnahmesonde in den Brennraum des MTU 396 eingeführt werden kann, war der Zylinderkopf zu modifizieren. Zu diesem Zweck wurde ein Auslassventil durch einen universell nutzbaren Adapter ersetzt. *Abbildung 23* zeigt die Adaption:



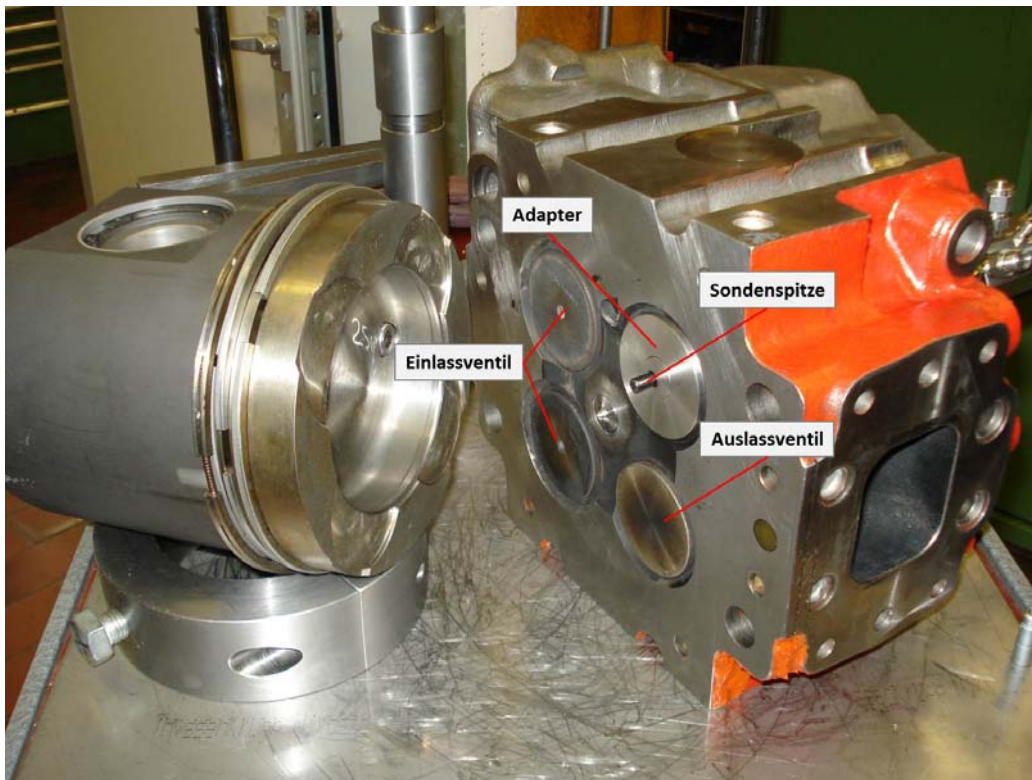
**Abbildung 23: Einbau der Entnahmesonde anstelle eines Auslassventils**

Die Konstruktion des Adapters erlaubt eine Probe-Entnahme in unterschiedlichen Tiefen und Lagen in der Kolbenmulde. *Abbildung 24* zeigt die Möglichkeiten der Variation der Entnahmestelle.

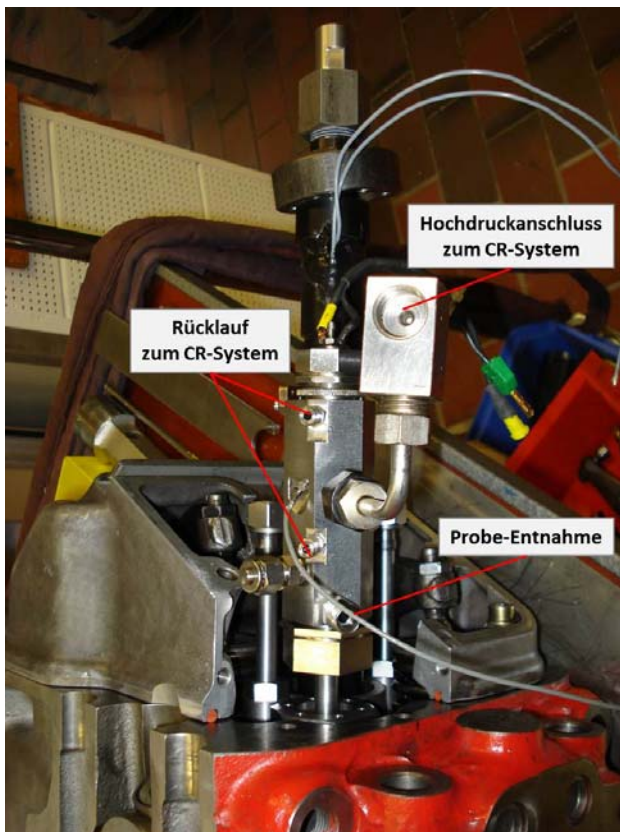


**Abbildung 24: Mögliche Lagen der Entnahmesonde**

Die folgende *Abbildung 25* zeigt den Einbau der Sonde im Zylinderkopf, bzw auf dem Zylinderkopf (*Abbildung 26*).



**Abbildung 25:** Einbau der Entnahmesonde an Stelle des Auslassventils



**Abbildung 26:** Aufbau der Sonde auf dem Zylinderkopf

#### 5.4.5. Ergebnisse mit der in den Brennraum eingebauten Sonde

##### Ungefeuerter Betrieb

In einem ersten Schritt wurde der ungefeuerte Motor geschleppt und extern aufgeladen um die Dichtfähigkeit der Gas-Entnahmesonde bei annähernd Betriebs-realistischen Bedingungen zu testen. Die externe Aufladung erlaubt es im Zylinder einen Kompressionsenddruck zu erreichen, der dem maximal zulässigen Zylinderdruck entspricht.

##### Gefuehrter Betrieb

In einem zweiten Schritt wurde der Motor gefeuert betrieben ohne dass die Gas-Entnahmesonde geöffnet wurde. Auch diesen Bedingungen –erhöhte Temperaturen und Drücke – hielt die Gas-Entnahmesonde stand und blieb dicht.

Erste Öffnungszyklen der Entnahmesonde sowie der Betrieb über längere Zeit bei höheren Lasten zeigten dann aber eine Schwäche der Gas-Entnahmesonde. Die Spitze der Schliessnadel wurde durch die hohen Kräfte und Temperaturen leicht verbogen, sodass eine Abdichtung nicht mehr gegeben war. Eine erste Modifikation der Nadelspitze bestand aus einer Nadelspitze aus Automatenstahlstab anstelle des Zirkonium Oxyd-Röhrchens. Dadurch wird die Einblasstelle des Spülgases zwar einige Zentimeter zurückversetzt, jedoch die Festigkeit, insbesondere bei höheren Temperaturen, wird erhöht.

Wegen einer Havarie des MTU 396 konnten mit der modifizierten Sonde leider keine weiteren Versuche mehr durchgeführt werden.

#### 5.5. Erreichte Ziele

- Die Sonde hat sich bereits in ihrer ersten Version (Prototyp) als geeignet erwiesen, unter den nach dem Auslassventil eines Dieselmotors herrschenden Bedingungen (Druck bis 2 bar, Temperaturen bis 700 °C), zuverlässig Proben zu entnehmen.
- Die Messung mit dem Airsense Massespektrometer ist auf Grund der Transportzeit der Probe durch die Probekapillare mit einer Totzeit von ca 0.9s behaftet.
- Um eine stabile Anzeige am Massenspektrometer zu erreichen ist eine Öffnungszeit des Ventils von 30 ms erforderlich.
- Die langen Halte- und Abkling-Phasen (siehe *Abbildung 20*) erlauben zwar die Emissionen eines einzelnen Zyklus zu ermitteln, jedoch nicht die Emissionen jedes einzelnen Zyklus aus einer Folge von Einzelmessungen.
- Es ist gelungen das Ventil unmittelbar im Brennraum eines Dieselmotors einzusetzen, das Ventil konnte in seiner ersten Version der Dauerbelastung durch hohe Drücke und Temperaturen auf die Dauer nicht standhalten, sodass geringfügige Leckagen.
- Auf Grund der Erfahrungen unter den im Brennraum herrschenden Bedingungen wurde die Schliessnadel des Ventils als Schwachstelle identifiziert und modifiziert.
- Wegen einer Havarie des MTU 396 konnte das modifizierte Ventil bis zum Abschluss dieses Projekts nicht mehr getestet werden. Das Ventil steht jedoch für weitere Versuche zur Verfügung.

#### 5.6. Ausblick

Da nicht das Entnahmeventil das limitierende Element des Ansprechverhaltens ist – dessen Zykluszeit liegt unter 1.5 ms, d.h. unter 10 Grad Kurbelwinkel bei 1200 min<sup>-1</sup> – darf davon ausgegangen werden, dass unter Einsatz eines schnelleren Messgerätes Einzelzyklen oder gar Phasen von Einzelzyklen auch aus kontinuierlichen Folgen von Zyklen mittels des Entnahmeventils analysiert werden können.

## **6. Arbeitspaket 3: Synergetische Anwendung schneller Messverfahren für Russ- und Stickoxidemissionen und relevante Motorparameter**

### **6.1. Gegenstand**

Zur Untersuchung der Bildung von Russ-, Stickoxidemissionen und relevanten Motorparameter während verschiedener Modell- (Last-) Transienten, sollen verschiedene Messverfahren synergetisch angewendet werden. Das Arbeitspaket 3 ist sowohl mit Arbeitspaket 4 „Entwicklung eines sehr schnellen Modells zur Berechnung der Russemissionen (Virtueller Russ-Sensor)“, als auch, wenn auch in geringerem Masse, mit Arbeitspaket 2 „Applikation des LAV Gasentnahmeventils“ verbunden.

### **6.2. Mitfinanzierung**

FVV-Vorhaben „Russgeregelter Dieselmotor“  
NEADS Teilprojekt „Combustion-Interface“

### **6.3. Durchgeführte Arbeiten**

Der gemäss Arbeitspaket 1 (siehe Abschnitt 4) vollindizierte Motor wurde zur Umsetzung des KTI Projekts 10604 „*Entwicklung eines marktauglichen Messsystems für die Erfassung der Inzylinder-Russkonzentration und Temperatur eines Serien-Dieselmotors*“ sowohl unter stationären als auch transienten Bedingungen eingesetzt. Im letzteren Fall allerdings ohne transiente Messung der NOx-Emissionen im Abgas.

Wesentliche Ziele dieses Projekts waren:

- Überprüfen der Robustheit des Sensors bezüglich Kalibrierung und Standfestigkeit
- Korrelation der im Zylinder optisch gemessenen Russmasse mit den im Auspuff gemessenen Russemissionen
- Prüfen der Eignung zu Bestimmung der AGR-Verteilung in den einzelnen Zylindern sowohl unter stationären als auch und vor allem unter transienten Bedingungen.

Versuche und Projekt konnten im Oktober 2011 erfolgreich abgeschlossen werden. Die Ergebnisse sind im KTI Schlussbericht mit Datum 21.10. 2011 festgehalten.

Die Untersuchungen entsprechen in ihrer Zielsetzung einer ersten Phase der für Arbeitspaket 3 vorgesehenen Arbeiten und wurden auch zur Entwicklung des „schnellen Modells zur Berechnung der Russemissionen (Virtueller Russ-Sensor)“ (siehe Abschnitt 7; Arbeitspaket 4) herangezogen.

## 6.4. Grundlegende Untersuchungen

### 6.4.1. Anwendung des In-Zylinder-Pyrometers (Optical Light Probe OLP)

Die zum Einsatz gelangende OLP wurde ursprünglich am LAV von R. Schubiger im Rahmen seiner Dissertation (R. Schubiger 2001, Diss. ETH Nr. 14445) entwickelt und von Kistler AG, Winterthur miniaturisiert und zu einem kommerziellen Produkt weiterentwickelt.

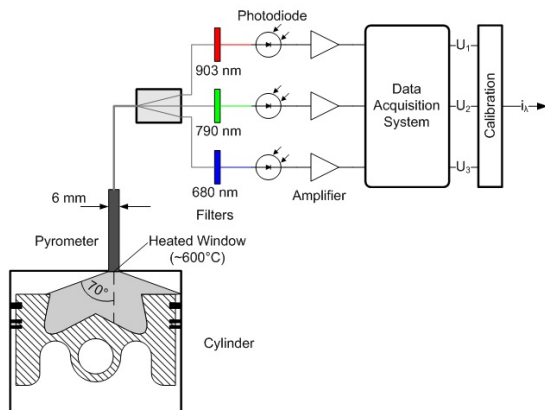


Abbildung 27: OLP, Schematischer Aufbau

Das von der miniaturisierten und auf 600°C beheizten Sonde erfasste Licht wird über einen Lichtleiter auf die Verstärker-Elektronik geleitet und hier auf drei Pfade aufgeteilt (Abbildung 27).

Die drei Lichtsignale fallen durch schmalbandige optische Filter (903 nm, 790 nm, 680 nm) auf je eine Photodiode, werden verstärkt und stehen als Spannungssignale zur weiteren Verarbeitung zur Verfügung.

Die OLP muss vor ihrer Verwendung an einem geeigneten Standard auf spektrale Strahldichte geeicht werden.

In allen im Folgenden beschriebenen Versuchen wurden aus den Signalen der OLP die Zeit- bzw. Kurbelwinkel aufgelösten Größen „Russ-Temperatur“ und „Russdichte (KL)“ berechnet. Die dazu verwendeten Algorithmen sind in der Dissertation R. Schubiger 2001, ETH Nr. 14445 ausführlich hergeleitet und begründet.

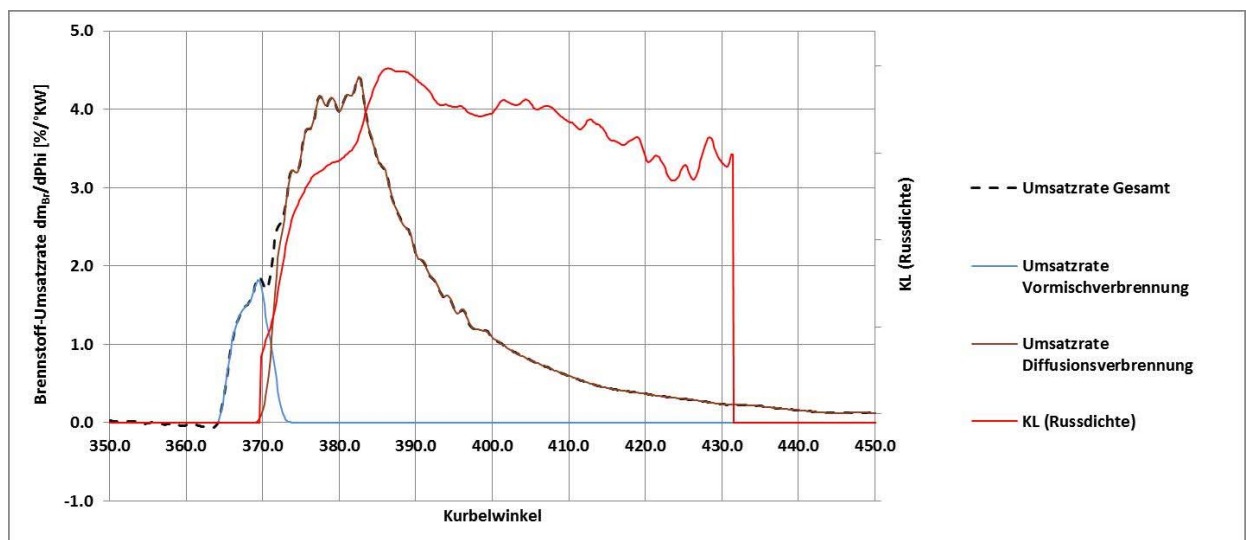
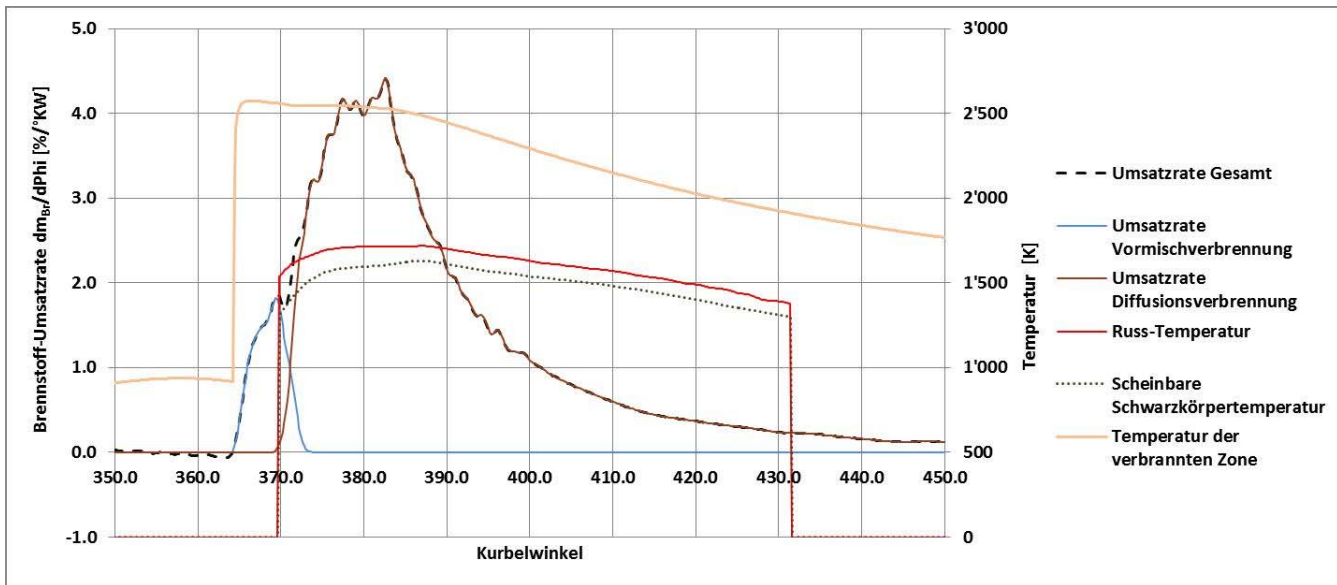


Abbildung 28: Brennstoff-Umsatzrate e und Russdichte

Abbildung 28 zeigt den Verlauf des Brennstoff-Umsatzes und der Russdichte. In der Darstellung ist die Umsatzrate in die sich überlagernden Phasen Vormischverbrennung (blau) und Diffusionsverbrennung (braun) aufgeteilt. In der letzteren wird die Verbrennung durch Diffusion gesteuert und läuft bei tiefen stöchiometrischen Luft/Brennstoffverhältnissen ab. Erst unter diesen Bedingungen wird Russ gebildet, weshalb auch erst in dieser Phase die OLP ein auswertbares Signal (Russ-Leuchten) erfassen kann. Die Berechnung von Russ-Dichte und –Temperatur wird abgebrochen, sobald wegen einer zu geringen Lichtintensität bzw. zu tiefem Signal/Rauschen – Verhältnis, das Signal nicht mehr zuverlässig ausgewertet werden kann. Als Grenzwert dient eine minimale scheinbare Schwarzkörper-Temperatur (siehe unten Abbildung 29).



**Abbildung 29: Brennstoff-Umsatzrate und Russ-Temperatur**

Abbildung 29 zeigt den Verlauf des Brennstoff-Umsatzes sowie der Russ-Temperatur (rot), der scheinbaren Schwarzkörpertemperatur des Russes (gepunktet) und der Temperatur der Verbrennungszone (ocker); in der letzteren wurde ein stöchiometrisches Luft/Brennstoff – Verhältnis von 1.05 angenommen. Die deutlich unter dieser Zonentemperatur liegende Russ-Temperatur bestätigt, dass der Prozess der Russ-Bildung unter Sauerstoffmangel abläuft.

### 6.4.2. Korrelation der Russdichte im Zylinder (KL) mit gemessenen Russemissionen

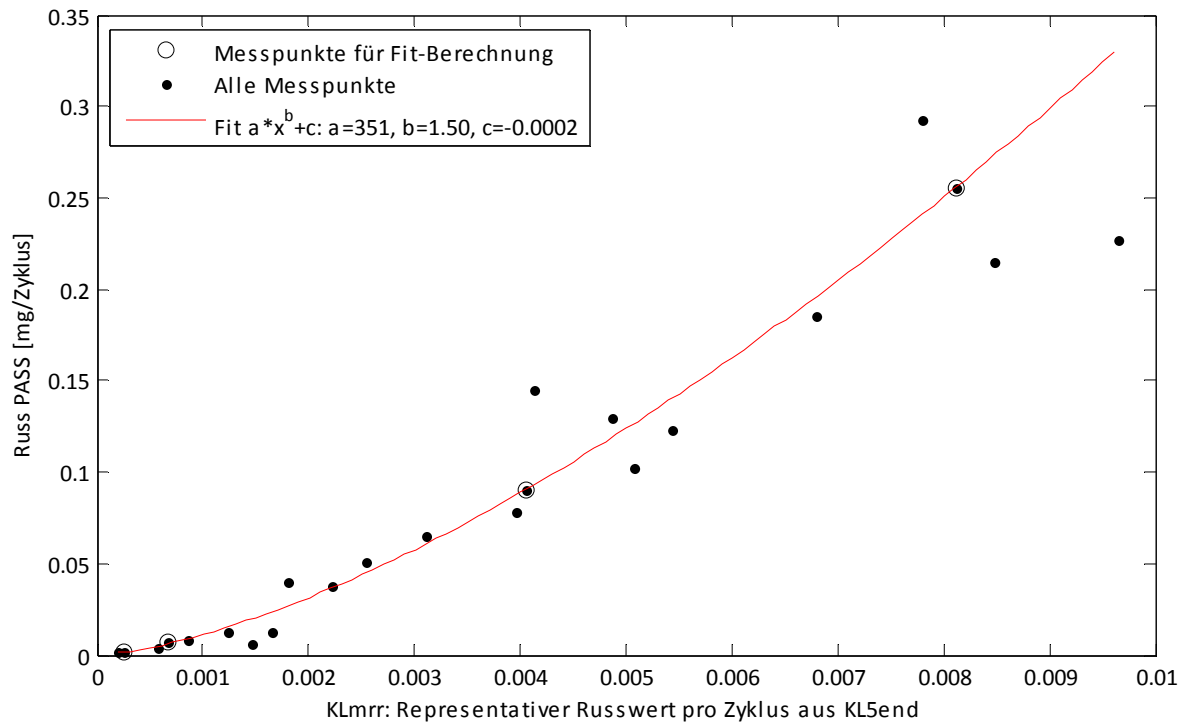
Sowohl für alle weiteren Untersuchungen als auch für den Einsatz der OLP in der Forschung, bildet eine zuverlässige Korrelation zwischen der mittels OLP im Zylinder gemessenen Russdichte und der im Abgas messbaren Russ-Emission eine wesentliche Voraussetzung.

Aus allen untersuchten Ansätzen hat sich eine Korrelation des KL-Werts bei Abbruch der Auswertung (unterschreiten einer minimalen scheinbaren Schwarzkörper-Temperatur von 1450 K) als bestgeeignet erwiesen. Das lässt sich damit begründen, dass bei dieser Temperatur die Russ-Oxidation weitgehend abgeschlossen und diese Russdichte für die emittierte Russmasse repräsentativ ist.

#### ➤ Bestimmen der Korrelation

In einem ersten Schritt wird die Korrelation zwischen der repräsentativen Russdichte im Zylinder und der im Abgas gemessenen Russemission aus Messungen unter breit gestreuten Lastpunkten und unterschiedlichen Russ-Emissionen bestimmt. Die Russ-Emission wird mittels des Photo-Acoustic-Soot-Sensors (PASS) gemessen, welcher diese als Masseanteil an reinem Kohlenstoff im Abgas angibt.

Die im Abgas gemessene Russemission wird in mg/Arbeitspiel umgerechnet, damit ist der Wert direkt mit der im Zylinder pyrometrisch bestimmten Russdichte vergleichbar (*Abbildung 30*).



**Abbildung 30: Korrelation KL-Endwert und Russ-Emission**

*Abbildung 30* zeigt die gefundene Korrelation zwischen einem repräsentativen KL-Endwert – als repräsentativ für Russmasse im Zylinder bei Abschluss der Russbildung – und der im Abgas gemessenen Russmasse. Die so gewonnene Beziehung wird für alle weiteren Umrechnungen von KL-Werten in emittierte Russmasse verwendet.

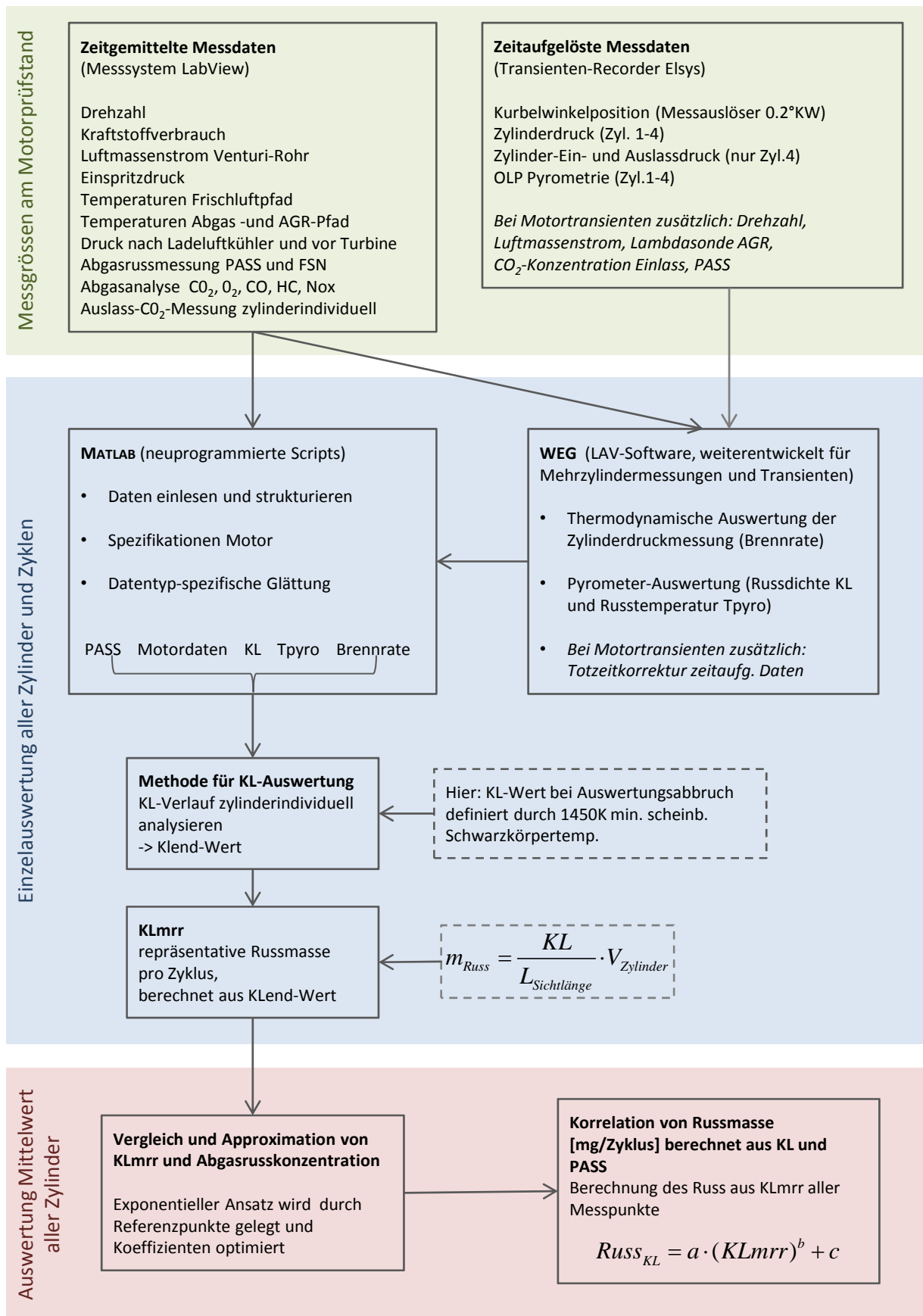
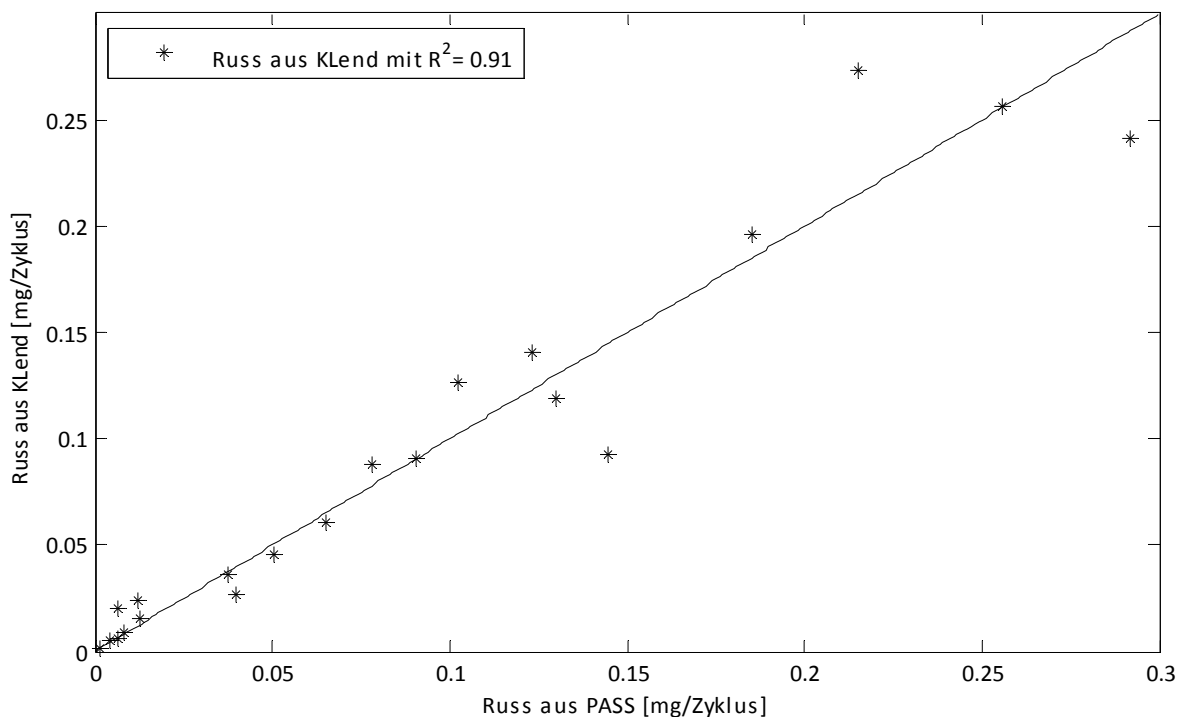


Abbildung 31: Messdatenverarbeitung und Berechnung der Russemissionen aus den OLP-Messungen

Die gesamte Datenverarbeitung wird in *Abbildung 31* aufgezeigt, wo auch die zyklus aufgelöste Information zur Russdichte aus der OLP in Form des KL-Faktors ausgewertet wird. Jeder Zyklus stösst eine gewisse Russmasse aus, die mit dem PASS als Russmasse pro Volumen gemessen wird, woraus die Russmasse pro Zyklus berechnet wurde. Nun soll der KL-Faktor (Einheit aus KL-Algorithmus:  $[m^{-1.39}]$ ) als Mass für die „Russdichte mal Länge“ in Zusammenhang mit der Russmasse gebracht werden. Dazu wurde eine Zwischengrösse „representative Russmasse aus KL“ (KLmrr) geschaffen, wofür KL zuerst durch die angenäherte mittlere Sichtlänge ( $L=f(^{\circ}KW)$ ) der OLP in den Brennraum dividiert wurde. Nun hat man theoretisch eine Russdichte, die nun mit dem zugehörigen Brennraumvolumen ( $V=f(^{\circ}KW)$ ) multipliziert wird, um eine Russmasse zu erhalten. Bei diesem Ansatz wird natürlich angenommen, dass eine homogene Russwolke den Brennraum ausfüllt.

➤ Validieren der Korrelation

Mit der so gewonnenen Beziehung werden an weiteren Messungen die aus den gemessenen KL-Endwerten berechneten Russ-Emissionen mit den im Abgas gemessenen verglichen:



**Abbildung 32: Validierung der Korrelation**

Obwohl *Abbildung 32* eine gute Korrelation zwischen repräsentativem KL-Endwert und der gemessenen Russemission aufweist, sind die auf die jeweilige Russmasse bezogenen Abweichungen beträchtlich.

### 6.4.3. Variabilität und Mittelung von KL-Verläufen

Der Verlauf des KL variiert von Zyklus zu Zyklus – insbesondere gegen Ende der Verbrennung (einer Phase mit überwiegender Russ-Oxidation) – in weit höherem Mass als die Brennrate, dies trotz konstanten Betriebsbedingungen beträchtlich (Abbildung 33):

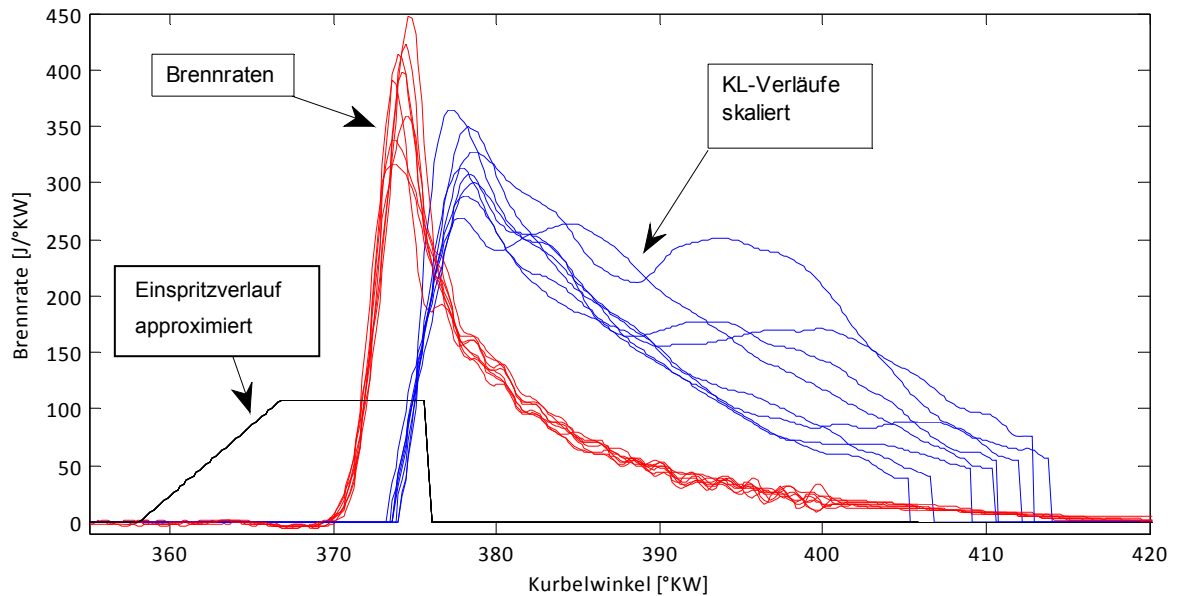


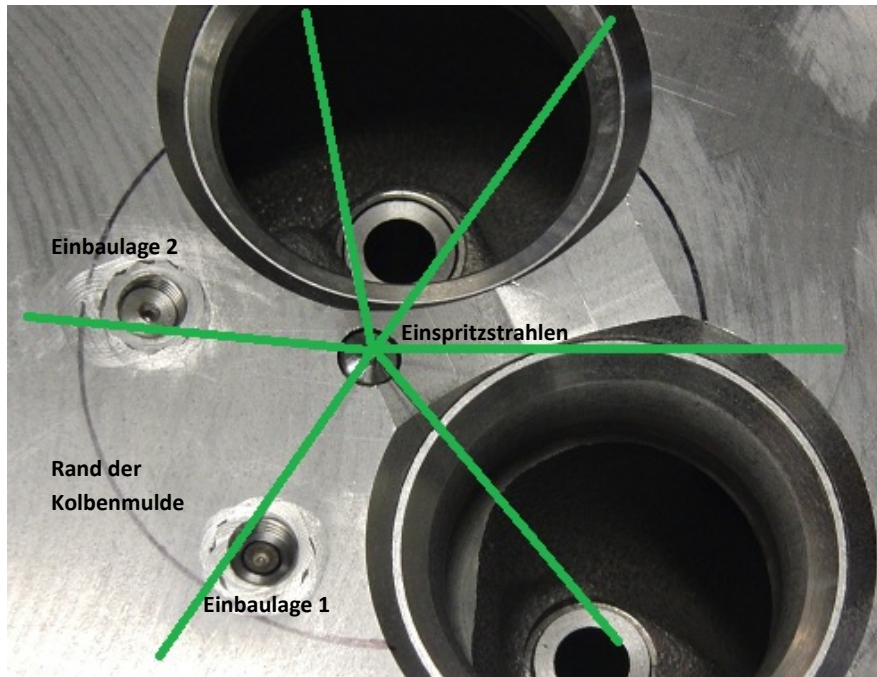
Abbildung 33: Zyklus zu Zyklus Variationen

Wegen des gegen Ende der Verbrennung unvorteilhaften Signal zu Rauschen – Verhältnis hat sich in weiteren Untersuchungen bestätigt, dass zur Berechnung eines repräsentativen KL-Verlaufs unter stationären Betriebsbedingungen mit Vorteil ein über mehrere Zyklen gemittelttes Signal (mittlerer Verlauf) verwendet wird.

#### 6.4.4. Abhängigkeit von der Einbaulage

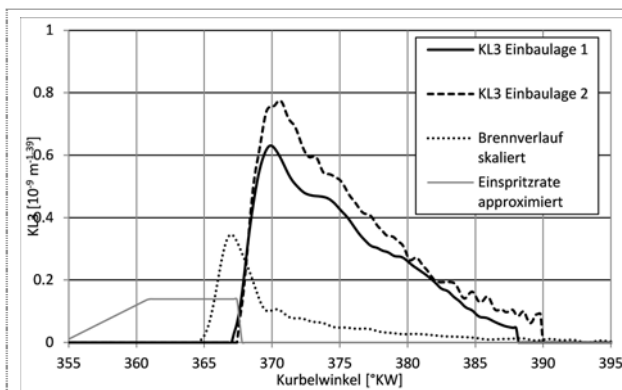
Die Kalibration der OLP und damit auch die Auswertung deren Signale, setzt ein homogen ausgeleuchtetes Gesichtsfeld voraus. Diese Voraussetzung ist bei Dieselmotoren, wegen der räumlich und zeitlich inhomogenen Diesel-Verbrennung nicht gegeben. Die Ausleuchtung des Gesichtsfeldes der OLP ist somit sowohl von der Einbaulage (Lage-Abhängige Sicht auf die einzelnen Einspritzstrahlen) als auch von der Zeit (Zeit-abhängige räumliche Entwicklung der Verbrennung der einzelnen Einspritzstrahlen) abhängig.

Die Zylinderköpfe unseres Versuchsträgers sind mit zwei Zugangsbohrungen versehen, wovon der eine durch den Drucksensor für die Indizierung belegt ist. Die folgende *Abbildung 34* zeigt die Anordnung der Zugangsbohrungen in Bezug auf Kolbenmulde und Einspritzstrahlen:

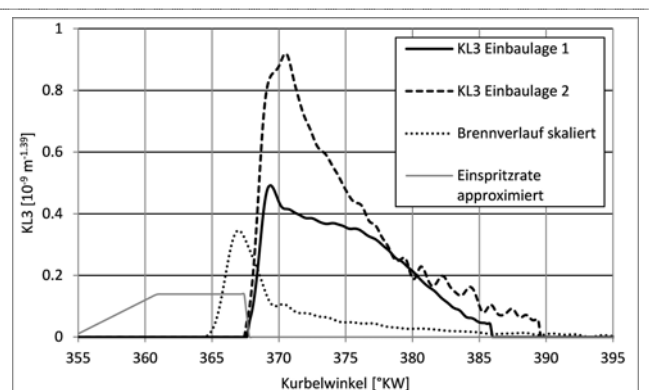


**Abbildung 34: Lage der Zugangsbohrungen**

Die folgenden beiden Abbildungen (*Abbildung 35*, *Abbildung 36*) zeigen den Einfluss der Einbaulagen der OLP anhand ausgewählter Einzelzyklen:



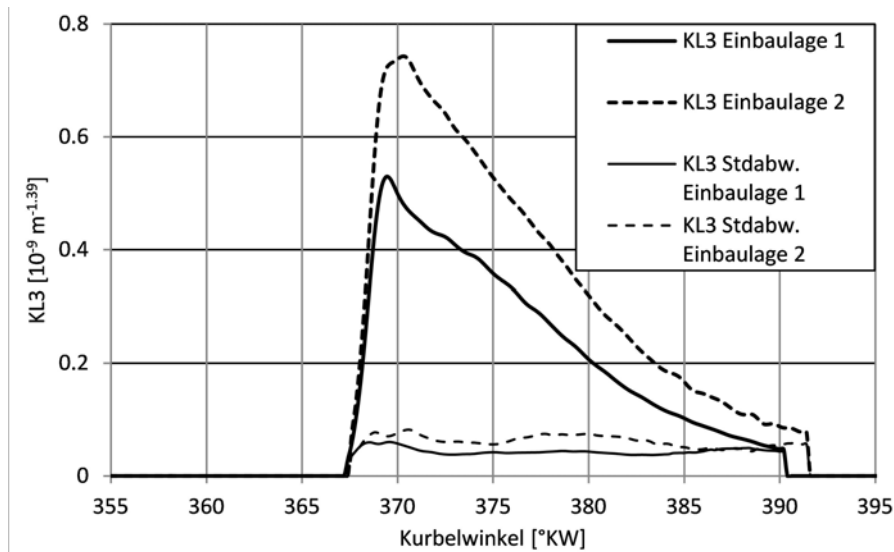
**Abbildung 35: Zyklus mit guter Übereinstimmung**



**Abbildung 36: Zyklus mit schlechter Übereinstimmung**

Einbaulage 1 ergibt, auch im Fall mit guter Übereinstimmung (*Abbildung 35*), deutlich tiefer verlaufende KL-Verläufe (Russdichte) als Einbaulage 2.

Die folgende Grafik (*Abbildung 37*) zeigt die aus den über mehrere Zyklen gemittelten Rohsignalen berechnete KL-Verläufe sowie die Standardabweichungen der Einzelzyklen:



**Abbildung 37: Zyklen aus gemittelten Rohsignalen**

Bei Verwendung gemittelter Zyklen bestätigt sich die bereits bei ausgewählten Einzelzyklen beobachtete Tendenz: Einbaulage 2 zeigt einen deutlich erhöhten Verlauf der Rusdichte, auch deren Endwert (repräsentativ für eine Korrelation mit der im Abgas gemessenen Russemission liegt) deutlich höher. Die Ergebnisse der Einzelzyklen bei Einbaulage 2 weisen zudem eine höhere Standardabweichung auf.

Fazit: Eine Korrelation des KL – Faktors mit der im Abgas gemessenen Russemission ist von der Einbaulage der OLP und der Konfiguration des Verbrennungssystems abhängig, eine allgemein gültige Korrelation kann nicht angegeben werden. Soll aus den KL -Verläufen eine quantitative Aussage über die zu erwartenden Russemissionen gewonnen werden, ist die Korrelation für jede Applikation neu zu bestimmen.

#### 6.4.5. Zylinder-zu-Zylinder Variation der Russbildung und -oxidation

Die im Abgas gemessene Russemission ist letztlich eine Überlagerung (Mittelwert) der von den einzelnen Zylindern ausgestossenen Russmasse. Die folgende Darstellung (*Abbildung 38*) zeigt die Russformation der einzelnen Zylinder im Vergleich mit dem Verlauf des Brennstoffumsatzes; die gezeigten Verläufe sind aus den gemittelten Signalverläufen (KL) bzw. Druckverläufen (Brennstoffumsatz) errechnet.

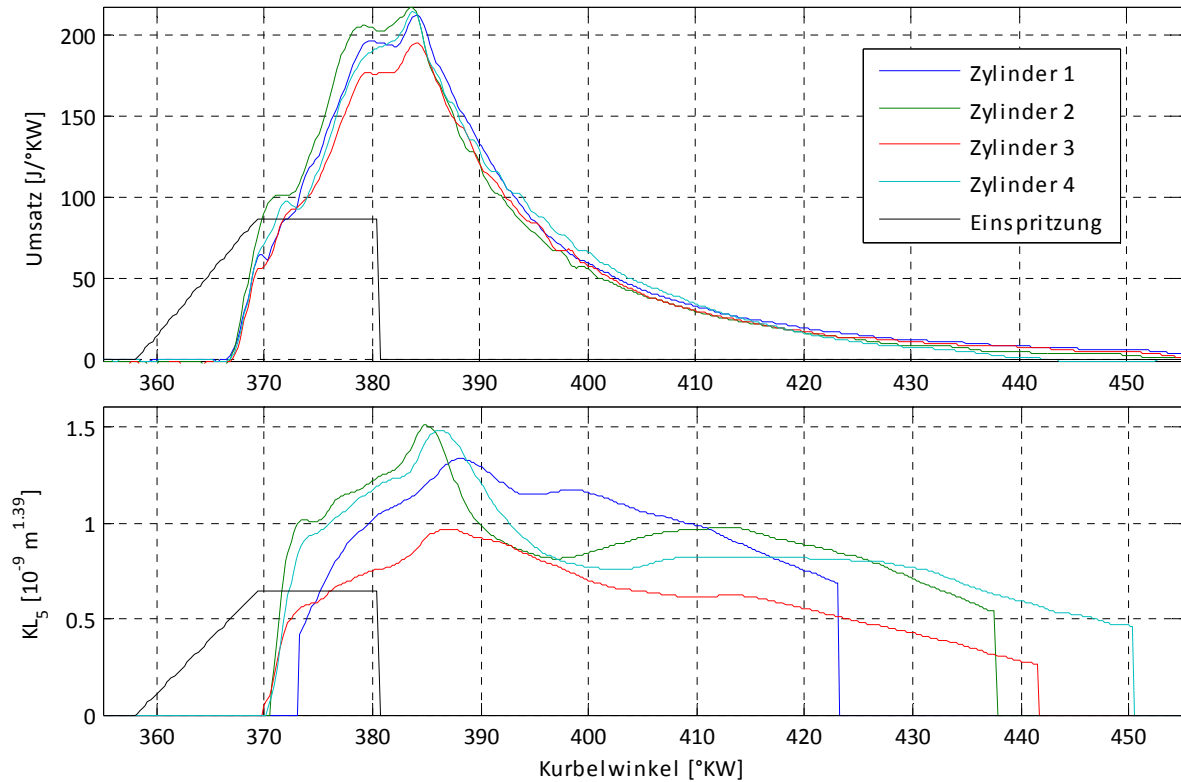


Abbildung 38: Zylinder zu Zylinder-Variation

Im Verlauf der Russdichte ( $\text{KL}$ ) zeigen sich von Zylinder zu Zylinder deutliche grösser Unterschiede als in den Brennverläufen.

#### 6.4.6. Variabilität des Luftverhältnisses und der AGR der einzelnen Zylinder

Aufgrund der - infolge von Druckschwingungen im Ein- und Auslasssystem - unvermeidlichen Unterschiede der in den einzelnen Zylindern gefangene Luft- und Restgas-Masse, sowie wegen Streuungen der CR-Injektoren, sind die stöchiometrischen Luft/Brennstoff – Verhältnisse der einzelnen Zylinder auch ohne AGR und unter stationären Betriebsbedingungen unterschiedlich (Abbildung 39):

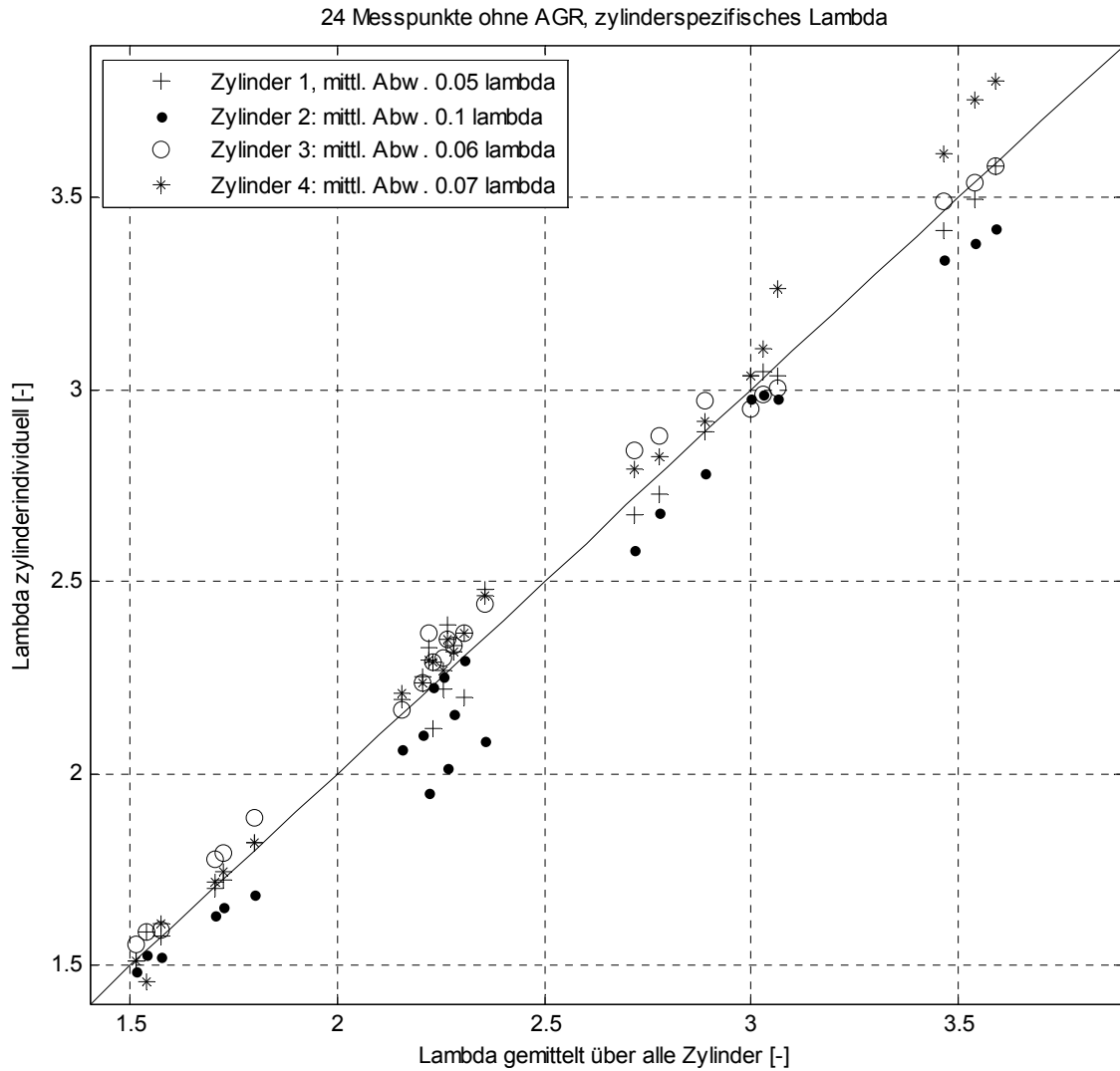
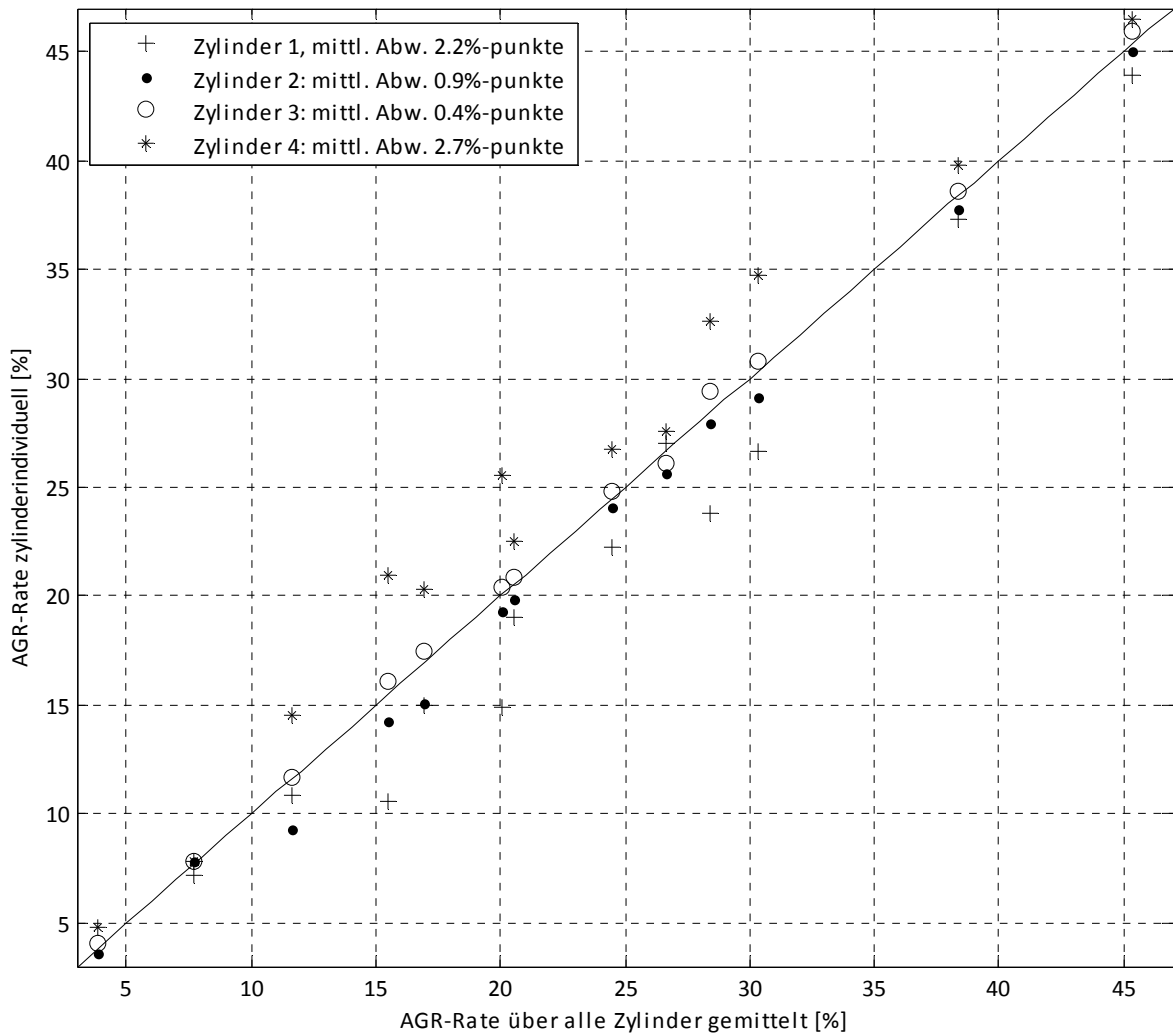


Abbildung 39: Stöchiometrisches Luft/Brennstoff-Verhältnis Lambda ohne AGR

Beim nachgerüsteten AGR-System des Liebherr-Motors erfolgt die Einspeisung des Abgases asymmetrisch ohne Mischungsklappen in den Einlass-Receiver, weshalb Abweichungen der AGR der einzelnen Zylinder gegenüber der üblicherweise gemessenen mittleren AGR zu erwarten sind. Die folgende

Abbildung 40 zeigt die AGR der einzelnen Zylinder in Bezug auf den Mittelwert. Die AGR-Rate wurde durch die Messung der zylinderindividuellen CO<sub>2</sub>-Einlasskonzentration und der gemittelten CO<sub>2</sub>-Auslasskonzentration der Zylinder 3 und 4 berechnet (das Abgas für die AGR wird aus der Zusam-



menführung der Krümmer von Zylinder 3 und 4 bezogen.

Abbildung 40: Abweichungen der AGR-Rate der einzelnen Zylinder in Prozentpunkten

Die Verteilung des rezirkulierten Abgases (AGR) auf die einzelnen Zylinder ist unter transienten Betriebsbedingungen nur mit grösstem Aufwand zu messen. Da die Russbildung stark von AGR und Lambda beeinflusst wird, soll untersucht werden, ob aus einem aus Messungen mit der OLP gewonnenen Signal Zylinder-individuell auf Lambda und AGR geschlossen werden kann. Die folgende *Abbildung 41* zeigt den Zusammenhang zwischen der über einen Zyklus gemittelten pyrometrischen Russtemperatur und der Zylinder-individuell gemessenen Abgasrezirkulation bzw. Lambda unter stationären Betriebsbedingungen. Bei jeder Messpunkteserie (z.B. MP 1,2,3) wurden die Einspritzparameter und die Drehzahl konstant gehalten, wobei nur die AGR-Rate erhöht wurde (das Drehmoment ergab sich frei).

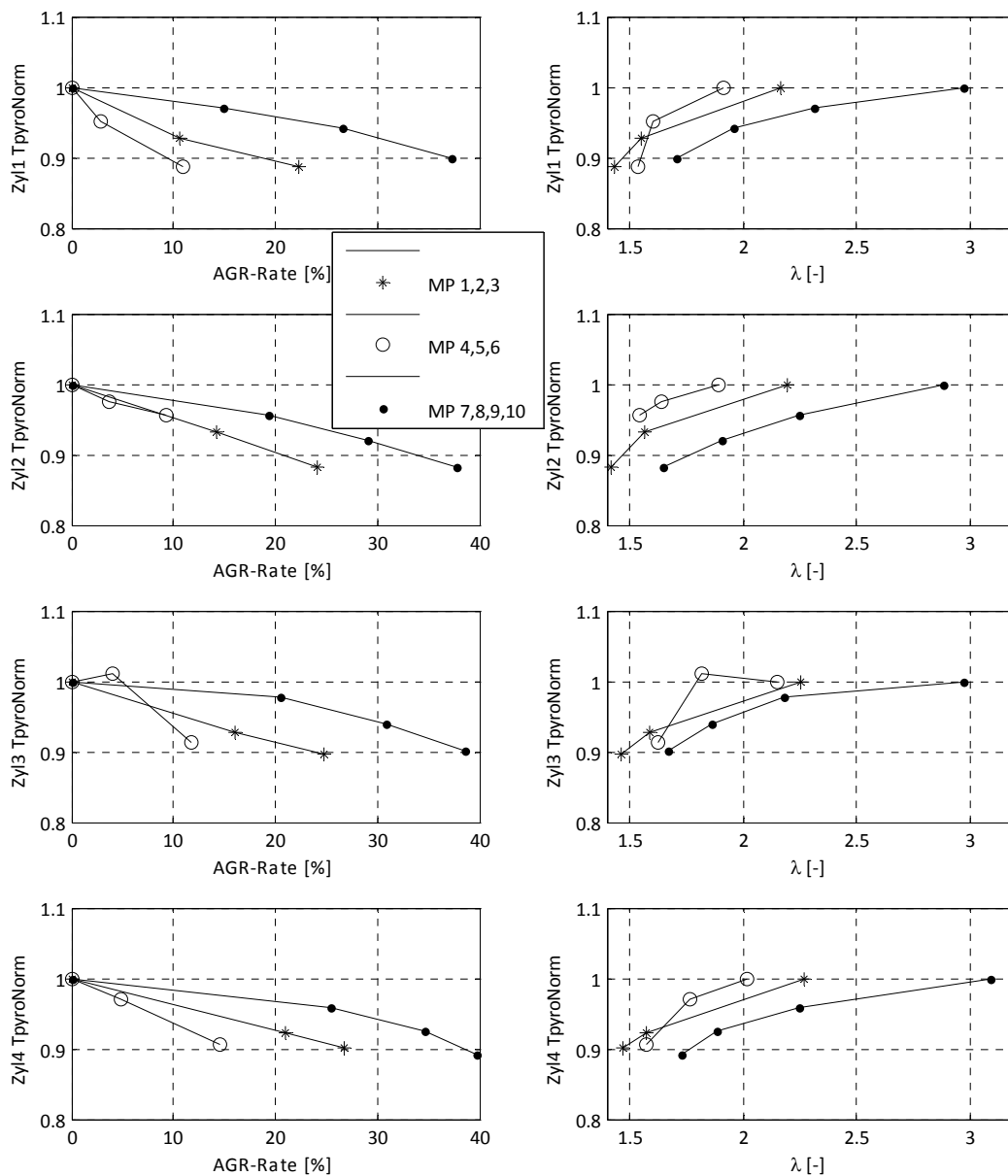


Abbildung 41: Korrelation der mittleren Russtemperatur zu AGR für drei verschiedene Einspritzparameter mit jeweils zunehmender AGR-Rate

Wie zu erwarten, fällt die mittlere Russtemperatur mit zunehmendem Anteil an rezirkuliertem Abgas. Die Korrelation mit dem Anteil an rezirkuliertem Abgas in der gefangenen Luftmasse im Zylinder ist jedoch im gegenwärtigen Stand der Entwicklung des Systems noch ungenügend genau damit die OLP zur Bestimmung der AGR, bzw. der AGR-Verteilung, über die einzelnen Zylinder herangezogen werden könnte; dies, obwohl sich die mittlere pyrometrische Russtemperatur für diese Betrachtung als bestgeeignet erwiesen hat.

## 6.5. Untersuchung von Lasttransienten

### 6.5.1. Prüfstandsaufbau und Steuerung

Im Folgenden und in *Abbildung 42* sind die zum Einsatz gelangende Messtechnik zusammenfassend dargestellt. Als Basis diente der Prüfstandsaufbau aus AP 1, Abschnitt 4.2.2, jedoch ohne Gasanalyse und OLP bei jedem Zylinder.

#### ❖ Abgasanalyse

- Messung des CO<sub>2</sub>-Gehalts am Einlass mittels Airsense-Massenspektrometer mit Bezug auf das CO<sub>2</sub>-Isotops mit Molekularmasse  $M=45\text{g/mol}$  (Tot- bzw. Reaktionszeit 1.7 – 2s)
- Messung des stöchiometrischen Luft/Brennstoff-Verhältnis oder des Sauerstoffgehalts im rezirkulierten Abgas mittels Lambda Sonde im Abgas unmittelbar vor dessen Beimischung zur Frischluft. Daraus wird – zur Berechnung des Anteils an rezirkuliertem Abgas in der Frischluft - der momentane CO<sub>2</sub>-Gehalt des rezirkulierten Abgases berechnet.
- Messung der Russmasse mittels PASS Photo Acoustic-Soot-Sensor (Totzeit 1 – 2s)
- Messung der NO<sub>x</sub> mit Combustion Chemilumineszenz-Detektor (Totzeit 0.2s)

#### ❖ Messung von Luft- und Brennstoffmassenstrom

- Luftmassenstrom: Heissfilm- Luftmassenmesser (HFM) kalibriert mittels stationären Venturi-Luftmassenmesser
- Brennstoffmassenstrom: Gaspedalstellung der Motorsteuerung, kalibriert über Brennstoffmassenstrommessung vor und nach dem Sprung durch stationäres Mess-System (Waage-basiert)
- Drehzahl Abgasturbolader

#### ❖ Indizierdaten

- Druck im Zylinder
- Druck im Einlass (nur am Zylinder 4)
- Druck im Auslass (nur am Zylinder 4)
- OLP im Zylinder 4 (optische Bestimmung von Russtemperatur und -formation (KL-Faktor), es stand nur noch eine OLP zur Verfügung im Ggs. zu den stationären Messungen! Siehe 6.4.2)
- Drehfrequenz und Kurbelwinkelauflösung 0.2 °KW

Konstruktionsbedingt gibt es bei diesem Motor bzw. Prüfstandsaufbau einige Einschränkungen für die Bildung der Modelltransienten:

- Abgasturbolader: liefert im ganzen Betriebskennfeld einen höheren Einlass- als Auslassdruck, damit AGR möglich ist, wird eine Stauklappe nach dem ATL gestellt
- Stauklappe: ist nicht dynamisch ansteuerbar, so muss für jede Transiente eine Stellung festgelegt werden
- AGR-Pfad: langer Weg vom ATL bis zum Einlass von ca. 5m mit Kühlervolumen, was die Zufuhr der neuen AGR-Zusammensetzung um einige Sekunden verzögert.
- Messzylinder 4: Referenzzylinder mit CO<sub>2</sub>-Einlassmessung

- Zylindervariabilität: das Injektorkennfeld kann im Motorsteuergerät nur für einen Zylinder genau parametrieren, die anderen werden durch weniger detailliertes Abweichungskennfeld erfasst. Das Ansaugsystem ist asymmetrisch, was zu ungleicher AGR-Verteilung führen kann (siehe auch 6.4.6).
- Temperatur nach ATL: die dynamische Messung der Temperatur nach ATL konnte nicht sinnvoll realisiert werden. Einerseits ist aus früheren Versuchen die Problematik mit relativ trägen Thermoelementen und dem inhomogenen Strömungsfeld bekannt und andererseits sind die Modelltransienten für eine praktische Applikation der Abgasnachbehandlung nicht geeignet.

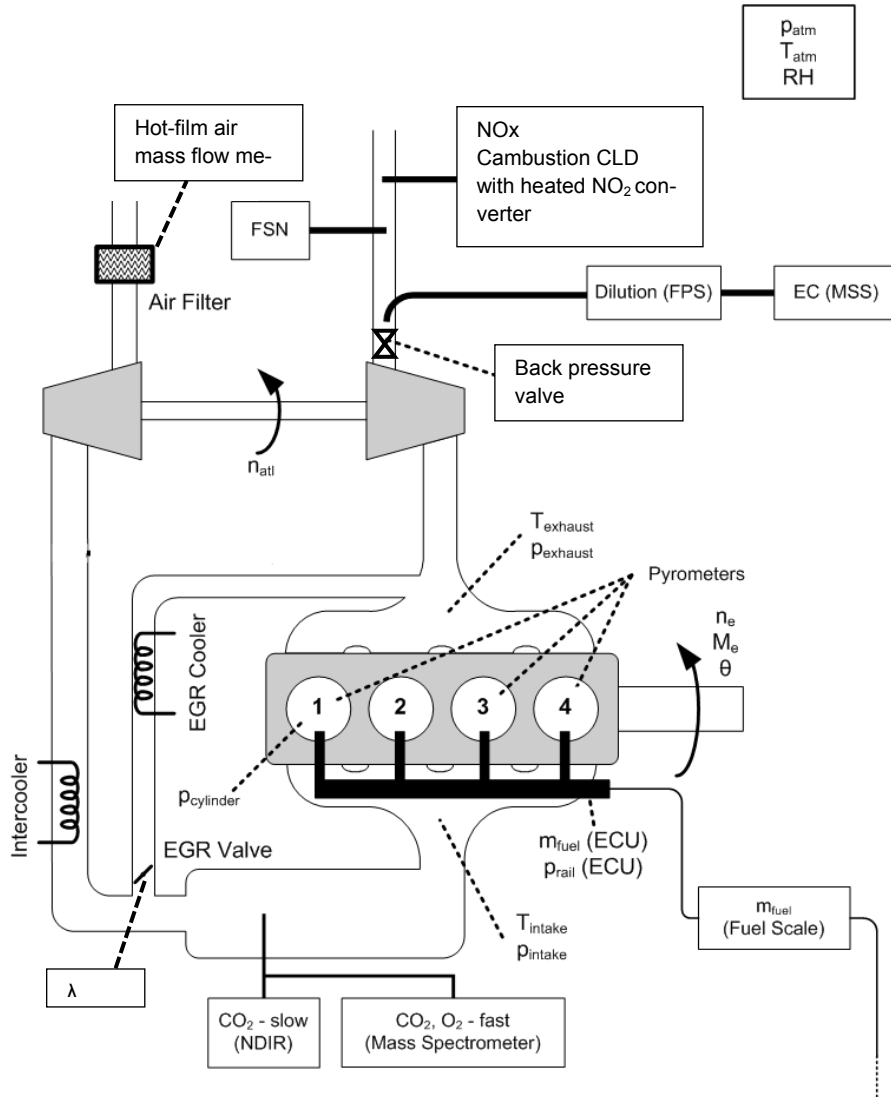


Abbildung 42: Liebherr D924 Instrumentierung für die Messung von transientem Motorbetrieb

### 6.5.2. Beschreibung der Modelltransienten

Es wurden 8 Modelltransienten konstruiert (MP001 bis MP008), die auf unterschiedliche Weise die Turbolader-Dynamik und die Zuleitung der AGR anregen. Der Einspritzdruck war immer 900bar und der Einspritzzeitpunkt 5° v. OT. Das AGR-Ventil kurz vor der Einspeisung der Abgase ins Einlasssystem wurde in der Motorsteuerung über ein Kennfeld so angesteuert, dass beim gewünschten Stellzeitpunkt sehr schnell die neue Position anfährt (<0.1s). Es wurde jeweils nur die Einspritzmenge und/oder die Bremsdrehzahl der Wirbelstrombremse geändert. In den grafischen Darstellungen ist der Transientenbeginn immer auf Arbeitszyklus 0 gelegt.

	Drehzahl [U/min]	Einspritzmenge [mm <sup>3</sup> ]	AGR-Ventil [%]	AGR-Ventil Stellzeitpunkt	Dauer der Parameteränderung [s]
MP001	1250 konst.	36 -> 81	100 -> 3	bei Transientenbeginn	0.5
MP002	1250 konst.	81 -> 36	3 -> 100	bei Transientenbeginn	0.2
MP003	1250 konst.	36 -> 81	100 -> 12	bei Transientenbeginn	0.8
MP004	1250 -> 1830	67 konst.	100 -> 30	bei 1260 U/min	1.4
MP005	1250 -> 1830	67 konst.	100 -> 30	bei 1820 U/min	1.4
MP006	1000 konst.	30 -> 81	100 -> 0	bei Transientenbeginn	0.9
MP007	750 -> 1250	11 -> 81	100 -> 3	bei Transientenbeginn	4.5
MP008	750 -> 1250	11 -> 81	100 -> 3	bei Transientenbeginn	1.7

### 6.5.3. Datenerfassung und Auswertung

Alle oben aufgelisteten Daten werden mit hoher zeitlicher Auflösung (0.2° Kurbelwinkel) in einem Transientenspeicher synchron aufgezeichnet. Der Druck im Zylinder, die Drehfrequenz die OLP-Signale werden winkelaufgelöst ausgewertet. Von den übrigen ebenfalls winkelaufgelöst aufgezeichneten Daten werden nur die Mittelwerte über einen Zyklus benötigt. Letztere Daten sind auf Grund der Anordnung der Messstellen oder infolge der Eigenschaften der Messgeräte teilweise mit unterschiedlichen Totzeiten behaftet (siehe 6.5.1).

Das am LAV entwickelte Programm zur thermodynamischen Druckverlaufsanalyse (WEG) wurde erweitert, sodass die Totzeit der Signale automatisch kompensiert werden, ein Zyklus-Mittelwert berechnet und dieser dem entsprechenden Zyklus zugewiesen werden kann. Zusätzlich zur Reaktionszeit findet in den Messleitungen der Gasanalytoren teilweise eine Längsvermischung der kontinuierlich entnommenen Gase statt, was Konzentrationssprünge glättet. Das dynamische Verhalten der Messleitungen wurde aber aus zeitlichen Gründen nicht weiter untersucht.

Nach der Datenauswertung in WEG wurde die weitere Verarbeitung, Berechnung der Russemissionen aus der optischen Messung (siehe 6.4.2) in MATLAB© durchgeführt und die Diagramme erstellt. Für die Berechnung der Russemissionen mittels der OLP-Messungen wurde eine Korrelation aus stationären AGR-Messungen verwendet. Dort waren im Gegensatz zu den transienten Messungen in allen vier Zylinder OLPs montiert. Deshalb ist in *Abbildung 44* und *Abbildung 43* neben dem Mittelwert aller vier Zylinder zusätzlich auch der Zylinder vier alleine dargestellt. Bei kleinen Russmassen pro Zyklus weicht die Zylinder-4-Messung leicht nach unten ab. Unter Berücksichtigung der Russwerten aus KL der neuen transienten Messungen, drängte sich im Sinne einer Neukalibration ein  $c=0$  in der Berechnungsgleichung auf.

Versuchsweise wurde aus der optischen Messung die berechnete scheinbare Schwarzkörpertemperatur der NO<sub>x</sub>-Konzentration im Abgas gegenübergestellt (Maximaler Wert pro Zyklus minus 1500K, siehe *Abbildung 45*).

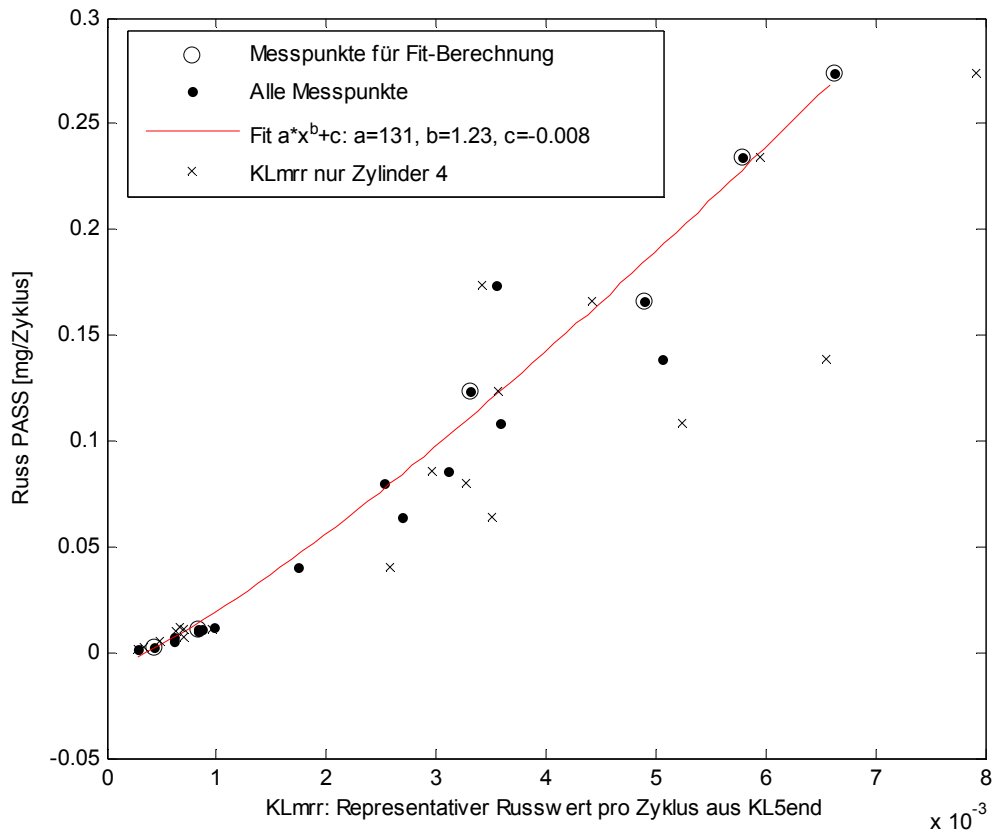


Abbildung 44: Die mit PASS gemessenen Russemissionen werden den repräsentativen Russwerten aus KL (KLmrr) gegenübergestellt. Dieser Wert errechnet sich aus dem KL-Wert bei Auswertungsabbruch und der in diesem Kurbelwinkel mittleren optischen Sichtlänge.

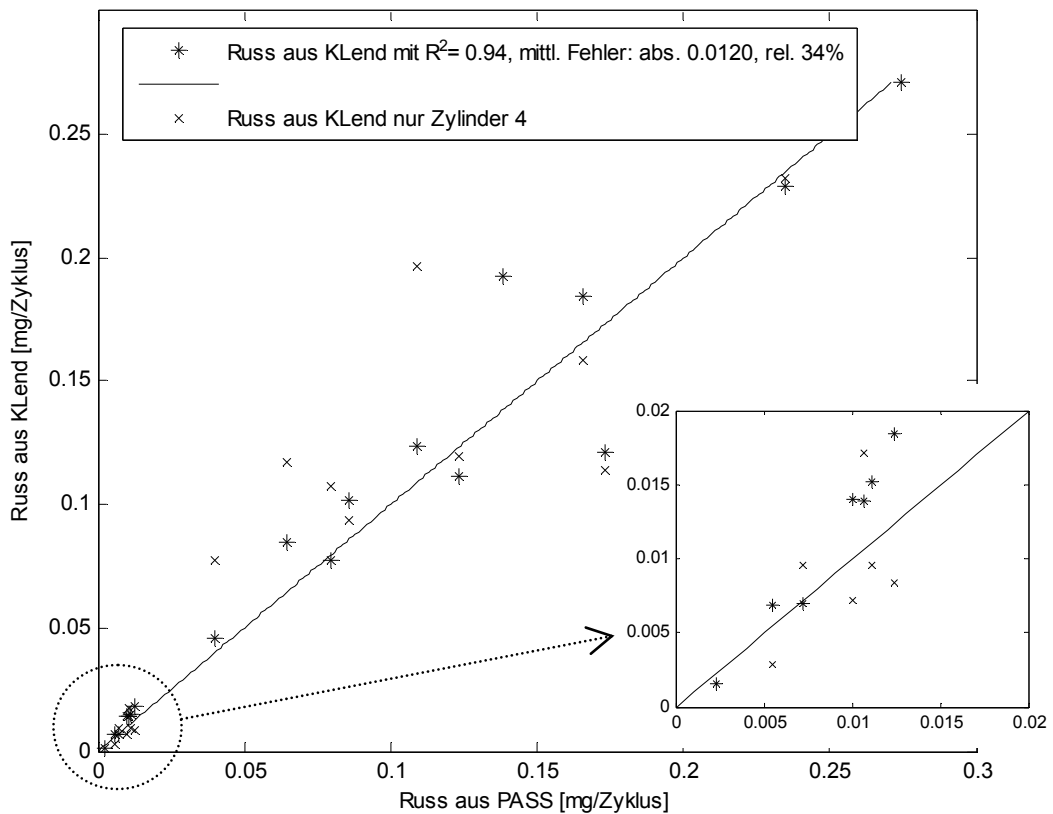
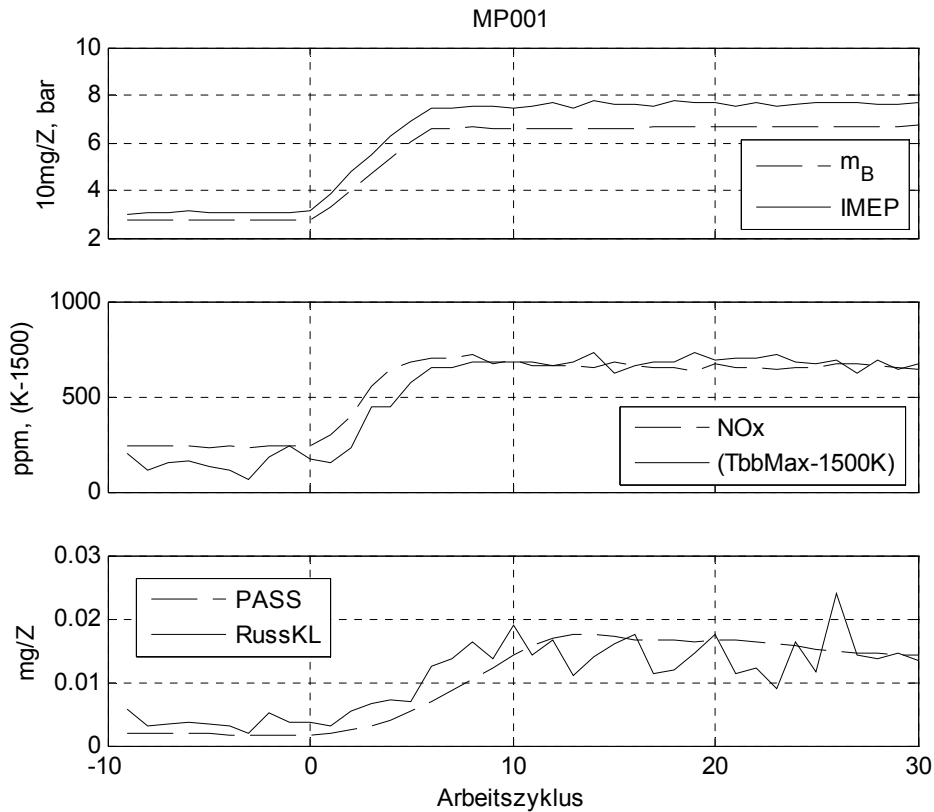


Abbildung 43: Korrelation der Russemissionen aus Abgas- und OLP-Messung für 19 AGR-Betriebspunkte. Im Detail ist der Bereich kleiner Russmassen sichtbar, der bei den Transienten auch erreicht wird. Damit in diesem Bereich eine bessere Übereinstimmung

#### 6.5.4. Resultate der transienten Messungen

Die folgenden Diagramme zweier ausgewählter Transienten stellen die wichtigsten Erkenntnisse der acht Modelltransienten dar. Zu allen Transienten sind ausführliche Diagramme sowie Erläuterungen im Anhang zusammengestellt. In Abschnitt 6.5.2 sind die Modelltransienten beschrieben.

##### Modelltransiente MP001 (Lastanstieg bei konstanter Drehzahl von 1250 U/min):



**Abbildung 45: Modelltransiente MP001, der Lastanstieg wird durch die Brennstoffmasse pro Zyklus und dem indizierten Mitteldruck verdeutlicht (AGR-Ventil schliesst fast vollständig). Den NOx-Emissionen wird das Maximum der scheinbaren Schwarzkörpertemperatur gegenübergestellt. Die Russemissionen sind durch Abgasmessung PASS und OLP-Messung als mg/Zyklus aufgezeigt.**

Bei der Modelltransienten MP001 (*Abbildung 45*) konnte die Russberechnung aus der OLP-Messung der Abgasmessung gut folgen und zeigt auch schnelleres Ansprechen im Gegensatz zur trägeren Abgasmessung. Der Maximalen Schwarzkörpertemperatur eines Zyklus wurde für den Vergleich mit den NOx-Emissionen in ppm 1500K subtrahiert. Die Vermutung liegt nahe, dass die NOx-Formation mit der maximalen Strahlungsintensität (hohen lokalen Temperaturen) im Brennraum zusammenhängt.

*Abbildung 46* zeigt eine räumliche Darstellung den Verlauf der Russbildung während der Transienten, ausgewählte Zyklen sind in *Abbildung 47* zusammen mit der Brennrate gezeigt. Der ansteigende Gradient von Brennverlauf und KL bleiben sehr ähnlich, wobei die längere Einspritzdauer zu einem größeren Anteil Diffusionsverbrennung führt. Die Oxidationsphase verlängert sich zunehmend und es ist in beiden Abbildungen ein zweiter KL-Anstieg zwischen 390 und 410°KW erkennbar. Das Sichtfeld der OLP verändert sich bei dieser Kolbenposition stark (Blick in gesamte Kolbenmulde und auf Kolbenoberseite), so dass vorher nicht sichtbare Russwolken neu erfasst werden.

MP001

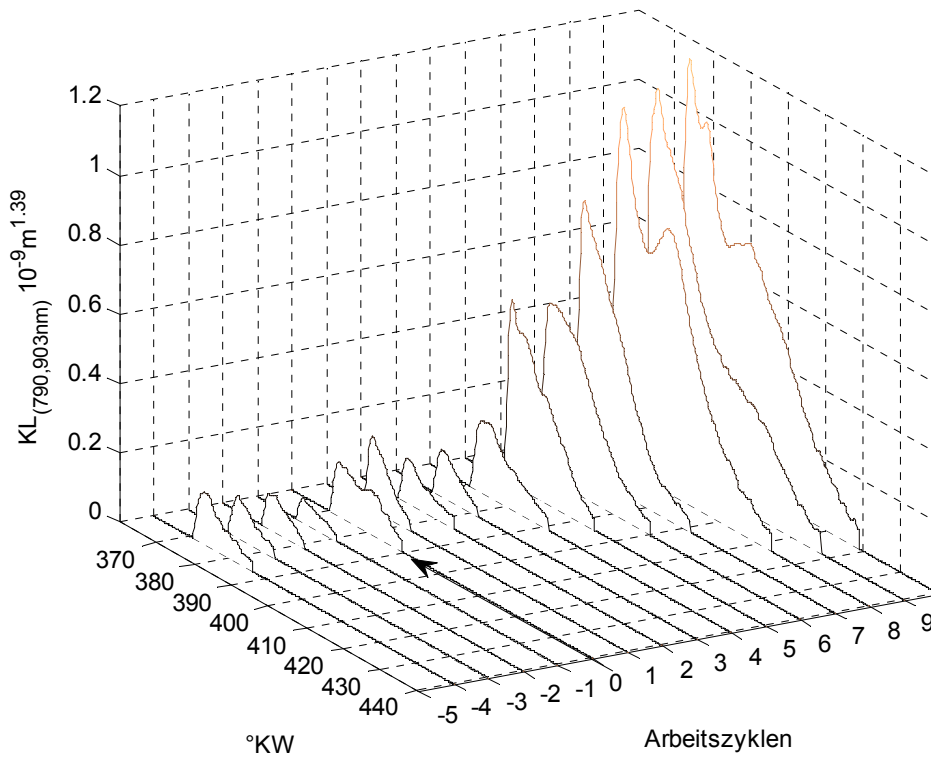


Abbildung 46: Räumliches Diagramm der KL-Verläufe als Mass für die Russformation- und Oxidation. Beim Pfeil Arbeitszyklus 0 beginnt der Lastanstieg bei MP001. Durch die längere Einspritzzeit verlängert führt zu einer grösseren Russbildung und längerem KL-Verlauf.

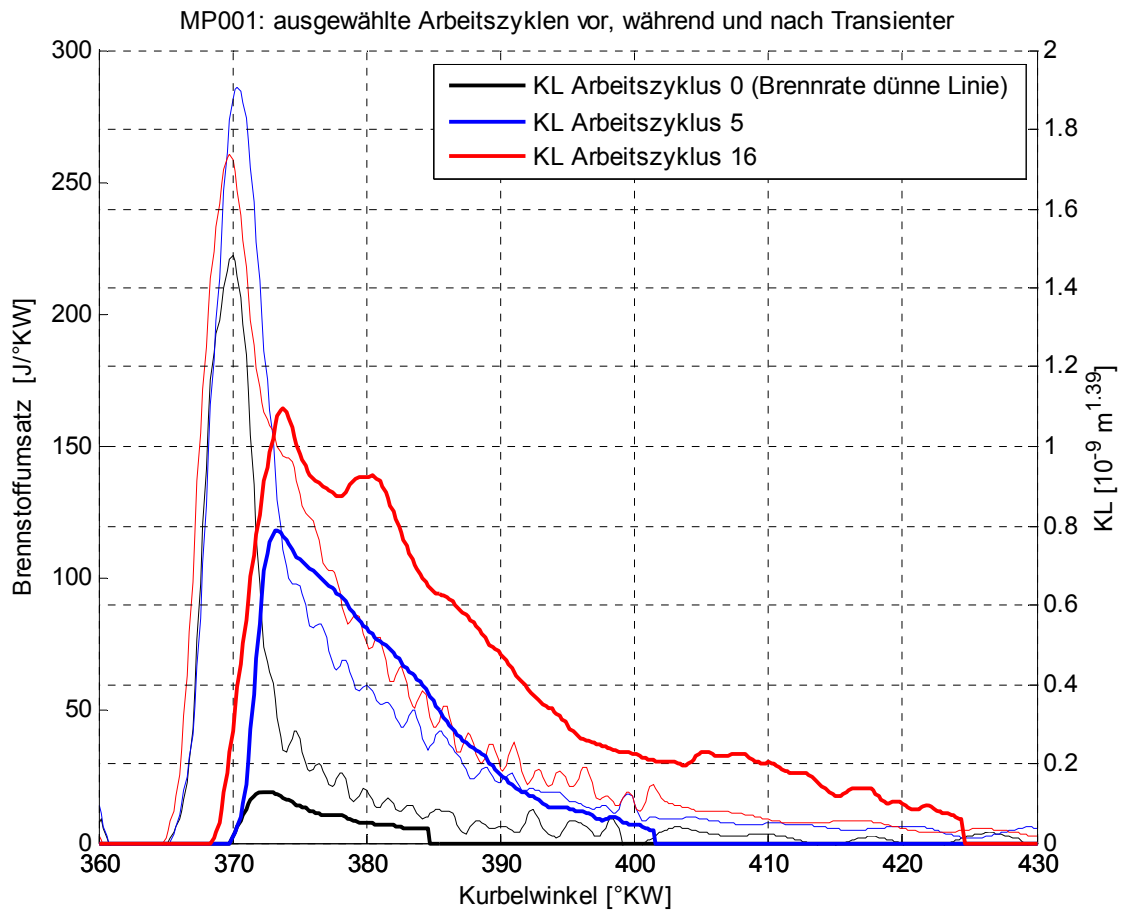


Abbildung 47: Brennrates und KL-Verlauf bei drei ausgewählten Zyklen vor, während und nach dem Lastanstieg (MP001). Die oszillierende Linie ist jeweils die Brennrates. Einspritzbereich Zyklus 0 etwa bis 368°KW, bei Zyklus 16 etwa bis 374°KW und stimmt gut mit dem max. KL überein.

### Modelltransiente MP008 (Last- und Drehzahlanstieg von Leerlauf 750 auf 1250 U/min):

Hier wird das freie Hinaufdrehen des Motors aus dem Leerlauf in die Bremsregeldrehzahl nachgestellt (Abbildung 48). Bei der sehr kleinen Einspritzmenge im Leerlauf ist die Russstrahlung zu klein, um ausgewertet zu werden. Es fehlen deshalb die optischen Informationen bis Zyklus 4. Im Bereich ohne Drehzahländerung stimmen die Werte der OLP wiederum gut überein. Die max. scheinbare Schwarzkörpertemperatur ( $T_{bbMax}$ ) ist aber deutlich zu tief während des Drehzahlanstiegs. Die Zeit für die  $NO_x$ -Bildung ist bei gegebener Einspritzdauer bei tiefen Drehzahlen grösser. Bei der Gegenüberstellung von  $T_{bbMax}$  und  $NO_x$ -Emissionen fehlt aber der Einfluss der veränderten Zeit pro Zyklus bzw. Zeit für Bildungsreaktion und führt möglicherweise zu einer Unterschätzung (siehe auch MP004 im Anhang 6.7).

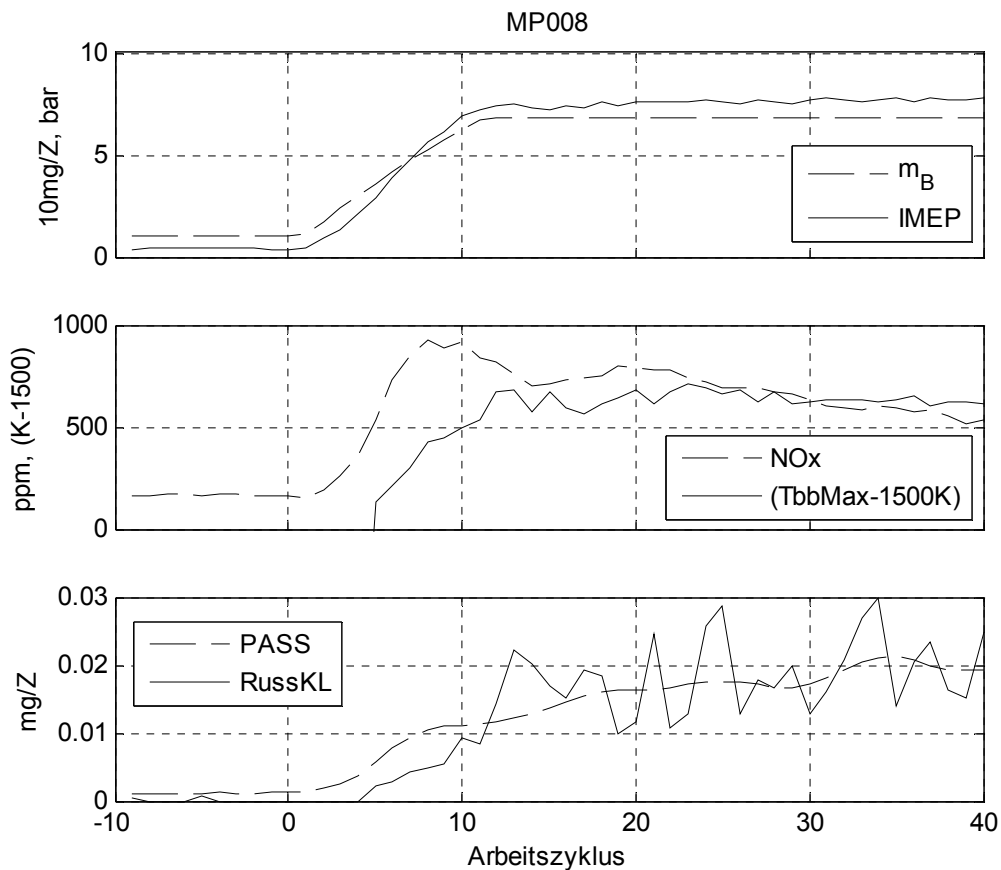


Abbildung 48: Last- und Drehzahlanstieg von Leerlauf 750 auf 1250 U/min (AGR-Ventil schliesst fast vollständig), bei kleiner Last keine OLP-Auswertung wegen zu geringer Strahlungsintensität.

## 6.6. Erreichte Ziele und Ausblick

- Das schnelle In-Zylinder-Pyrometer (OLP) wurde am sowohl bezüglich Druck als auch der pyrometrischen Daten vollindizierten Motor bezüglich Leistungsfähigkeit, Einsatzmöglichkeiten und –grenzen in umfangreichen Messreihen untersucht und dokumentiert. (KTI Projekt 10604, Bericht vom 21.10.2011). Die Berechnungen der Russemissionen mit Hilfe des KL-Faktors aus den OLP-Messungen konnten gut mit den Abgasmessungen korreliert werden.
- Jede OLP-Applikation benötigt eine eigene Kalibration, das gilt auch für die Einbaulage.
- Bei der Analyse von unterschiedlichen AGR-Raten der Zylinder stösst die momentane OLP-Konstruktion und Auswerteverfahren an ihre Grenze, mag aber trotzdem den Trend noch abbilden.
- Es wurden verschiedene Modelltransienten realisiert, wo die OLP eine schnellansprechende und quantitativ gute Voraussage der Russemissionen ermöglichte.
- Bei der Auswertung der Transienten wurde ein neuer Ansatz verfolgt, der die maximale scheinbare Schwarzkörpertemperatur (Mass für die Strahlungsintensität im Brennraum) mit den NO<sub>x</sub>-Emissionen vergleicht. Es zeigt sich deutlich ein Zusammenhang, der jedoch noch weiter untersucht werden muss. Insbesondere müsste die Zeit pro Zyklus bzw. die zur Verfügung stehende Zeit für Bildungsreaktionen (NO<sub>x</sub>) für eine Korrelation berücksichtigt werden.
- Die dritte Wellenlänge der OLP-Verstärker brachte bei diesen Untersuchungen keinen Mehrnutzen, so dass ein Verstärkerkanal mit einem OH-Filter für die Analyse der Vormischverbrennung eingebaut werden könnte.
- Eine Weiterentwicklung der OLP-Konstruktion hinsichtlich der Aussengeometrie und der Beheizung würde besser auswertbare und noch zuverlässigere Messdaten bieten.

## 6.7. Anhang: Detaildiagramme aller Modelltransienten und kurze Erläuterungen

MP001 (*Abbildung 49*): Die Bremsendrehzahl erhöht sich unwesentlich (+30 U/min) bis der Regler eingreift. Der Auslassdruck steigt sofort an, wobei sich der Einlassdruck zuerst absenkt als Folge der kurzzeitig erhöhten Drehzahl und der Trägheit des Turboladers. Über gut 30 Zyklen oder knapp 3 Sekunden wird der Einlassdruck aufgebaut (v.a. Beschleunigung und Aufwärmen des ATL). Der Anteil Verbrennungsgase (zugeführtes Abgas durch AGR plus Restgas im Zylinder) wurde mit WEG aus der Einlass-CO<sub>2</sub>-Messung und dem Auslassgedruck berechnet. Zusammen mit der Brennstoffmasse kann das globale (über den ganzen Motor) und das verbrennungsaktuelle Luft-Kraftstoff-Verhältnis Lambda berechnet werden. Das Verbrennungs-Lambda liegt zunächst höher als das globale, da zusätzlicher Sauerstoff aus der AGR vorhanden ist, was nach der Transiente wegfällt. Russ und NO<sub>x</sub> ist in 6.5.4 diskutiert. Schwankungen der Russemissionen zwischen Zyklus 40 und 80 werden durch die OLP erkannt.

MP002 (*Abbildung 50*): Der Bremsregelfehler geht hier in die andere Richtung, ist mit -60 U/min etwas grösser als bei MP001. Der Einlassdruck bleibt auf Grund der kinetischen Energie des ATL noch für einige Zyklen erhalten. Es verzögert sich die AGR-Anreicherung durch den langen AGR-Pfad. Das Lambda schnell zu Beginn hoch und senkt sich mit zunehmender AGR-Rate. Bei der OLP-Messung hat kurz nach Transientenbeginn eigeschlichen, bei einem Zyklus wurde die Auswertung wegen tiefer Signalstärke sehr früh abgebrochen.

MP003 (*Abbildung 51*): Hier wurde vor und nach der Transienten eine Einlass-CO<sub>2</sub>-Konzentration von 0.7% gehalten, was zu einer nur leicht sinkenden AGR-Rate führte und deutlich höheren Russemissionen.

MP004 (*Abbildung 52*): Der indizierte Mitteldruck sinkt trotz gleichbleibenden Einspritzparametern leicht ab, da die Verbrennung mit steigender Drehzahl in Richtung Expansion verschleppt wird. Die Schwarzkörpertemperatur funktioniert nicht mehr für die NO<sub>x</sub>-Abschätzung. Es werden zwar gleiche Strahlungsmaxima gemessen, jedoch bleibt bei höherer Drehzahl weniger Zeit für die NO<sub>x</sub>-Bildung. Der Russ aus KL unterschätzt die effektiven Emissionen. Eine Kalibration/Korrelation für höhere Drehzahlen wäre sinnvoll.

MP005 (*Abbildung 53*): Im Gegensatz zu MP004 wurde hier das AGR-Ventil erst bei Erreichen der hohen Drehzahl betätigt, in der Hoffnung einen Unterschied zu sehen. Der träge AGR-Pfad liess einen Effekt offensichtlich nicht zu.

MP006 (*Abbildung 54*): Der Lastsprung bei tieferer Drehzahl von 1000 U/min zeigt keine wesentlichen Unterschiede zu MP001 und MP002

MP007 (*Abbildung 55*): Der Last- und Drehzahlanstieg ist ein Extrembeispiel für eine Transiente. Der Rauchgasanteil steigt nach der Transienten kurz an, da die sauerstoffarmen Verbrennungsgase von der Transienten den Einlass erreichen. Russ und NO<sub>x</sub> ist in 6.5.4 diskutiert.

MP008 (*Abbildung 56*): Hier wurde der Lastanstieg schneller als in MP007 ausgeführt.

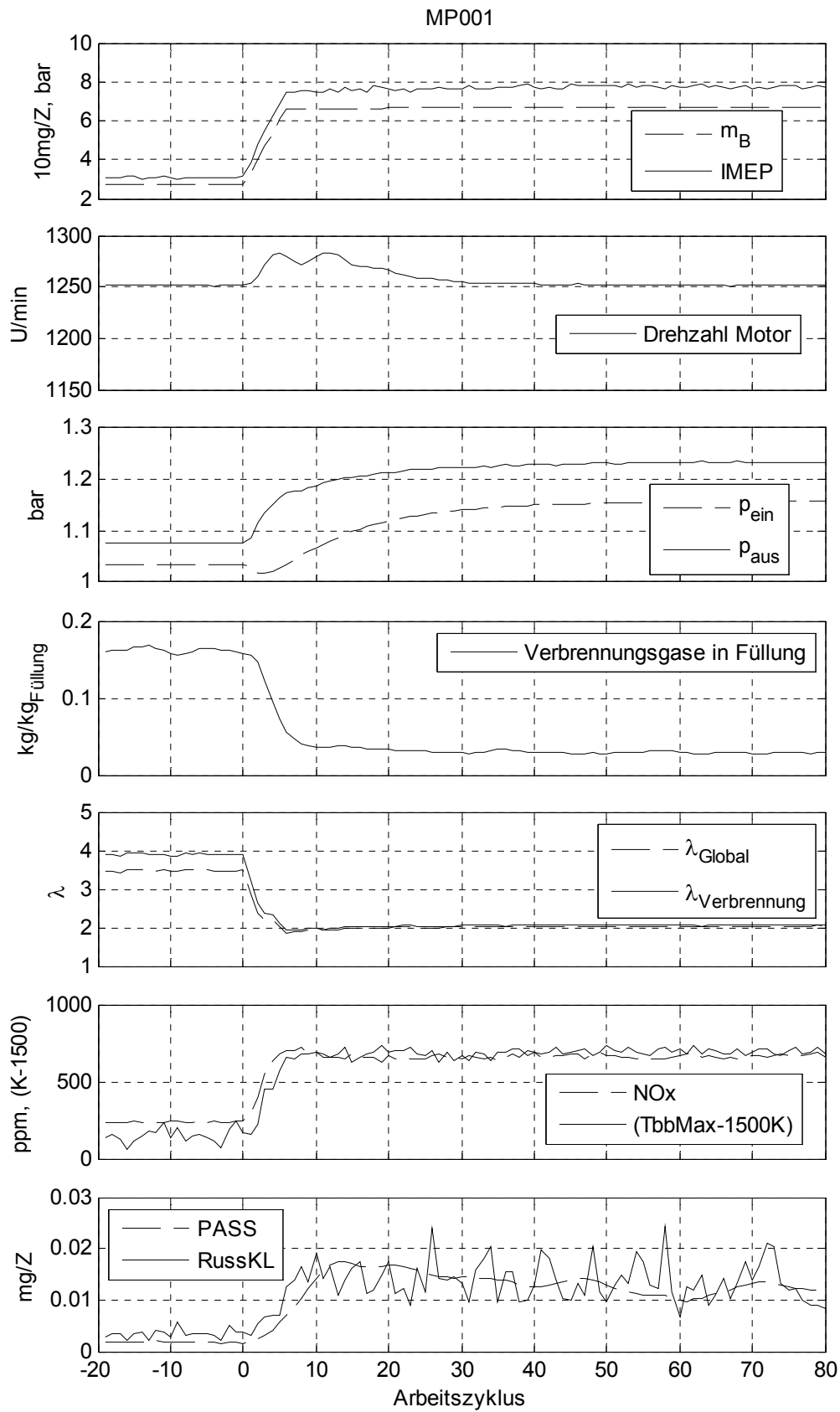


Abbildung 49: MP001 Lastanstieg bei konstanter Bremsendrehzahl von 1250 U/min, AGR-Ventil schliesst fast vollständig

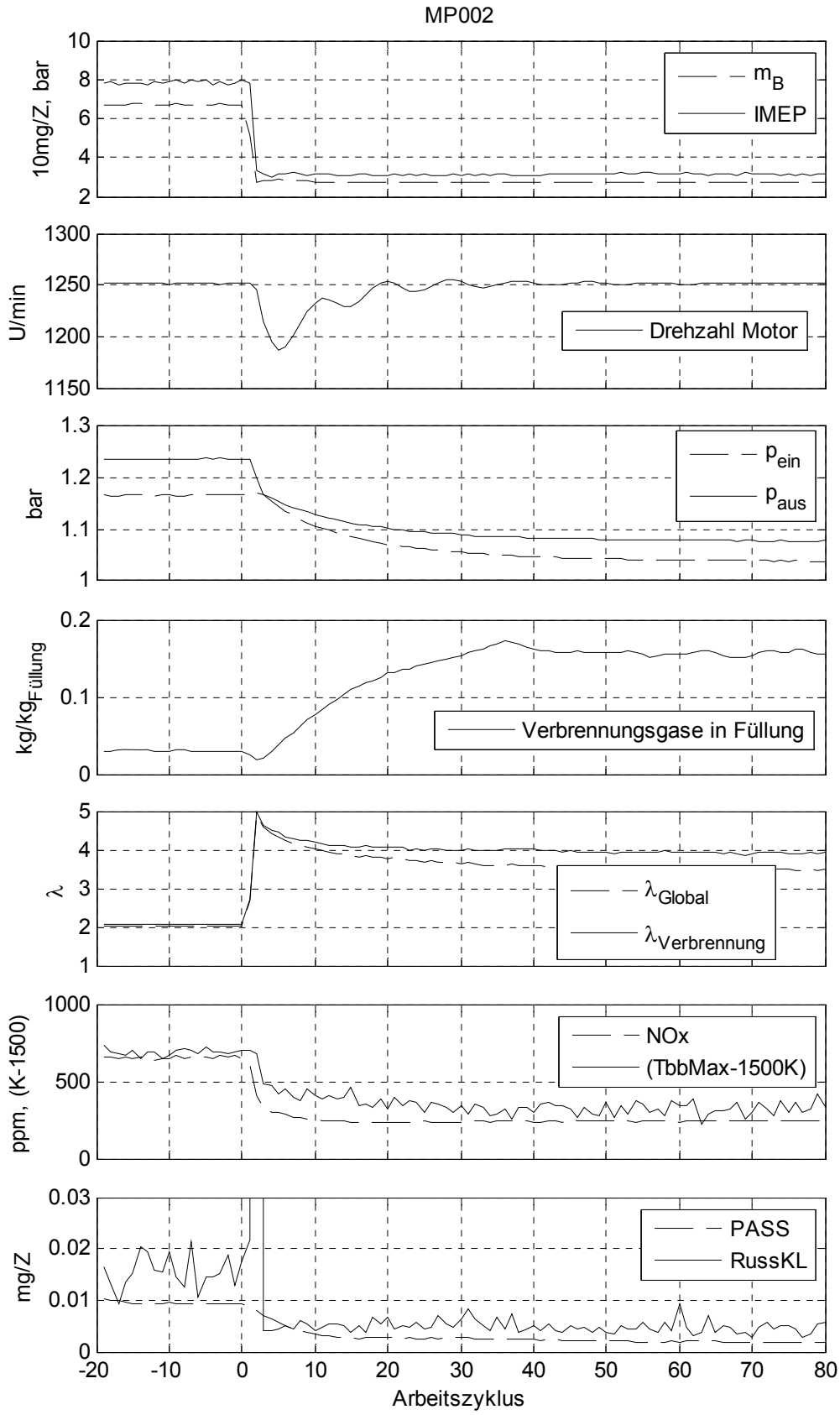


Abbildung 50: MP002 Lastabfall bei konstanter Bremsendrehzahl von 1250 U/min, AGR-Ventil öffnet

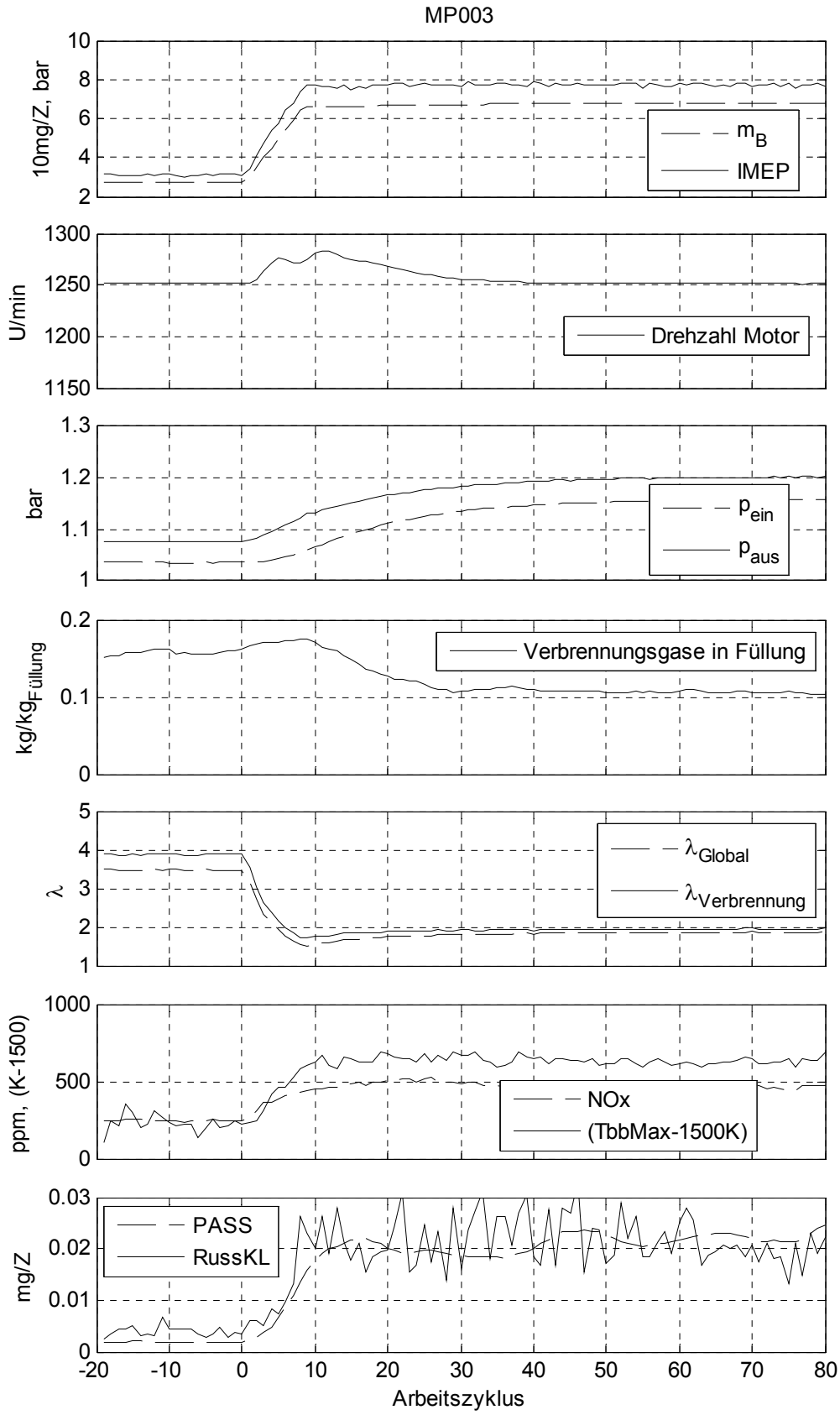


Abbildung 51: MP003 Lastanstieg bei konstanter Bremsdrehzahl von 1250 U/min, AGR-Ventil schliesst wenig

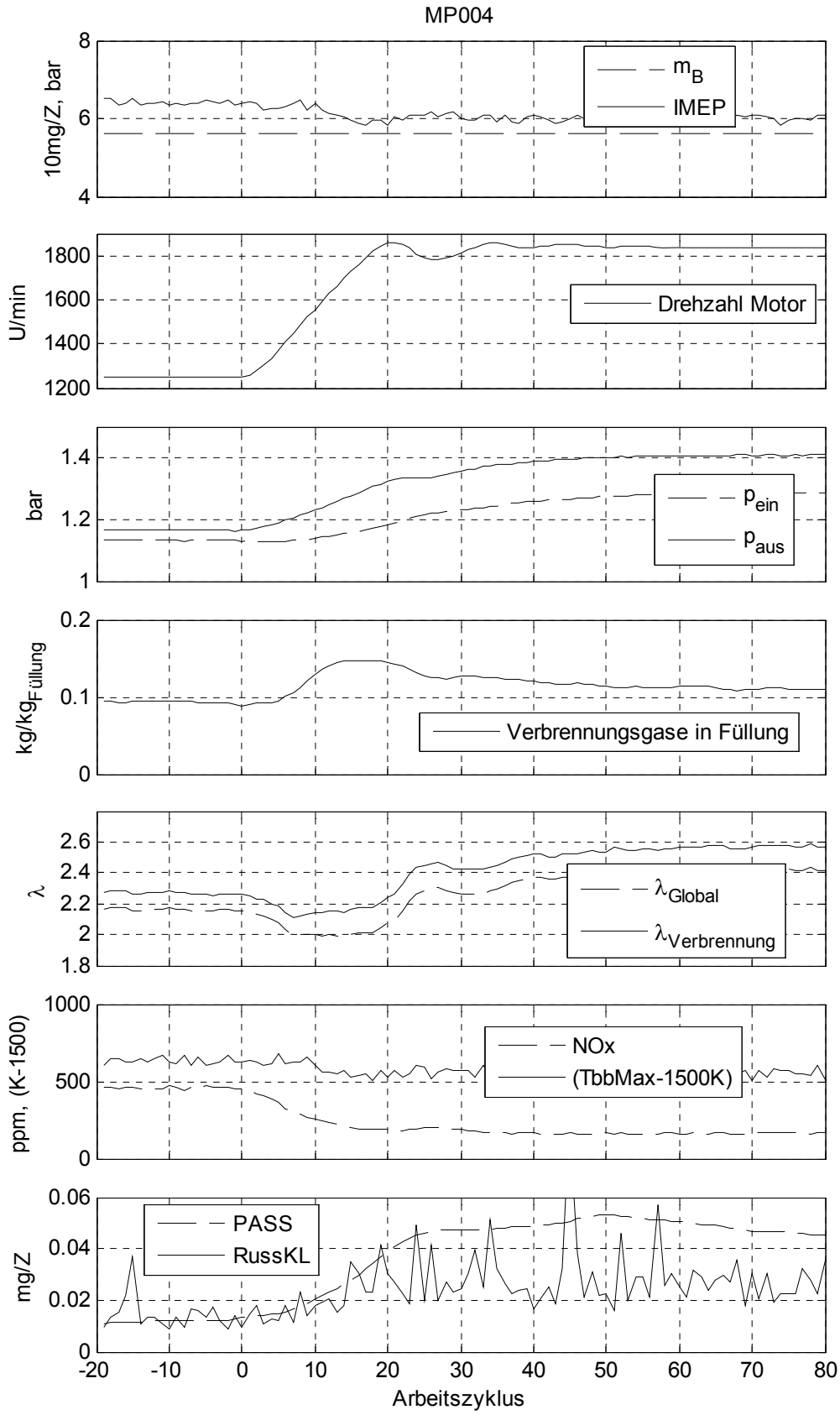


Abbildung 52: MP004 Drehzahlanstieg bei konstanter Einspritzmenge, AGR-Ventil schliesst teilweise bei Transientenbeginn

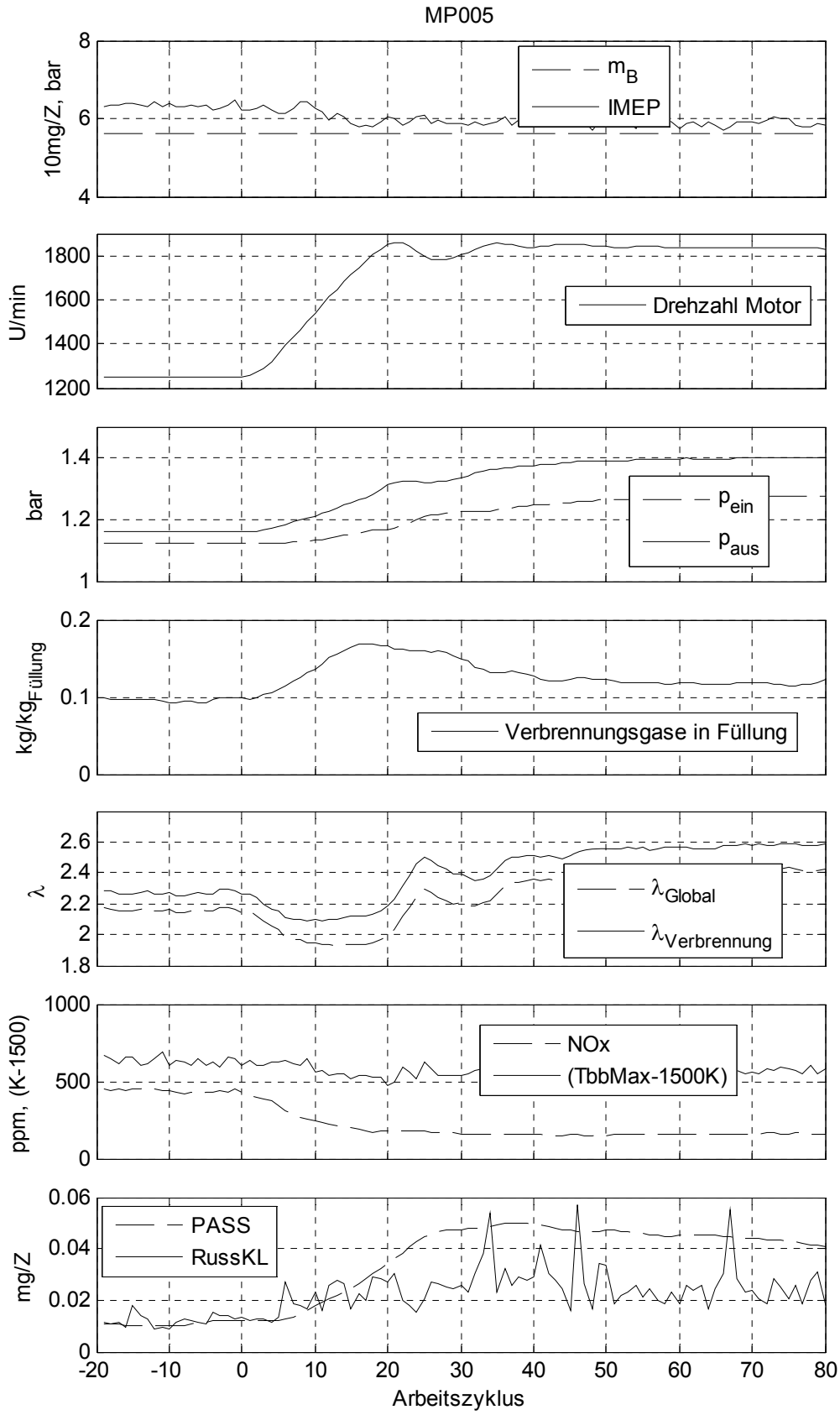


Abbildung 53: MP005 Drehzahlstieg bei konstanter Einspritzmenge, AGR-Ventil schliesst teilweise bei Transientenende (1830rpm)

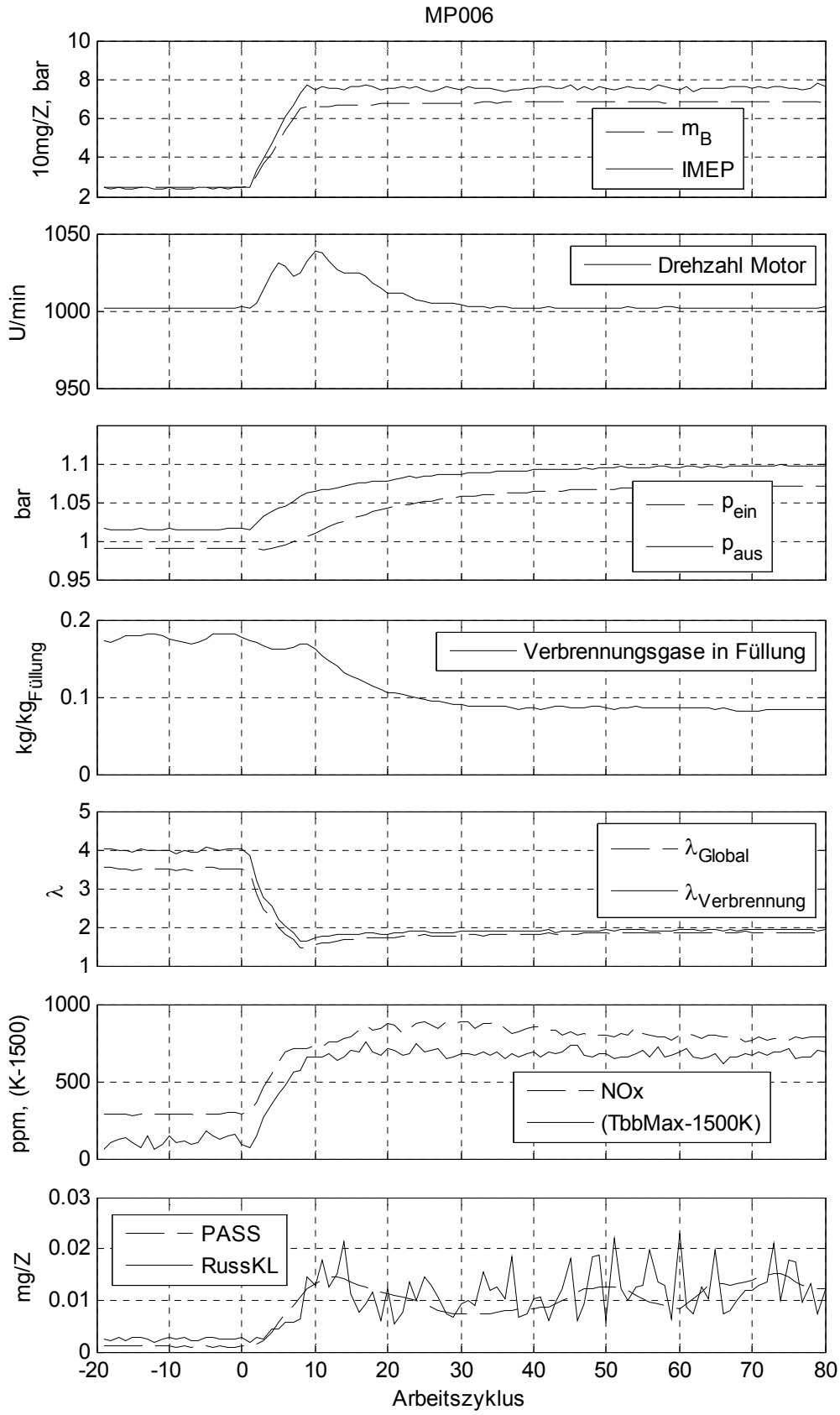


Abbildung 54: MP006 Lastanstieg bei tiefer konstanter Bremsendrehzahl von 1000 U/min, AGR-Ventil schliesst ganz

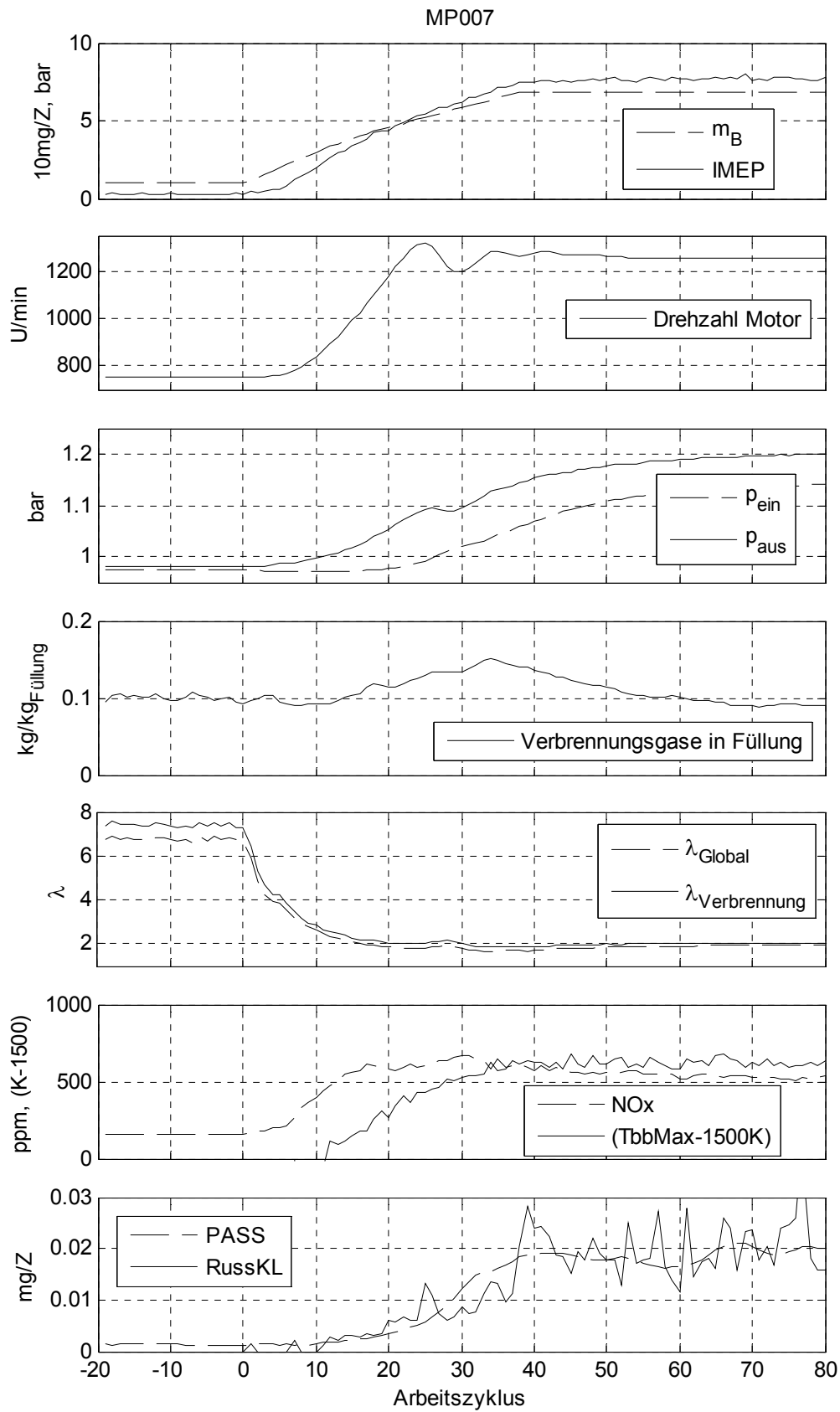


Abbildung 55: MP007 Last- und Drehzahlanstieg von Leerlauf 750 auf 1250 U/min, AGR-Ventil schliesst fast vollständig

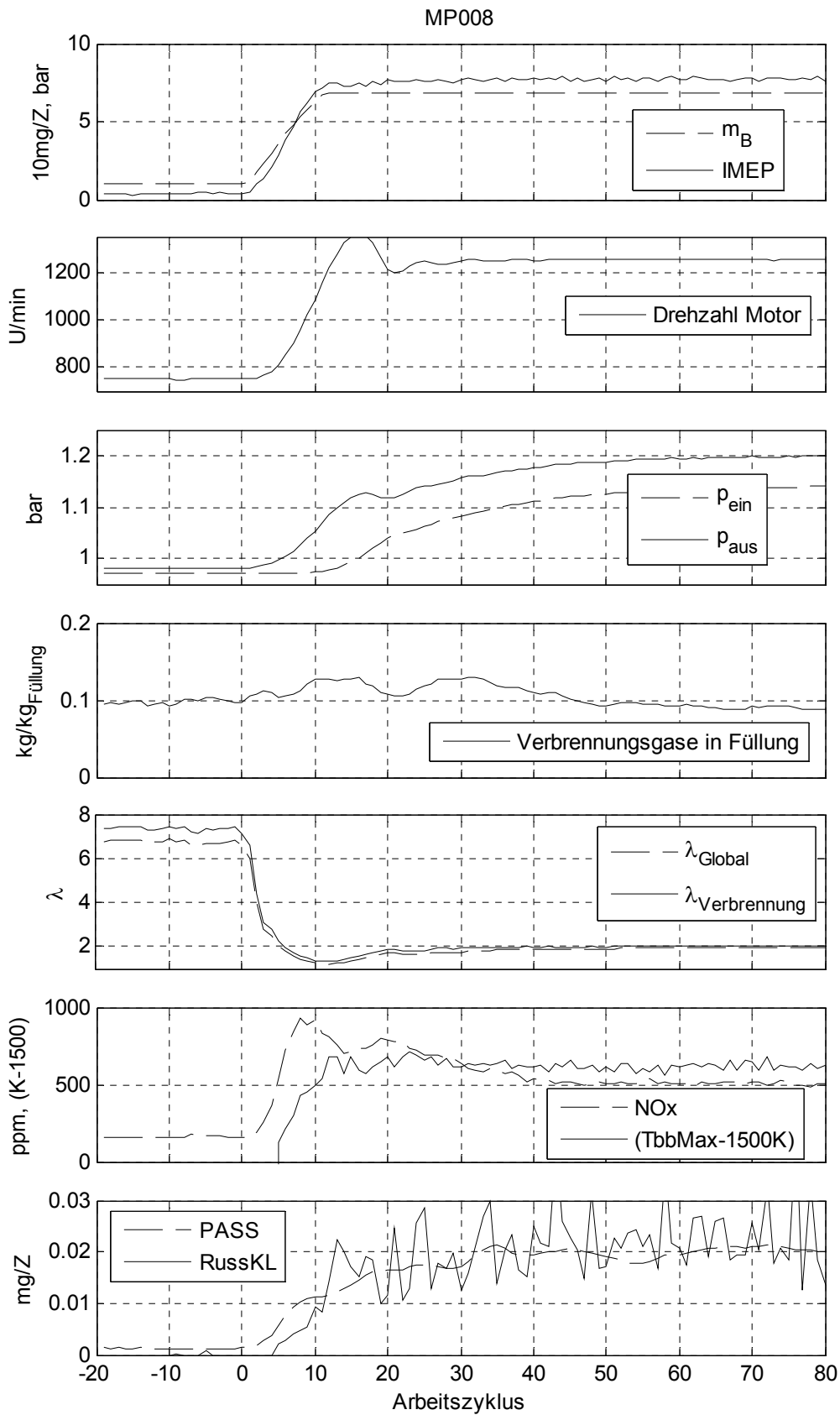


Abbildung 56: MP008 Schneller Last- und Drehzahlanstieg von Leerlauf 750 auf 1250 U/min, AGR-Ventil schliesst fast vollständig

## 7. Arbeitspaket 4: Schnelle Modelle, Russgeregelter Dieselmotor

### 7.1. Gegenstand

Die am LAV bereits vorhandenen phänomenologischen Modelle sollen an dem im Rahmen des FVV-Vorhabens „Russgeregelter Dieselmotor“ weiter entwickelt und am zur Verfügung gestellten Versuchsmotor sowohl für stationären, als auch transienten Betrieb umfassend validiert werden.

Insbesondere soll das in Vorgängerprojekt, dem FVV- Forschungsvorhaben „Russpartikel – Rohemissionsberechnung“ entwickelte schnelle Russbildmodell - in Hinblick auf seine Eignung für Lasttransienten - weiterentwickelt und für den Einsatz als virtueller Russ-Sensor tauglich gemacht werden.

### 7.2. Mitfinanzierung

FVV-Vorhaben „Russgeregelter Dieselmotor“

### 7.3. Ziel des Projekts

Ziel des LAV innerhalb des Projektes „Russgeregelter Dieselmotor“ ist die Entwicklung eines virtuellen Russensors für moderne Common Rail Dieselmotoren, welcher in einen Regelkreis zur Kontrolle der Russemissionen integriert werden soll. Dieses Ziel soll mit folgendem Vorgehen erreicht werden: Zum einen soll mit experimentellen Untersuchungen von Russbildung und –oxidation mittels Messungen, sowohl innermotorisch als auch im Abgas, das Verständnis der Mechanismen der Russbildung vertieft werden. Zum andern soll ein Mittelwert-Russmodell entwickelt werden, welches die gravimetrischen Russemissionen zyklus aufgelöst (~20 ms) im stationären wie auch im transienten Betrieb berechnet, wobei nur im Steuergerät bekannte Größen sowie der im Betrieb gemessenen indizierte Zylinderdruck als Modelleingänge verwendet werden.

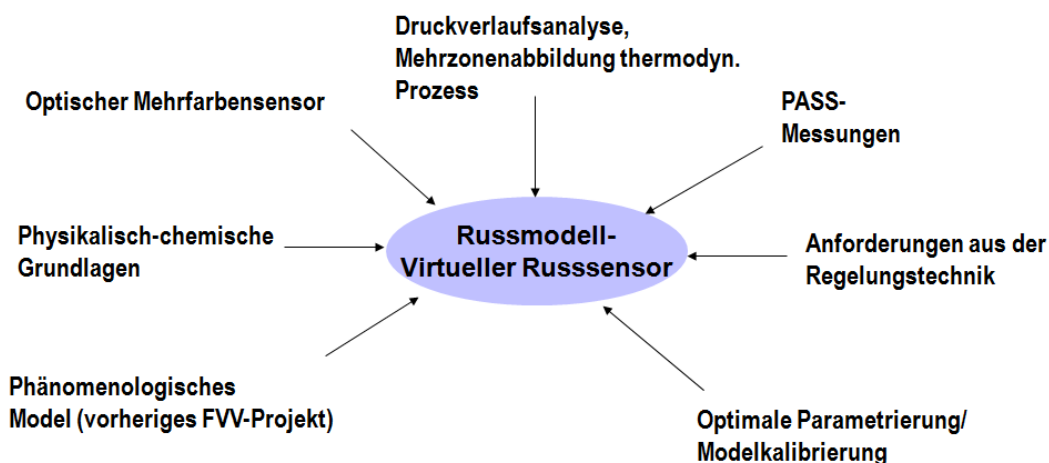


Abbildung 57: Schematische Darstellung des Vorgehens zur Entwicklung des virtuellen Russ-Sensors.

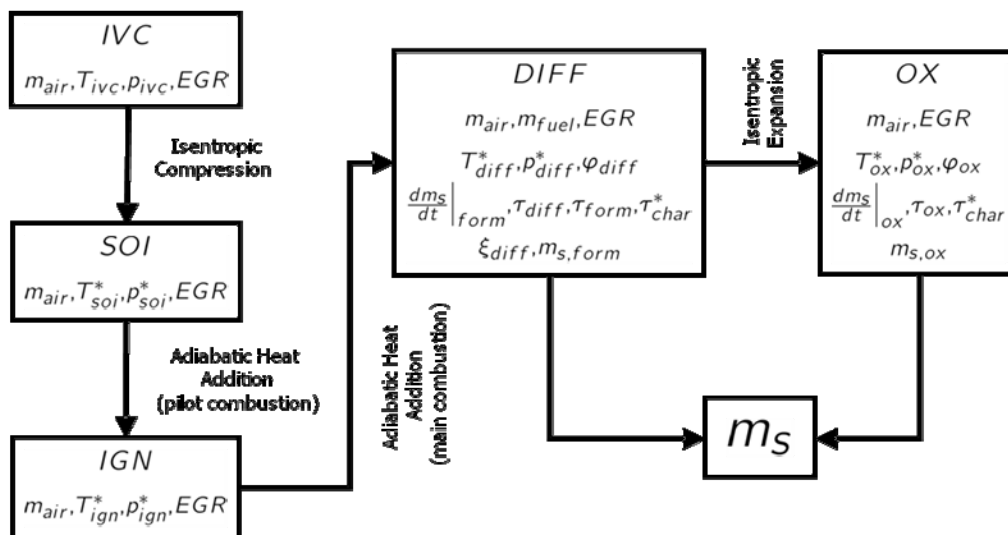
Abbildung 57 zeigt eine schematische Darstellung des Vorgehens und der Zielvorgaben, wobei die PASS Messungen (Abgas-Rohemissionsmessung der Russmasse mit einem Photo-Akustischen Russmessgerät) die Referenz-Russemissionen darstellen. Wie bereits erwähnt, wird der Zylinderdruckverlauf als Modelleingang verwendet. Die zeitliche Auflösung des online gemessenen Druckverlaufs wurde auf 1° Kurbelwinkel festgelegt. Aus einer vereinfachten, echtzeitfähigen thermodynamischen Druckverlaufsanalyse werden – als Input in das Mittelwert-Russmodell – charakteristische Größen wie Brennbeginn und relevante Umsatzpunkte abgeleitet. Die 3-Farben-Pyrometrie wird **nur** für die Modellentwicklung verwendet und ist **nicht** als Modelleingang vorgesehen (Siehe Arbeitspaket 3). Mit Hilfe der experimentell gewonnen Erkenntnisse soll das im vorgängigen FVV-Vorhaben entwi-

ckelte phänomenologische Mittelwert-Russmodell zu einem virtuellen Russensor weiter entwickelt werden, in welchem, aus einem erweiterten Prozessverständnis, zuvor durch Optimierung gewonnene Parameter durch zusätzliche Modelleingänge ersetzt werden sollen. Bezüglich Rechenzeiten muss der virtuelle Russensor den regelungstechnischen Ansprüchen entsprechen, sodass eine Integration in einen Regelkreis möglich ist.

#### 7.4. Modellbildung und –entwicklung

##### 7.4.1. Eigenschaften des weiter zu entwickelnden Basis-Modells

Wie bereits zuvor erwähnt, baut der zu entwickelnde virtuelle Russensor auf dem im Rahmen des Vorgängerprojekts entwickelten Mittelwert-Russmodell auf.



**Abbildung 58: Schematischer Aufbau des Mittelwert-Russmodells aus dem Vorgängervorhaben (Kirchen, et al., 2009).**

Abbildung 58 zeigt die fünf repräsentativen Zustände, welche zur Russmassenberechnung im bisherigen Mittelwert-Russmodell verwendet wurden. Hierbei werden bei Punkt IVC (Einlassventil schliesst) die Zustände der Zylinderladung abgeschätzt. Mit der Annahme einer isentropen Kompression und einer adiabaten Wärmezufuhr der Piloteinspritzung wird über den Punkt SOI (Einspritzbeginn) der Zustand im Zylinder bis zum Zeitpunkt der Zündung (IGN) abgeschätzt. Der Zustand DIFF ist repräsentativ für die Russbildung während einer Diffusions-gesteuerten Verbrennung, OX für die Oxidation. Die Differenz aus gebildeter und oxidiertes Masse ergibt schlussendlich die emittierte Russmasse pro Zyklus. Das Modell hat verschiedene, im Grunde genommen Betriebspunkt-abhängige Parameter, wie zum Beispiel die Winkellage der Russbildung oder –oxidation, die nach einer Optimierung nicht mehr variabel sind. Weiter pflanzen sich Fehler respektive Unsicherheiten, der zu Beginn des Zyklus (IVC) abgeschätzten Größen fort. Wird beispielsweise die Temperatur bei „Einlassventil schliesst“ zu hoch geschätzt, wird der Zündverzögerung zu kurz und somit die daraus geschätzte Kraftstoffmasse der russbildenden Diffusionsverbrennung zu gross geschätzt. Unter Verwendung des Druckverlaufes und einer Echtzeit -fähigen thermodynamischen Prozessanalyse kann beispielsweise der Start der Verbrennung einer Winkellage zugeordnet werden und somit der Zündverzögerung viel genauer abgeschätzt werden. Die Kraftstoffaufteilung auf Vormisch- und (russbildende) Diffusionsverbrennung kann aus dem Zündverzögerung und aus dem in Echtzeit berechneten Heizverlauf abgeschätzt werden.

### 7.4.2. Anwendung des Basis-Rusmodells

Abbildung 59 zeigt das Mittelwert-Rusmodell aus dem Vorgänger-Vorhaben optimiert und angewendet auf dem OM 642 (Der Prüfling des Vorgänger-Vorhaben war der Daimler OM 611). Das Modell wurde wegen den zuvor genannten Problemen mit dem Versuchsträger in einem reduzierten Motor-kennfeld mit nur 50 Betriebspunkten (siehe unten 7.4.4.) parametrisiert und validiert. Die Parameter-Optimierung erfolgte an hand von 34 Betriebspunkten, die Validierung an 16.

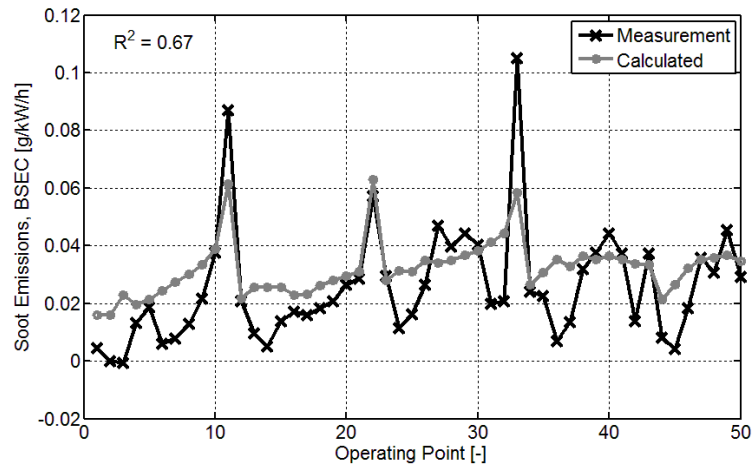


Abbildung 59: Ursprüngliches Mittelwert-Rusmodell angepasst und parametrisiert auf OM 642.

### 7.4.3. Durch zusätzliche Modelleingänge verbessertes Modell

Um die Nützlichkeit weiterer Informationen in Form zusätzlicher Modelleingänge, insbesondere des indizierten Drucks, zu demonstrieren, wurde auf dasselbe Kennfeld eine erste modifizierte Version des Modells angewendet. Im Letzteren werden die mittels des gemessenen indizierten Drucks bestimmten Größen Zündverzug und die globale maximale Prozesstemperatur (relevant für Bildung und Oxidation) als Modelleingänge verwendet (Die Bestimmung des Zündverzugs aus dem Druckverlauf wird folgend noch beschrieben). Das in Abbildung 60 gezeigte Ergebnis der Anwendung des verbesserten Modells auf denselben Messdatensatz wie unter 7.4.1., zeigt eine wesentlich bessere Übereinstimmung mit den Messungen. Der gewonnene verbesserte Ansatz bildet die Basis für die Strategie zur Weiterentwicklung des neuen Modells.

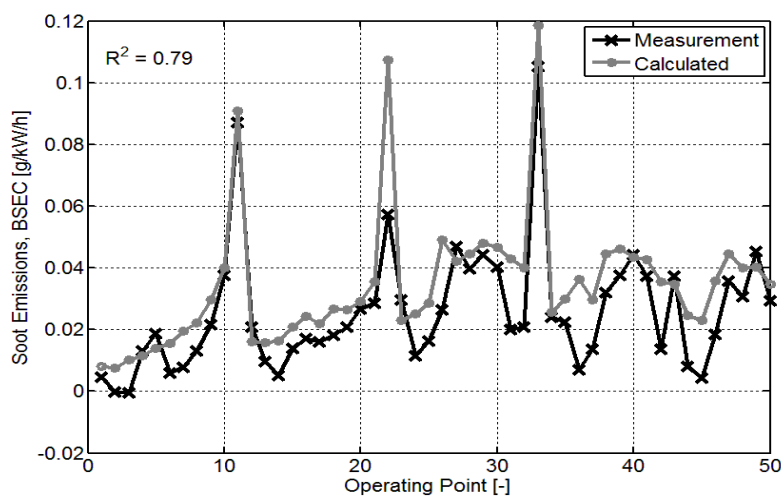
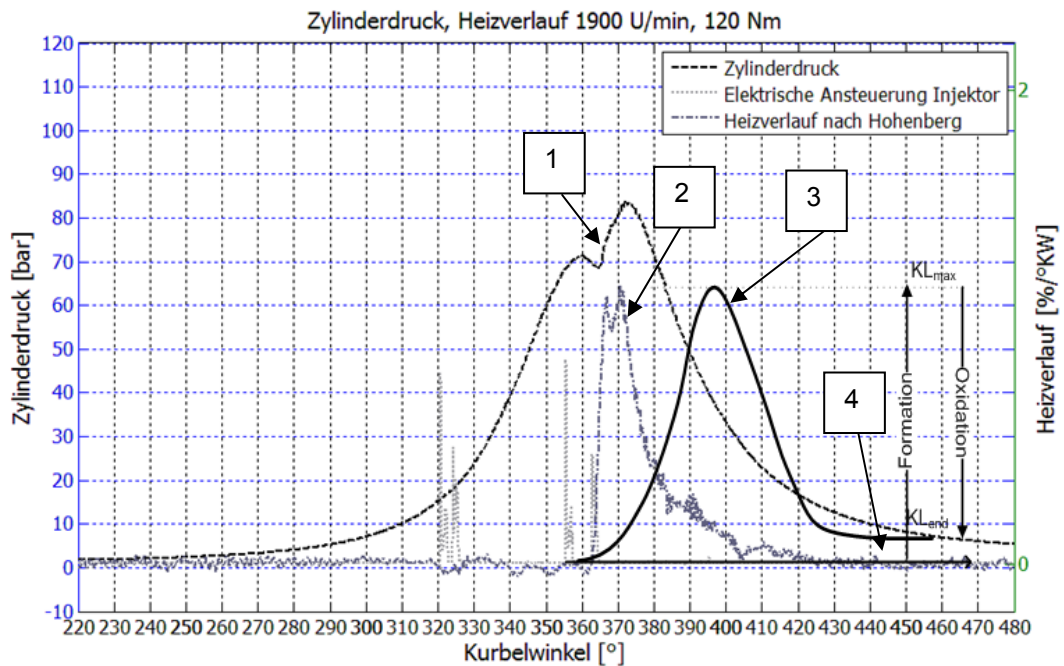


Abbildung 60: Mittelwert-Rusmodell mit Zündverzug und relevanter Bildungs-/Oxidationstemperatur als Modelleingänge.

#### 7.4.4. Weiterentwicklung des verbesserten Modells



**Abbildung 61: Messung am OM 642 mit Zylinderdruck (1), Injektoransteuerung, Heizverlauf (2) und exemplarischem KL-Verlauf (3).**

Die weitere Modellentwicklung verfolgt nun folgende Ziele (vgl. *Abbildung 57*): Das Modell soll aus Zusammenhängen zwischen dem Einspritzgesetz, dem Heizverlauf, dem Verlauf der mittels OLP gemessenen Russdichte (KL-Verlauf) und schliesslich den Russemissionen im Abgas aufgebaut werden.

Die wichtigsten charakteristischen Grössen des Einspritzgesetzes sind hydraulischer Beginn und Ende der Einspritzung; die Bestimmung dieser Grössen erfolgt mittels eines Modells aus dem aus dem Steuergerät bezogenen elektrischen Ansteuersignal des Injektors als Eingang.

Die Kenntnis des Beginns der Einspritzung ist wesentlich für die Bestimmung weiterer relevanter Grössen aus dem indizierten Druck:

Mit der Kenntnis des in Echtzeit aus dem indizierten Druck bestimmten Heizverlaufs (2) können nun Grössen wie der Brennbeginn und damit der Zündverzug, die maximale Kraftstoffumsetzrate und der Anteil des unter Diffusionsverbrennung umgesetzten Brennstoffs berechnet werden. Letzterer ist relevant für die Masse des gebildeten Russes. Zusätzlich können, nach Abschätzung der Ladungsmasse, aus dem indizierten Druck die Zustände des Arbeitsgases bei beliebigen Winkellagen berechnet werden. Zur Entwicklung des Modells werden offline bestimmte Grössen wie der Brennverlauf oder der aus OLP-Messungen gewonnene Verlauf des KL-Verlaufs direkt verwendet (*Abbildung 61*). So können die später im Modell abgeschätzten Grössen wie die Aufteilung der Verbrennung in eine Vormisch- und Diffusionsverbrennung und die Winkellage der maximalen Kraftstoffumsetzrate exakt bestimmt werden. Diese Winkellage ist relevant für eine Korrelation zwischen der maximalen Kraftstoffumsetzrate mit dem Maximalwert des KL-Verlaufs (Punkt 3), welcher repräsentativ für das Ende der Russbildung steht. Für den Endwert von KL (Punkt 4) wird eine Korrelation zum Ende der Kraftstoffumsetzung sowie zu der globalen Zylindertemperatur (berechnet aus Zylinderdruck mit Hilfe der idealen Gasgleichung) gesucht. Der KL-Endwert kann, wie oben unter 6.3. gezeigt, mit den im Auspuff gemessenen Russemissionen korreliert werden.

Die Bildung und die Oxidation des Russes werden vereinfacht sequentiell betrachtet. Das Modell wird in 3 verschiedene Phasen aufgeteilt.

1. Reine Bildungsphase
2. Haltephase / Gleichgewichtsphase, Bildung und Oxidation kommen vor.
3. Reine Oxidationsphase

Die Bildungsphase ist linear und nur abhängig von der Kraftstoffmasse, welche an der Diffusionsverbrennung teilnimmt. Die Haltephase bildet einen Bereich ab, wo sich die Russbildung und -oxidation im Gleichgewicht befinden. Die Russoxidation wird mit einem exponentiellen Abfall abgebildet. Der Exponent der Russoxidation ist eine Funktion der Last, der Turbulenz und der Sauerstoffverfügbarkeit. Die Zeitkonstanten aller drei Phasen werden aus dem Heizverlauf abgeleitet (vgl. *Abbildung 62*). Die Zustände bei Brennbeginn werden nicht mehr wie beim Vorgängervorhaben von den Zuständen bei Kompressionsbeginn ausgehend abgeschätzt, sondern mittels Zylinderdruck und der abgeschätzten Ladungsmasse direkt berechnet.

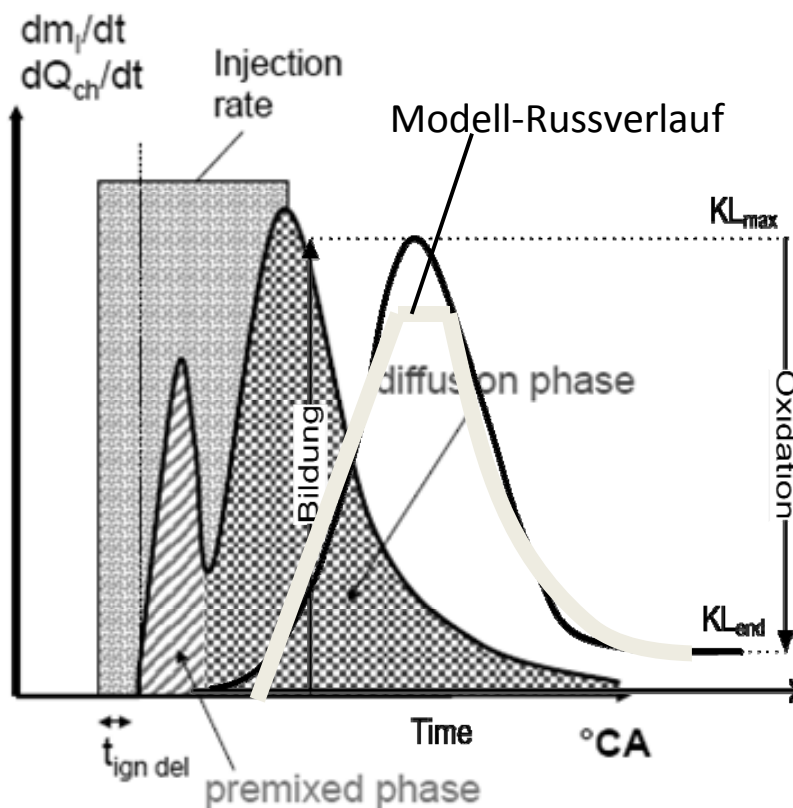


Abbildung 62: Modellkonzept mit exemplarischer Einspritzrate, Brennrat,  $KL$ -Verlauf und der exemplarischen Modelltrajektorie.

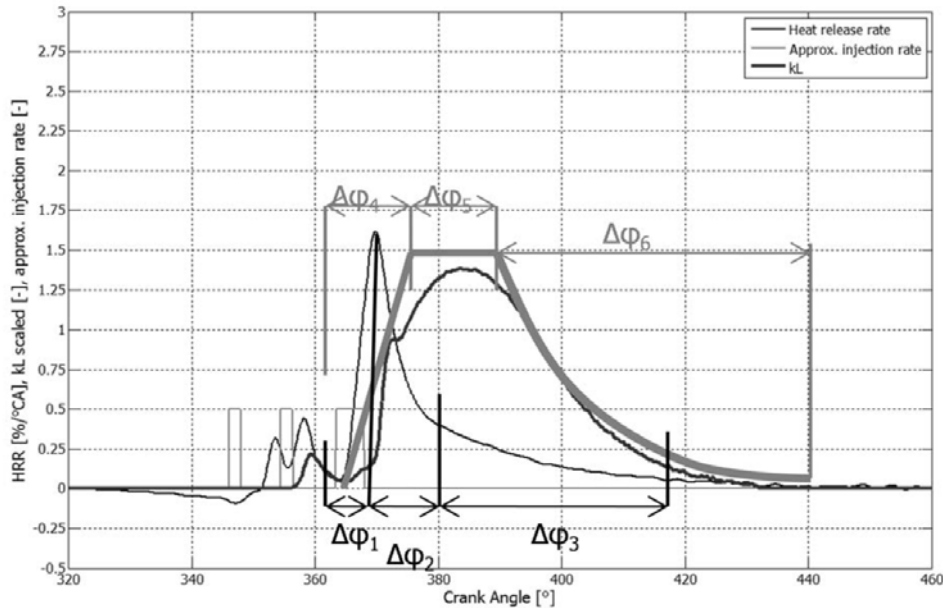


Abbildung 63 Modellkonzept mit Einspritzrate, Brennrate, kL-Verlauf und der exemplarischen Modelltrajektorie eines gemessenen Betriebspunktes am OM 642.

Aus dem Heizverlauf werden vier charakteristische Größen abgeleitet:

1. Start der Verbrennung
2. Maximale Umsatzrate der Diffusionsverbrennung
3. 1/e-Punkt / Charakteristischer Umsatzpunkt bei 37% (= ca. 1/e) der maximalen Umsatzrate
4. Ende des Heizverlaufs (10% der maximalen Umsatzrate)

Die charakteristischen Zeiten resp. Winkelgrade (Kurbelwinkel) zwischen diesen Punkten werden über  $\Delta\varphi_1$ ,  $\Delta\varphi_2$  und  $\Delta\varphi_3$  beschrieben (vgl. *Abbildung 63*). Die Winkelgrößen  $\Delta\varphi_4$ ,  $\Delta\varphi_5$  und  $\Delta\varphi_6$  werden aus  $\Delta\varphi_1$ ,  $\Delta\varphi_2$  und  $\Delta\varphi_3$  abgeleitet.

Die Modellgleichungen werden zu:

- Bildung:

$$m_{Russ,Bild} = b_1 \cdot m_{Kr,diff}^{b_2} \quad (1)$$

Die Bildung ist somit proportional zur Kraftstoffmasse der Diffusionsverbrennung

- 

Haltephase:

$$m_{Russ,Haltephase} = m_{Russ,Bild} \cdot \left( 1 + 0 \cdot \left( \frac{\Delta\varphi_2}{\varphi_{ref}} \right)^{\Delta\varphi_5} \right) \quad (2)$$

Die modellierte In-Zylinder-Russmasse ändert sich im Gleichgewicht nicht. Die Dauer wird durch  $\Delta\varphi_5$  beschrieben.

- Oxidation:

$$m_{\text{Russ,Endwert}} = m_{\text{Russ,Haltephase}} \cdot \left( 0.01 + \exp \left( -B \cdot \frac{\overbrace{b_{12} \cdot \Delta\varphi_3}^{\Delta\varphi_6}}{\varphi_{\text{ref}}} \right) \right)$$

$$B = \left( \frac{T_{\text{ox}}}{T_{\text{ref}}} \right)^{b3} \cdot (1 + b_4 \cdot \text{EGR}_{\text{stoch}})^{-b5} \cdot \left( \frac{b_6 \cdot \lambda}{2} \right)^{b7} \cdot \left( \frac{p_{\text{rail}}}{p_{\text{rail,ref}}} \right)^{b8} \cdot \left( \frac{5}{\sin \left( \text{EKAS} \cdot \frac{\pi}{2} \right)} \right)^{b9} \cdot \left( \frac{\text{rpm}}{\text{rpm}_{\text{ref}}} \right)^{b10} \cdot \left( \frac{m_{\text{fuel}}}{m_{\text{fuel,ref}}} \right)^{b11}$$

(3)

Die Oxidationsphase wird mit einer Exponentialfunktion abgebildet, deren Argumente zum einen die Oxidationsstärke durch Turbulenz (Raildruck, EKAS (Einlasskanalabschaltung) und Drehzahl), Reaktionskinetik (Temperatur, AGR-Rate und Stöchiometrie) und Last (Kraftstoffmasse) beschreiben und zum andern die Oxidationsdauer über  $\Delta\varphi_6$  definieren. Die Parameter b1-b12 werden optimiert. Die Referenzwerte halten die einzelnen Faktoren dimensionslos.

Um die Rechenzeit gering zu halten, wurden für die On-line-Analyse die Russbildungsphase und die Haltephase so vereinfacht, dass der Start der Verbrennung nicht mehr berücksichtigt werden muss. Die Russänderung für die Haltephase wurde auf 0 gesetzt, also ein Gleichgewicht dargestellt. Da die Haltephase nur eine geometrische Bedeutung für die Modelltrajektorie hat, muss sie für die Online-Berechnung der Abgas-Russmasse nicht berücksichtigt werden. Als Konsequenz entspricht  $\Delta\varphi_4$  dem Wert von  $\Delta\varphi_1$  und  $\Delta\varphi_5$  dem Wert von  $\Delta\varphi_2$ .

## 7.5. Messungen / experimentelle Ergebnisse

### 7.5.1. Stationäre Ergebnisse

Das Modell kann mittels eines stationären Motorkennfeldes parametrisiert werden. Transiente Effekte so wie auch stationär ändernde Betriebsbedingungen sollten extrapolierbar sein.

#### **Methodik der Modellkalibrierung**

Die Parametrierung respektive Kalibrierung des Modells erfolgte in einem ersten Schritt mit Hilfe eines genetischen Optimierers, wie er auch in (Kirchen, et al., 2009) verwendet wurde. Da sich die Anzahl der zu optimierenden Parameter auf 12 reduziert hat (von 16 in (Kirchen, et al., 2009)) wurden die Parameter nach einer stochastischen Initalisierung mittels Sensitivitätsanalyse verbessernd verändert.

Dabei musste zuerst der Bereich jedes Parameters definiert werden. Die anschließende Initalisierung verwendet 1000 verschiedene stochastische Kombinationen der Parameterwerte. An dem Parametersatz mit der höchsten Korrelation zu den Messergebnissen wird eine Sensitivitätsanalyse jedes Parameters durchgeführt. Führt hierbei eine Veränderung des Parameters (um +/- 10%) zu einer Verbesserung ändert dieser Parameter seinen Wert. Werden mehrere Parameter verändert, wird die Korrelation erneut überprüft. Falls dies zu einer Verbesserung führt, behalten alle Parameter ihren neuen Wert, falls nicht wird nur der Parameter verändert, welcher die grösste Verbesserung beiträgt. Diese Iteration wird so oft wiederholt, bis keine Verbesserung mehr stattfindet. Der ganze Vorgang dauerte in diesem Fall einige Minuten.

## Resultate der Modellkalibrierung

Abbildung 64 zeigt die Resultate der Parametrierung anhand eines Kennfelds mit 72 Betriebspunkten. Um die Extrapolierbarkeit zu demonstrieren wurde das Modell an einer Einzel-Motorparameter-Variation validiert, bei welcher durch eine gezielte Verstellung der einzelnen Stellglieder (wie z.B. EKAS, VTG, AGR, etc.) die Betriebsbedingungen des Motors und dessen Russemissionen verändert wurden. Der Korrelationskoeffizient  $R^2$  ist bei der Parametrierung mit 0.81 zufriedenstellend. Die Validierung (vgl. rechte Seite von Abbildung 64) zeigt mit einer noch höheren Korrelation (0.93), dass die Extrapolierbarkeit des Modells bezüglich der regelungstechnisch relevanten Stellgrößen gegeben ist. Ein Grund für die höhere Korrelation liegt darin, dass die Basispunkte für die Einzel-Motorparameter-Variation in einem eingeschränkten Kennfeldbereich liegen (3-8 bar  $p_{me}$ , 1200-2200 U/min).

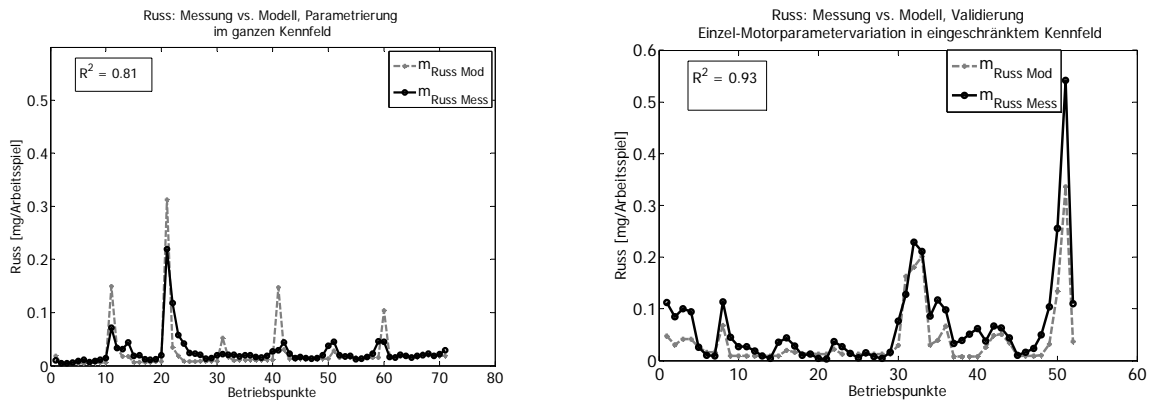


Abbildung 64: Modellparametrierung im Motorkennfeld (links) und Modellvalidierung an „Einzel-Motorparameter-Variation“ in eingeschränktem Kennfeldbereich.

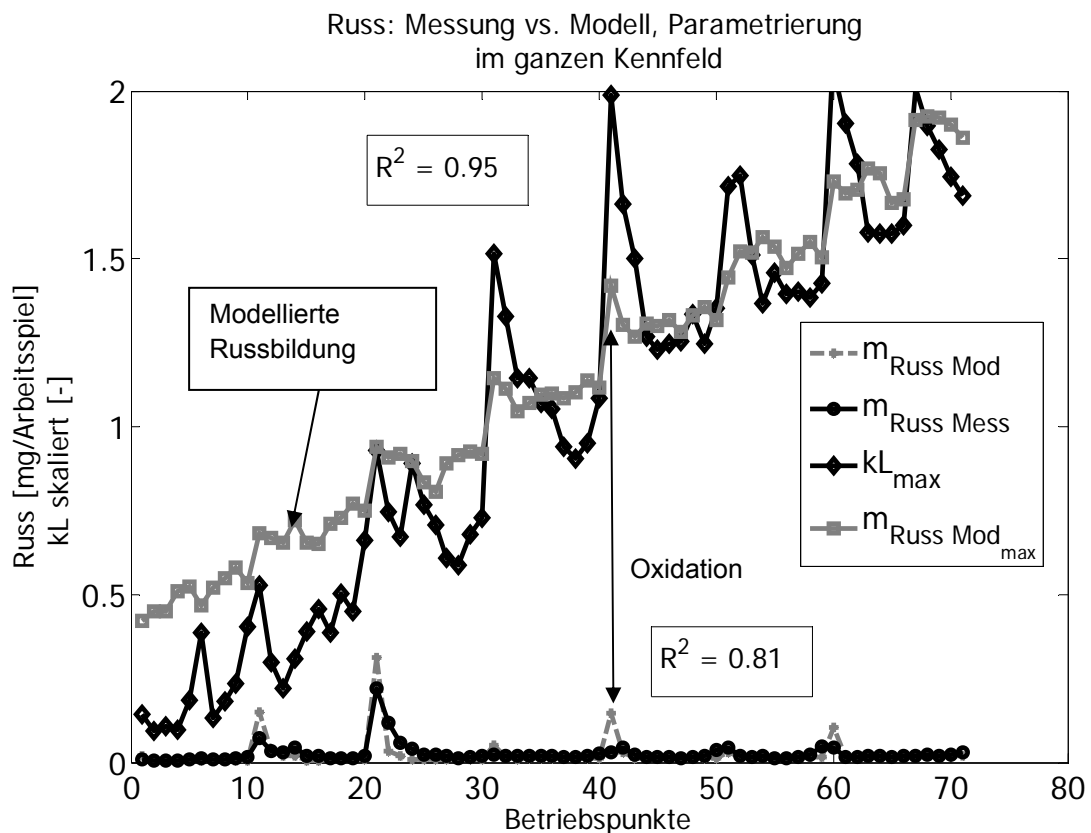
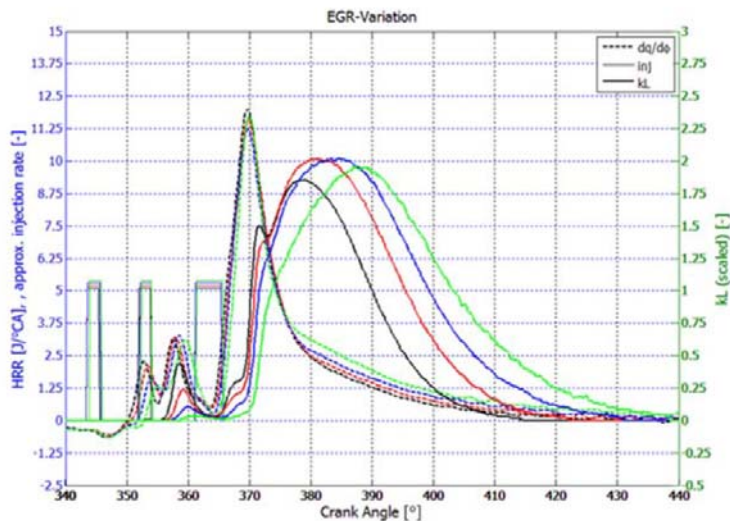


Abbildung 65: Modellierte Russbildung und Russ-Endwerte der Modellparametrierung

Abbildung 65 demonstriert die Unterschiede der modellierten maximalen Russmenge im Zylinder und der Abgasrussmenge. Die maximale modellierte In-Zylinder-Russmenge wird dabei in Relation zum maximalen  $k_L$ -Wert (skaliert) gestellt. Dies zeigt zum einen, dass die Russbildung wie auch die –oxidation im Modell relevant sind und zum andern, dass die Änderung des Bildungs- zu Oxidationsverhältnismittel mit der Änderung des Betriebspunktes vom Modell gut abgebildet wird. Der Korrelationskoeffizient  $R^2$  zwischen  $k_{L\_Max}$  und der modellierten maximalen Russmenge ist bei 0.95.

Die Abbildung 66 zeigt ein Beispiel der „Einzel-Motorparameter-Variation“. Anhand einer AGR –Variation wird demonstriert, wie die Oxidationsrate bei einer AGR-Zunahme abnimmt und wie gering der AGR-Einfluss auf den Heizverlauf ist, wenn mit genügen Voreinspritzmenge die Hauptverbrennung ausschliesslich diffusionsgesteuert ist.

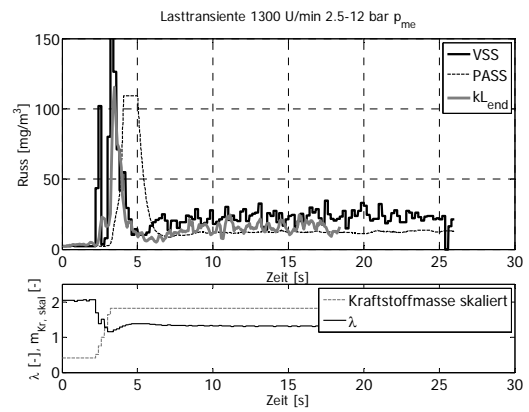
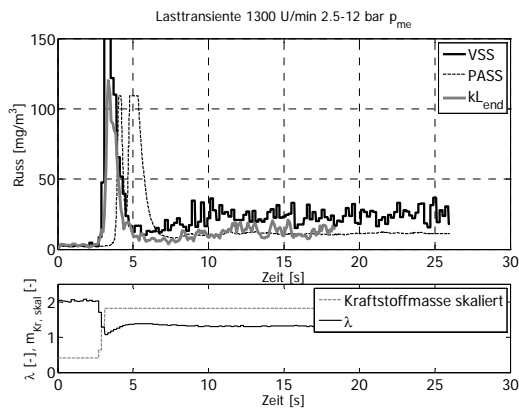


—	AGR 0% Russ: 4 mg/m <sup>3</sup>	AGR: 1.1% λ: 2.3 EKAS: 55% p <sub>Rail</sub> : 511 bar
—	AGR 10% Russ: 9 mg/m <sup>3</sup>	AGR: 9.7 % λ: 1.9 EKAS: 55% p <sub>Rail</sub> : 515 bar
—	AGR 20% Russ: 41 mg/m <sup>3</sup>	AGR: 19 % λ: 1.7 EKAS: 55% p <sub>Rail</sub> : 525 bar
—	AGR 30% Russ: 215 mg/m <sup>3</sup>	AGR: 27.3% λ: 1.4 EKAS: 55% p <sub>Rail</sub> : 542 bar

Abbildung 66 AGR-Variation, Einspritz-, Heiz- und  $k_L$ -Verläufe

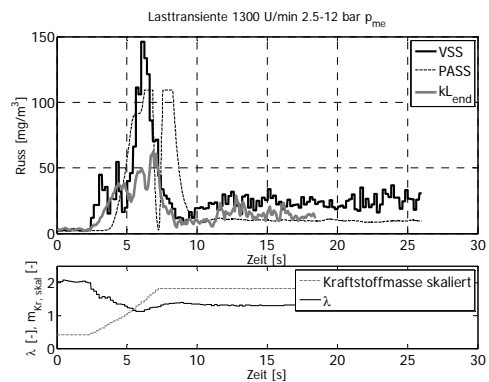
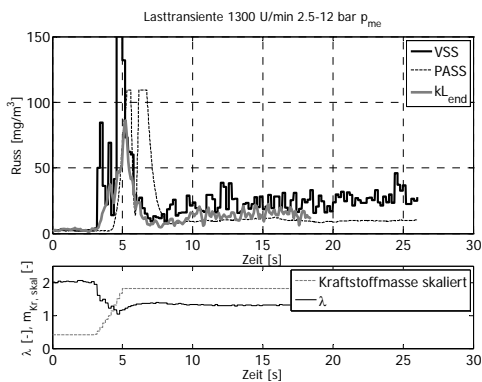
### 7.5.2. Transiente Ergebnisse

Um die Leistungsfähigkeit des Modells im transienten Betrieb zu demonstrieren, wurden verschiedene Lastsprünge - respektive Rampen vermessen. Dabei wurde die Drehzahl, die Ausgangslast wie auch die Rampendauer variiert. Die Russemissionen eines jeden Zyklus werden mit VSS berechnet und mit  $k_{L\_end}$  gemessen. Diese Messungen sind jedoch nicht universell einsetzbar und haben nur einen relativen Geltungsbereich. Die absoluten Werte werden mit PASS überprüft. Die Russkonzentration eines einzelnen Zyklus kann mit PASS nicht ermittelt werden, da zum einen eine Durchmischung und Glättung während der Gastransportzeit stattfindet und zum andern in der verwendeten Konfiguration Russkonzentration, die höher als 110 mg/m<sup>3</sup> sind, nicht mehr angezeigt werden.



0.5 s

1 s



2 s

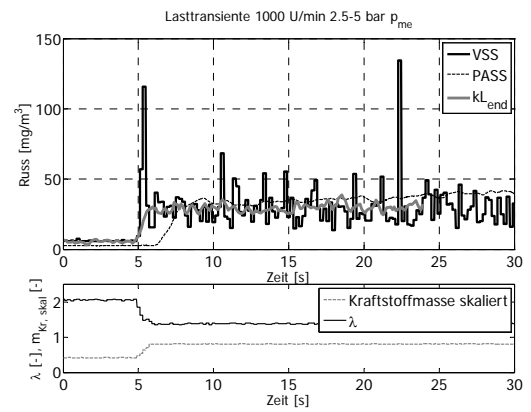
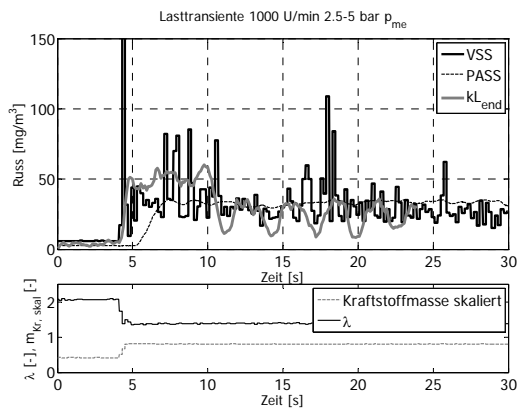
5 s

**Abbildung 67: Lasttransiente von 2.5 bis 12 bar  $p_{me}$  bei 1300 U/min innerhalb von 0.5, 1, 2 und 5 Sekunden.**

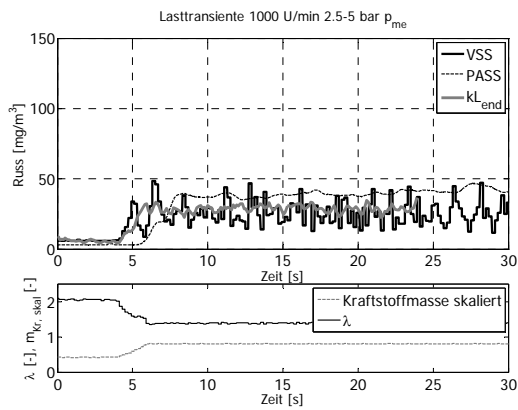
Die *Abbildung 67* zeigt einen Vergleich von VSS mit  $k_{L_{end}}$  für die schnellen Veränderungen (zyklus aufgelöst) und PASS für die stationären Werte bei 1300 U/min. Die Übereinstimmung zwischen  $k_{L_{end}}$  und VSS ist vor allem bei der Laständerung innerhalb 0.5 s sehr gut. Bei zunehmend quasistationären Bedingungen werden die Russemissionen zu Beginn der Transienten überschätzt. Der Grund dafür liegt darin, dass das Modell bereits unter stationären Bedingungen in den Betriebspunkten um 3 bar  $p_{me}$  bei 1300 U/min die Russemissionen überschätzt.

*Abbildung 68* zeigt eine Lasttransiente von 2.5 – 5 bar  $p_{me}$  bei 1000 U/min.

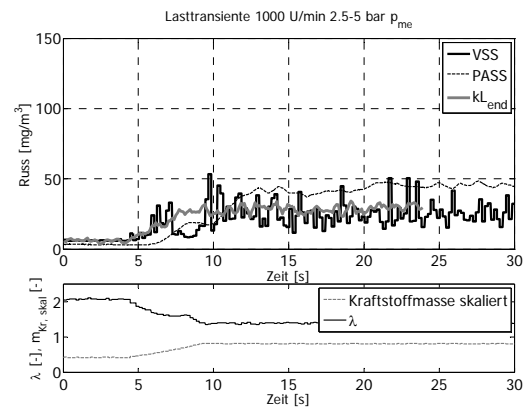
Die Überschätzung des Modells zu Beginn der schnellen Transienten liegt an einer Fehlfunktion des Luftmassenmessers. Die im Steuergerät angegebene Luftmasse liegt kurzzeitig über der realistisch erwarteten Luftmasse (ev. modellbasierte Korrektur möglich). Als Folge fällt die Oxidationstemperatur, berechnet aus dem Zylinderdruck und der Ladungsmasse zu tief aus und verhindert im Modell die Oxidation. Die Unregelmäßigkeiten nach dem Lastwechsel in 0.5 Sekunden stammen von Instabilitäten im Raildruck.



0.5 s



1 s



2 s

5 s

**Abbildung 68: Lasttransiente von 2.5 bis 5 bar  $p_{me}$  bei 1000 U/min innerhalb von 0.5, 1, 2 und 5 Sekunden**

Wie in *Abbildung 69* (Abschnitt 7.6) dargestellt, kann der VSS in eine Emissionsregelung eingebunden werden, indem anstelle des beobachterbasierten PM Signals aus PASS einfach die Schätzung des VSS verwendet wird. Nachfolgend sind Ausschnitte aus dem NEFZ und dem UDDS für die Russregelung ausschliesslich mit dem Signal des VSS gezeigt.

## 7.6. NEFZ

Abbildung 69 zeigt die Performance der Regelung mit dem virtuellen Russensor. Es ist zu beachten, dass das gemessene Signal vom PASS hier in keiner Form im Signal des VSS enthalten ist. Entsprechend erhält die Regelung überhaupt kein Feedback vom PASS.

Da die Sensitivität des Russes auf die EKAS betriebspunktabhängig ist und Querempfindlichkeiten (insbesondere zwischen EKAS, AGR und Drehzahl) im Russmodell nicht implementiert sind, ist die

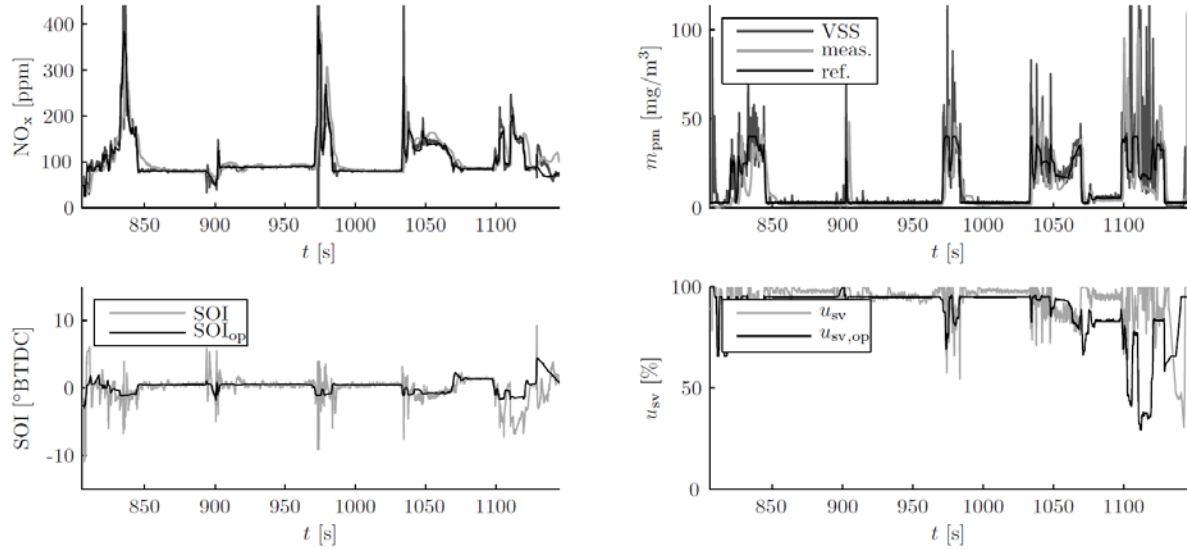


Abbildung 69: Ausserorts-Teil des NEFZ mit Emissionsregelung. Die Russregelung verwendet nur die vom virtuellen Sensor gelieferten Abschätzungen.

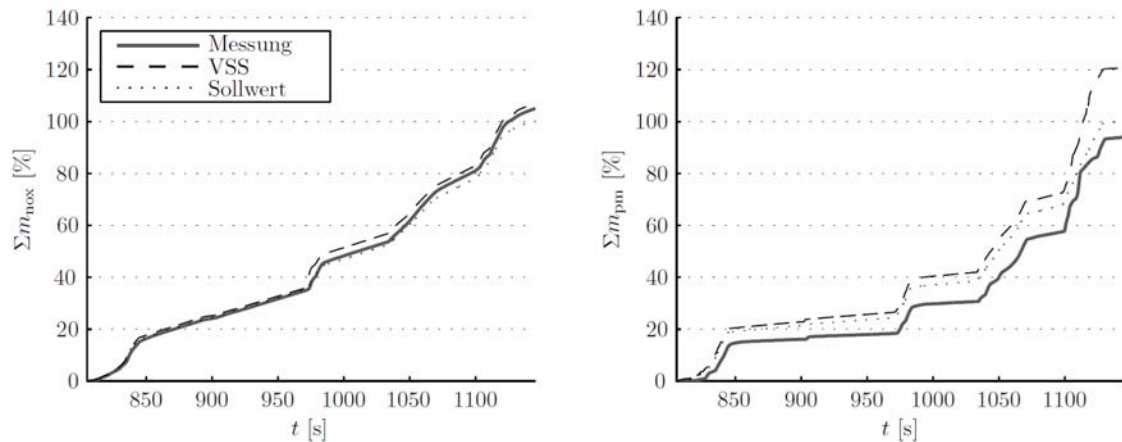
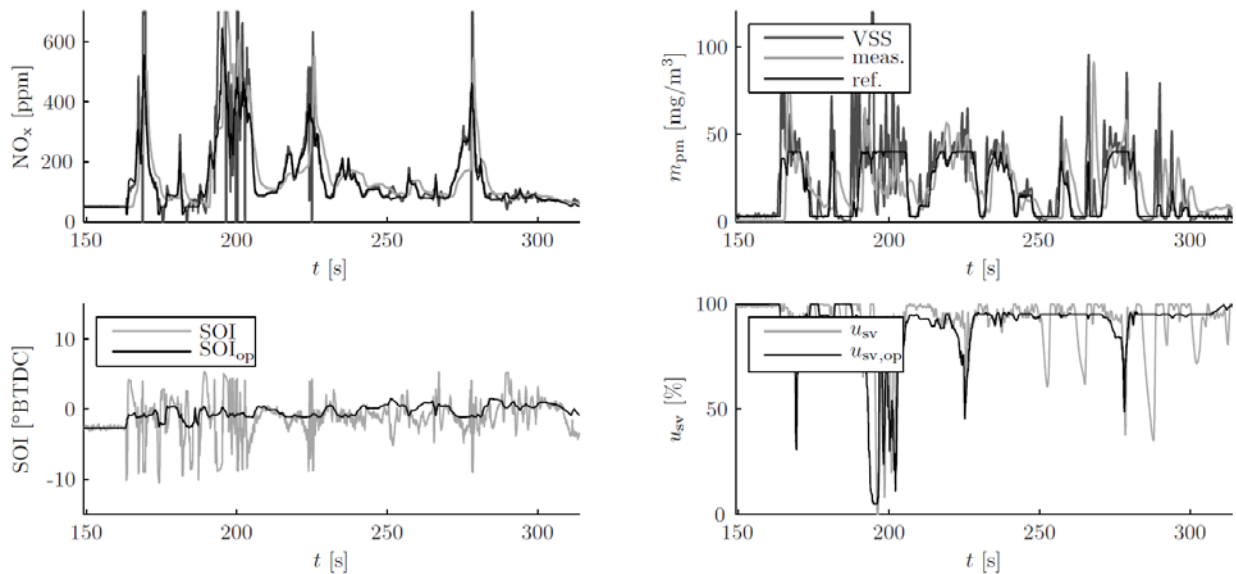


Abbildung 70: Kumulative Emissionen (aus VSS und Messung) und die zugehörigen Sollwerte der Regelung in einem Ausschnitt des NEFZ.

Sensitivität des Russmodells auf die EKAS bei einigen Betriebspunkten zu hoch. Eine zu hohe Sensitivität verhindert zwar, dass bei einer Unterschätzung der Russemissionen die EKAS übermäßig geöffnet wird und die effektiven Emissionen stark erhöht werden, andererseits kann dies aber auch zu hochfrequenter EKAS Aktuierung durch die Regelung führen, wenn deren Parameter nicht auf diesen Spezialfall eingestellt werden.

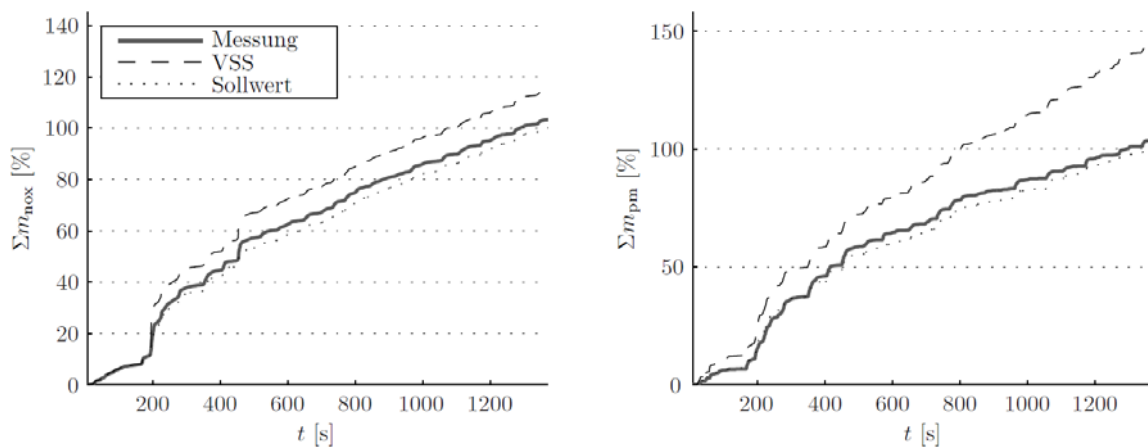
### 7.7. FTP 72 (UDDS)

Auch im transienteren FTP-72 (UDDS) Zyklus konnten mit der VSS-basierten Regelung gute Resultate erzielt werden, wie in *Abbildung 71* gezeigt.



**Abbildung 71:** Ausschnitt aus dem FTP-72 mit VSS-basierter Emissionsregelung.

*Abbildung 72* zeigt die kumulativen Werte, wie sie im kompletten FTP-72 mit VSS-basierter Regelung erreicht wurden. Die kumulativen Sollwerte stimmen dabei gut mit den gemessenen und abgeschätzten Werten überein.



**Abbildung 72:** Kumulative gemessene und abgeschätzte Emissionen sowie ihre Sollwerte im FTP-72. Die abgeschätzten Emissionen stammen aus dem VSS für die Russemissionen und aus dem Beobachter für die  $\text{NO}_x$  Emissionen.

Die tendenzielle Überschätzung der Russemissionen durch den virtuellen Sensor liegt an den Laständerungen aus der Lehlaufrdrehzahl (Anfahren). Die kurzzeitige Last bei sehr tiefer Drehzahl verhindert im Modell die Oxidation und führt zu einem Russ-Peak. Dies könnte mit einer separaten Modellparametrierung unter z.B. 1000 U/min verbessert werden. Die Sollwerte für die Regelstrategie wurden aus der Ursprünglichen Emissionen (Betrieb ohne Regelung) abgeleitet.

### **7.8. FVV Arbeitskreissitzungen „Russgeregelter Dieselmotor“**

Die Arbeitskreissitzungen des FVV Projektes „Russgeregelter Dieselmotor“ fanden am 12.02.2009, am 15.09.2009, am 30. 03. 2010 in Frankfurt a.M., am 12. 10. 2010 in Zürich, am 29. 03. 2011 in Frankfurt a. M. und am 20. 09. 2011 in Zürich statt. Die 7. Arbeitskreissitzung findet am 7. 02. 2012 in Frankfurt statt.

Präsentationen und Protokolle sind auf Anfrage bei Frau Pleyer ([pleyer@fvv-net.de](mailto:pleyer@fvv-net.de)) erhältlich

### **7.9. Erreichte Ziele**

- Das Mittelwertmodell wurde nach Änderung des Motors parametrieren. Dies führte zu guten Ergebnissen unter Berücksichtigung sehr geringer Russemissionen.
- Die Leistung des Mittelwertmodells konnte mit Hilfe zusätzlicher aus dem Druckverlauf gewonnenen Informationen erhöht werden.
- Optische Messungen konnten genutzt werden um das phänomenologische Verhalten des Modelles weiter zu verbessern.
- Das transiente Verhalten des Modelles konnte untersucht werden.
- Emissionsgeregelte Fahrzyklen konnten unter Verwendung des virtuellen Russensors gefahren und gezeigt werden
- Die Ziele dieses Arbeitspaketes wurden vollumfänglich erreicht

### **7.10. Publikationen**

Siehe Kapitel 9.1

## 8. Work package 5: Numerical Simulation of NO<sub>x</sub> reduction in an NH<sub>3</sub>-SCR system

### 8.1. Scope of activities

A numerical tool has been successfully developed to simulate one representative channel of an SCR converter. NO<sub>x</sub> reduction in an ammonia SCR system over a Fe-Zeolite catalyst has been simulated by the developed 1D+1D model for the catalytic converter. The successful validation of the model by the experimental data obtained from the Paul Scherer Institute (PSI) [1] for dynamic operation of the SCR system representative of automotive Diesel engine operation and transient system responses reaching steady state concluded that the model constitutes a robust and comprehensive tool for simulation of the SCR system for automotive applications. A wide range of conditions has been numerically and experimentally studied and subsequently submitted for publication in [2-4]. A doctoral dissertation of ETH [5] has been also resulted by the achievements.

#### 8.1.1. Numerical model

The model accounts for 1D convective mass transfer through the channel and 1D diffusion within the catalytically washcoated wall, which are coupled via a mass transfer boundary condition at the wall. Several surface reactions have been considered in the layer according to the model of [6] and the related parameters have been calibrated according to experimental data for a Fe-BEA zeolite catalyst [1].

In a first step, the ammonia adsorption/desorption has been studied in great detail. The ammonia adsorption capacity of the catalyst and four rate parameters including the desorption activation energy have been determined in a calibration procedure based on the available experimental data. The adsorption capacity of the catalyst decreases when the temperature increases as is shown in Figure 1, which is also in agreement with findings which have previously been reported in the literature.

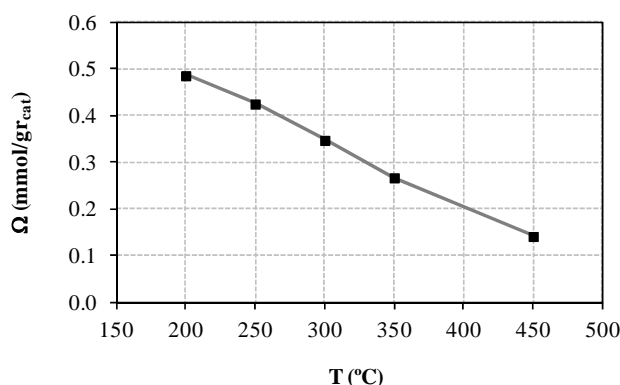


Figure 1. Ammonia adsorption capacity

Findings reported in [7] allowed for detailed modelling of the SCR reactions comprising a total of 10 reactions describing NH<sub>3</sub> adsorption/desorption/spill-over, NO<sub>x</sub> reduction and oxidation of components as well as production of some minor species, cf. Table 1. The kinetics considering dual-site on the catalytic surface with finite rate for the ammonia spill-over reaction produced the best prediction for the transient, steady state and ammonia inhibition effect, and has been selected to simulate the system.

Table 1. Comprehensive mechanism for SCR surface reactions [7]

1,2	Ammonia ads/desorption	$\text{NH}_3 \leftrightarrow \text{NH}_3^*$
3	Standard SCR	$4 \text{NH}_3^* + 4 \text{NO} + \text{O}_2 \rightarrow 4 \text{N}_2 + 6 \text{H}_2\text{O}$
4	Fast SCR	$4 \text{NH}_3^* + 2 \text{NO} + 2 \text{NO}_2 \rightarrow 4 \text{N}_2 + 6 \text{H}_2\text{O}$
5	Ammonia spill-over	$\text{NH}_3^* \leftrightarrow \text{NH}_3\text{X}$
6	NO oxidation	$2 \text{NO} + \text{O}_2 \rightarrow 2 \text{NO}_2$
7	Ammonia oxidation	$4 \text{NH}_3^* + 3 \text{O}_2 \rightarrow 2 \text{N}_2 + 6 \text{H}_2\text{O}$
8	Direct NO <sub>2</sub> reduction	$2 \text{NH}_3^* + 3/2 \text{NO}_2 \rightarrow 7/4 \text{N}_2 + 3 \text{H}_2\text{O}$
9	Ammonium nitrate formation	$2 \text{NH}_3^* + 2 \text{NO}_2 \rightarrow \text{NH}_4\text{NO}_3 + \text{N}_2 + \text{H}_2\text{O}$
10	Nitrous oxide formation	$2 \text{NH}_3^* + 2 \text{NO}_2 \rightarrow \text{N}_2\text{O} + \text{N}_2 + 3 \text{H}_2\text{O}$

### 8.1.2. Transient simulation and steady state

The validation of the model is presented in 90 different operating conditions for slow transient responses of the system. The transient evolution of the conversion following step feeds of ammonia is studied for three NO/NO<sub>x</sub> ratios of 100%, 75% and 50% up to steady state. Ammonia is fed stepwise at three different dosage ratios of  $\alpha = 0.8, 1.0, 1.2$  with respect to the optimum dosage  $\alpha_{OD}$ , resulting in 10 ppm ammonia slip.

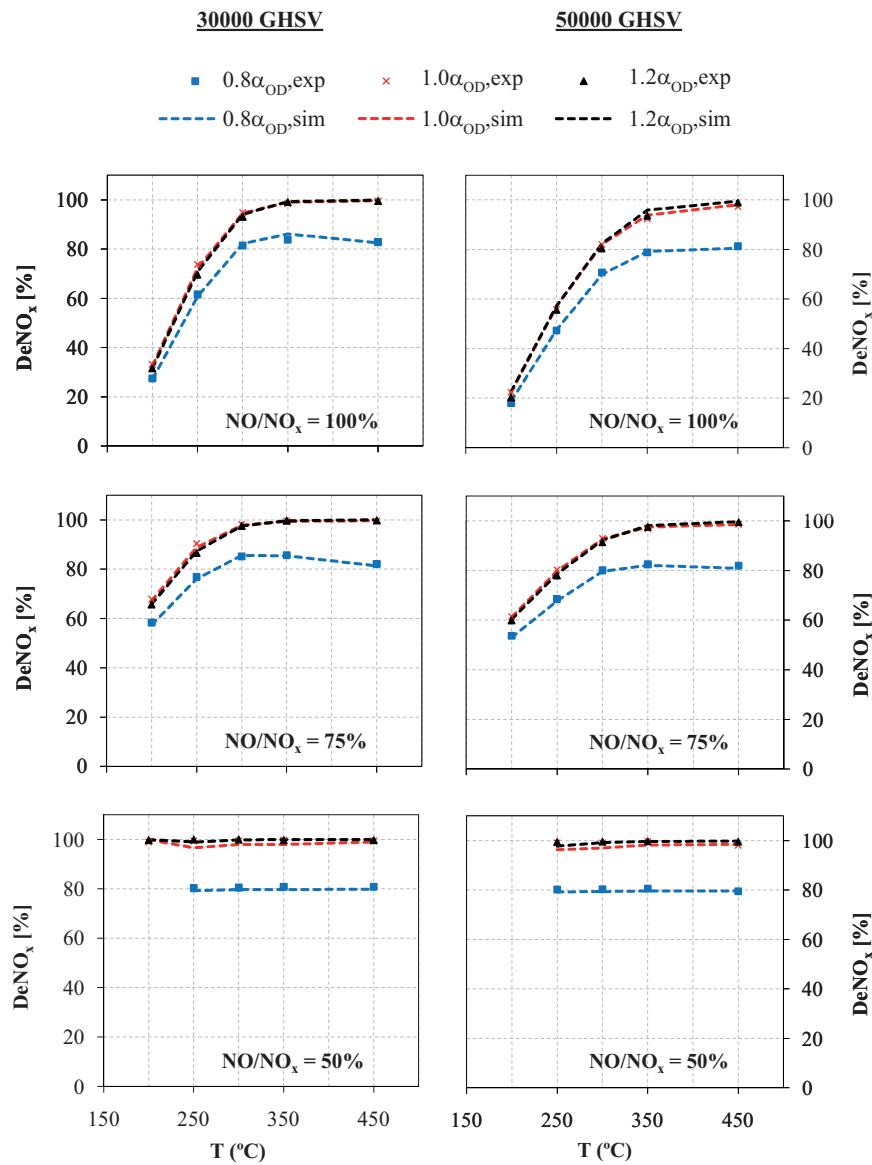


Figure 2. NO<sub>x</sub> reduction at different temperatures as well as different NO/NO<sub>x</sub> and NH<sub>3</sub>/NO<sub>x</sub> = 0.8, 1.0, 1.2 times of the optimum dosage ( $\alpha_{OD}$  for 10 ppm ammonia slip), Left: GHSV=30,000 h<sup>-1</sup>, Right: GHSV=50,000 h<sup>-1</sup>.

Figure 2. (left) illustrates the NO<sub>x</sub> reduction efficiency of the system at low space velocity (GHSV = 30,000 h<sup>-1</sup>) for different NO/NO<sub>x</sub> ratios and different ammonia inlet concentrations. The numerical results at steady state are compared to experimental data and indicated that the model is accurate concerning the steady state NO<sub>x</sub> reduction of the system at different temperatures and feed ratios. At low temperature, the presence of NO<sub>2</sub> significantly improves the NO<sub>x</sub> reduction efficiency due to the Fast SCR reaction. However, at high temperature Standard SCR is active enough to reduce all the NO<sub>x</sub> in the system and the effect of Fast SCR is negligible. Increasing the inlet ammonia concentration to reach the optimum dosage ratio enhances the NO<sub>x</sub> reduction efficiency while feeding more ammonia than optimum dosage does not change the NO<sub>x</sub> conversion in the system. The NO<sub>x</sub> reduction efficiency slightly decreases at high temperature (450 °C). This can happen at high temperature condition because of shorter residence time and the fact that the rate of ammonia desorption is higher than that of ammonia adsorption; therefore, the surface coverage of ammonia decreases and the NO<sub>x</sub> reduction drops.

The operation of the system at the higher space velocity (GHSV = 50,000 h<sup>-1</sup>) is also examined and the results are presented in Figure 2. (right). NO<sub>x</sub> reduction is correctly calculated by the model not only at low but also at high space velocity. Due to the shorter residence time at higher space velocities, NO<sub>x</sub> conversion is lower than for slow gas flow. The influence of the space velocity on NO<sub>x</sub> reduction is most obvious for suboptimal reaction conditions, such as low temperatures without NO<sub>2</sub> in the feed. When there is enough NO<sub>2</sub> in the system to convert all NO<sub>x</sub> by the Fast SCR reaction or at high temperature, NO<sub>x</sub> conversion is fast and not affected by the GHSV.

An inhibition effect on the SCR performance is observed over the Fe-Zeolite catalyst in the presence of ammonia. This effect is more obvious at low temperatures and without NO<sub>2</sub> in the feed when the major reaction is Standard SCR. Figure 3 (upper) exemplarily shows the transient operation of the system at low temperature of 200 °C with 100% NO in the feed. The simulation predicts well the transient response of the system including the ammonia inhibition effect as well as the steady state NO<sub>x</sub> conversion of the system. Lower part of Figure 3 shows the NO<sub>x</sub> reduction at high temperature (450 °C) with 100% NO in the feed. The Standard SCR reaction is fast enough to remove NO<sub>x</sub> from the feed and there is no inhibition effect at this high temperature.

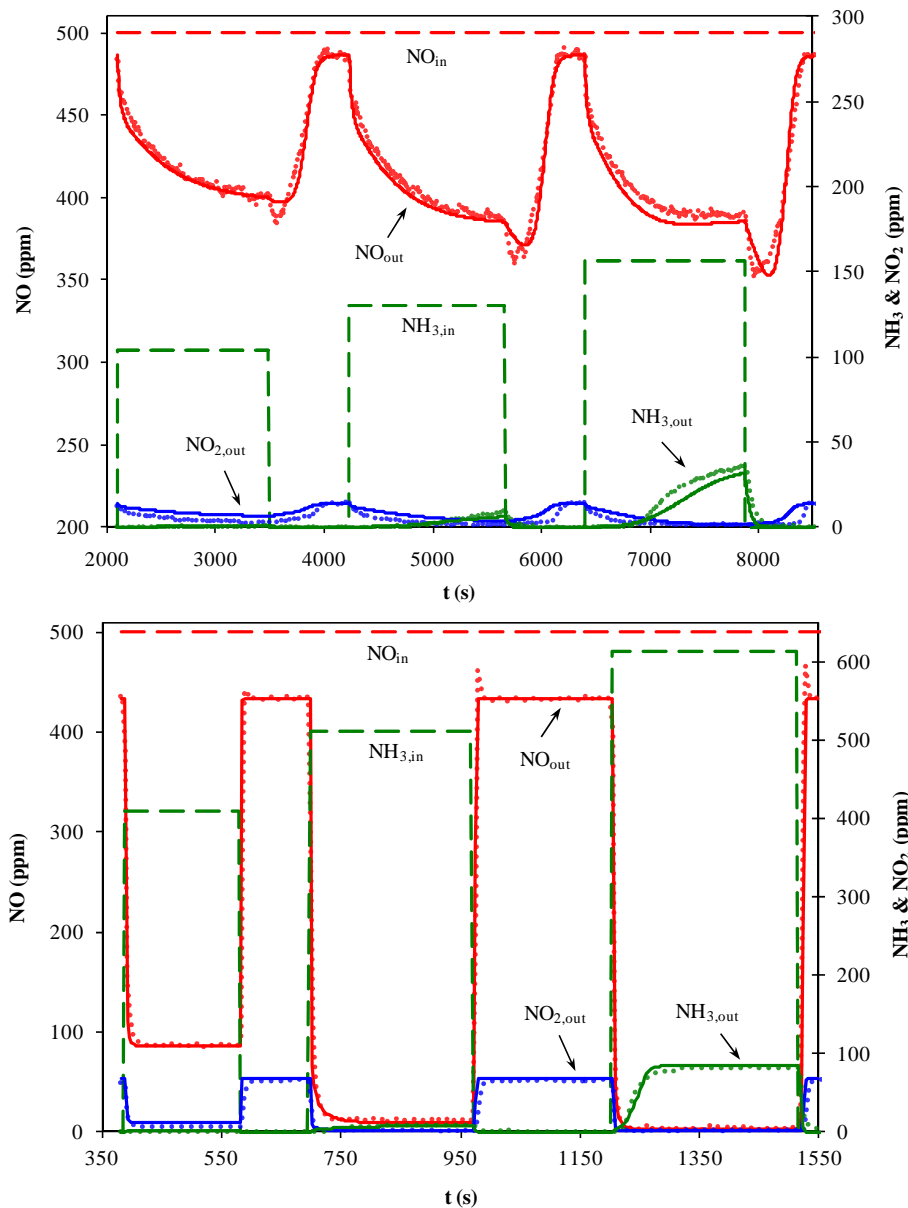


Figure 3. Transient operation at GHSV = 50,000 h<sup>-1</sup>, 200 °C (upper) 450 °C (lower), 500 ppm NO<sub>x</sub>, NO/NO<sub>x</sub> = 100%, NH<sub>3</sub>/NO<sub>x</sub> = (0.8, 1.0, 1.2) times of the optimum dosage ( $\alpha_{OD}$  for 10 ppm ammonia slip), Symbols: experiment, line: simulation, dashed line: inlet, red: NO, blue: NO<sub>2</sub>, green: NH<sub>3</sub>.

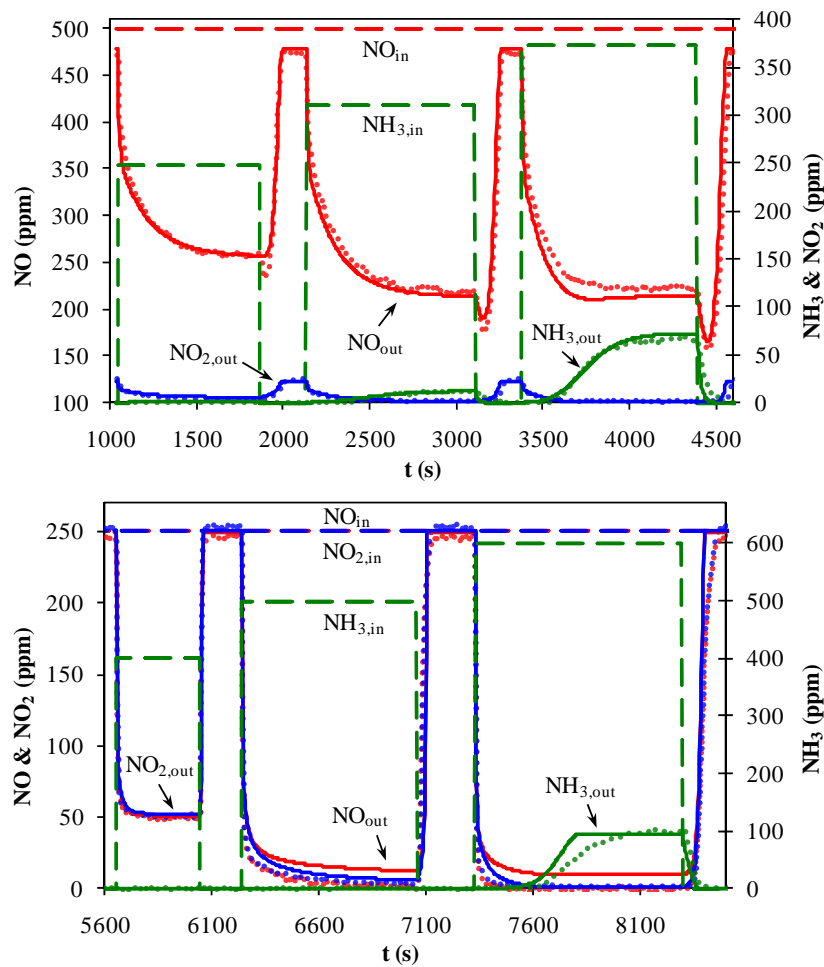


Figure 4. Transient operation at GHSV = 50,000 h<sup>-1</sup>, 250 °C, 500 ppm NO<sub>x</sub>, NO/NO<sub>x</sub> = 100% (upper), 50% (lower), NH<sub>3</sub>/NO<sub>x</sub> = (0.8, 1.0, 1.2) times of the optimum dosage ( $\alpha_{OD}$  for 10 ppm ammonia slip), Symbols: experiment, line: simulation, dashed line: inlet, red: NO, blue: NO<sub>2</sub>, green: NH<sub>3</sub>.

Figure 4 illustrates the influence of the NO/NO<sub>x</sub> ratio including Fast SCR conditions at low temperature (250 °C). This temperature is not high enough to reduce NO<sub>x</sub> only with Standard SCR, observable from the only 50% NO<sub>x</sub> conversion for the case with 100% NO in the feed. Ammonia inhibition is also observed under this condition. Feeding of NO<sub>2</sub> enables the Fast SCR reaction and increases the NO<sub>x</sub> conversion level to 100% for equal shares of NO and NO<sub>2</sub> in the feed.

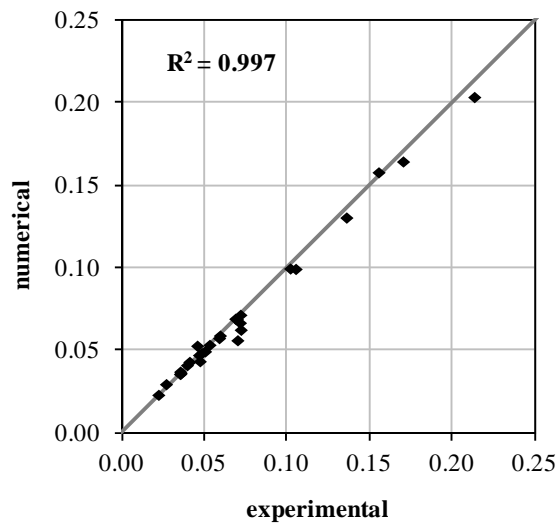


Figure 5. Cumulative NO<sub>x</sub> (g) after reaching the steady state at 200, 250, 300, 350, 450 °C with NO/NO<sub>x</sub> = 100, 75, 50 % at GHSV = 50,000 and 30,000 h<sup>-1</sup>.

To check the accuracy of the model for different SCR operating conditions, the cumulative  $\text{NO}_x$  mass is calculated for each condition during transient operation and compared to measured data. Figure 5 compares the results for all 30 different cases investigated, i.e. two different GHSV, three  $\text{NO}/\text{NO}_x$  ratios and five temperatures. Each case includes three dosages of ammonia, (0.8, 1.0, 1.2) times  $\alpha_{\text{OD}}$ , during the transient operation. The coefficient of determination  $R^2$  is 0.997 and confirms the very good accuracy of simulation. The results for the simulation of the all 90 transient cases are presented in the appendix.

### 8.1.3. Highly transient performance

While excellent steady conversion is predicted over a broad range of temperatures,  $\text{NO}/\text{NO}_x$  ratios and velocities, it is shown that ammonia inhibition has a strong effect on the dynamic behaviour of the system at low temperature. Here, the developed model, has hence been assessed specifically with respect to its predictive performance at highly transient conditions representative of automotive Diesel engine operation.

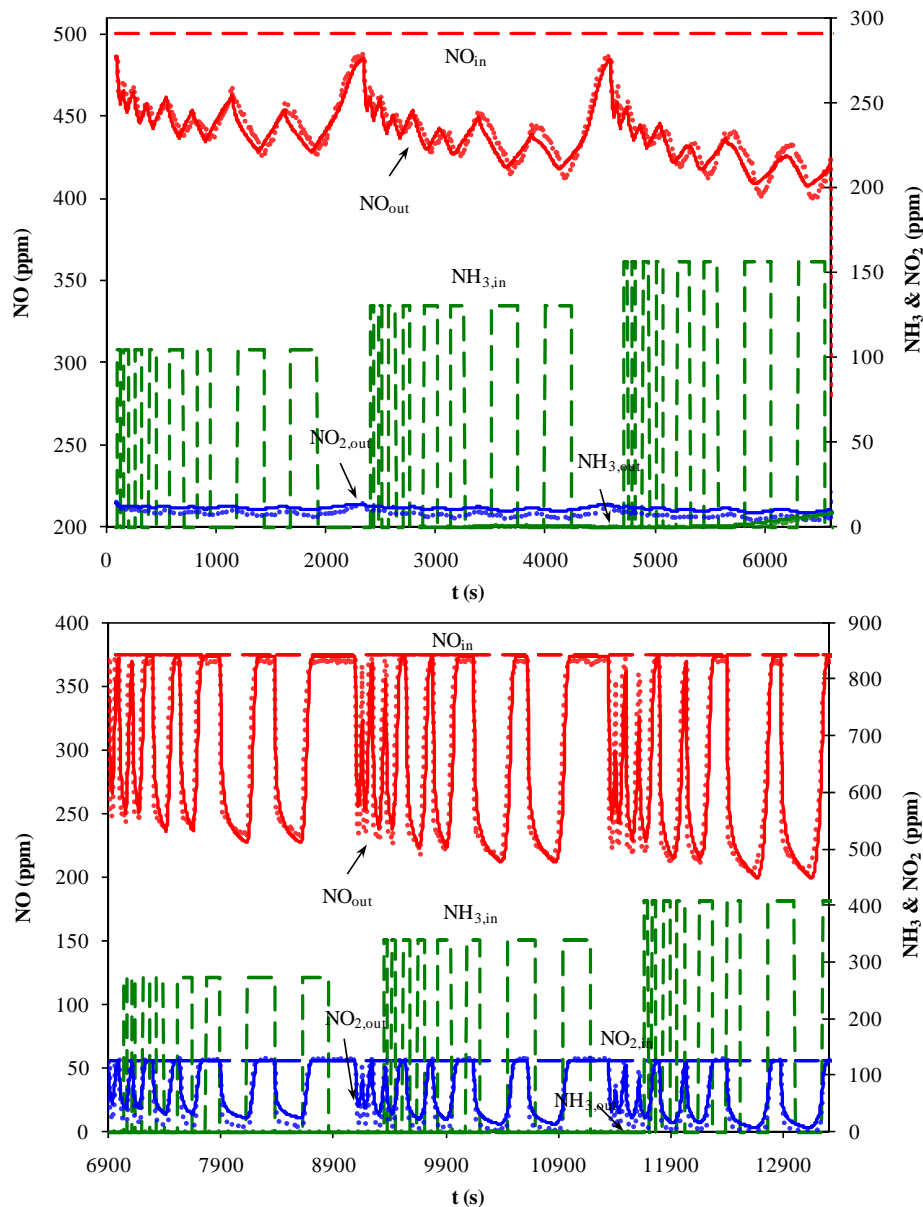


Figure 6. Comparison of predicted and experimental system response at dynamic SCR operation: GHSV =  $50,000 \text{ h}^{-1}$ ,  $200 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\text{NO}/\text{NO}_x = 100\%$  (upper) and  $75\%$  (lower), for three ammonia dosage ratios  $\alpha = 0.8, 1.0, 1.2$  (with respect to the optimum dosage  $\alpha_{\text{OD}}$ , resulting in 10 ppm slip). Symbols: experiment, lines: simulation, dashed line: inlet, red: NO, blue:  $\text{NO}_2$ , green:  $\text{NH}_3$ .

The modelled dynamic response of the system at 200 °C is presented in Figure 6. NO<sub>x</sub> reduction was highly transient at this temperature especially for 100% NO in the feed (upper), however the conversion increased by adding 25% NO<sub>2</sub> to the system (lower). The presence of NO<sub>2</sub> and consequently running the Fast SCR speed up the DeNO<sub>x</sub> process and the outlet concentrations were approaching steady conversion as observed for slow transient operation, in particular for the longer ammonia pulses, however with considerable delay.

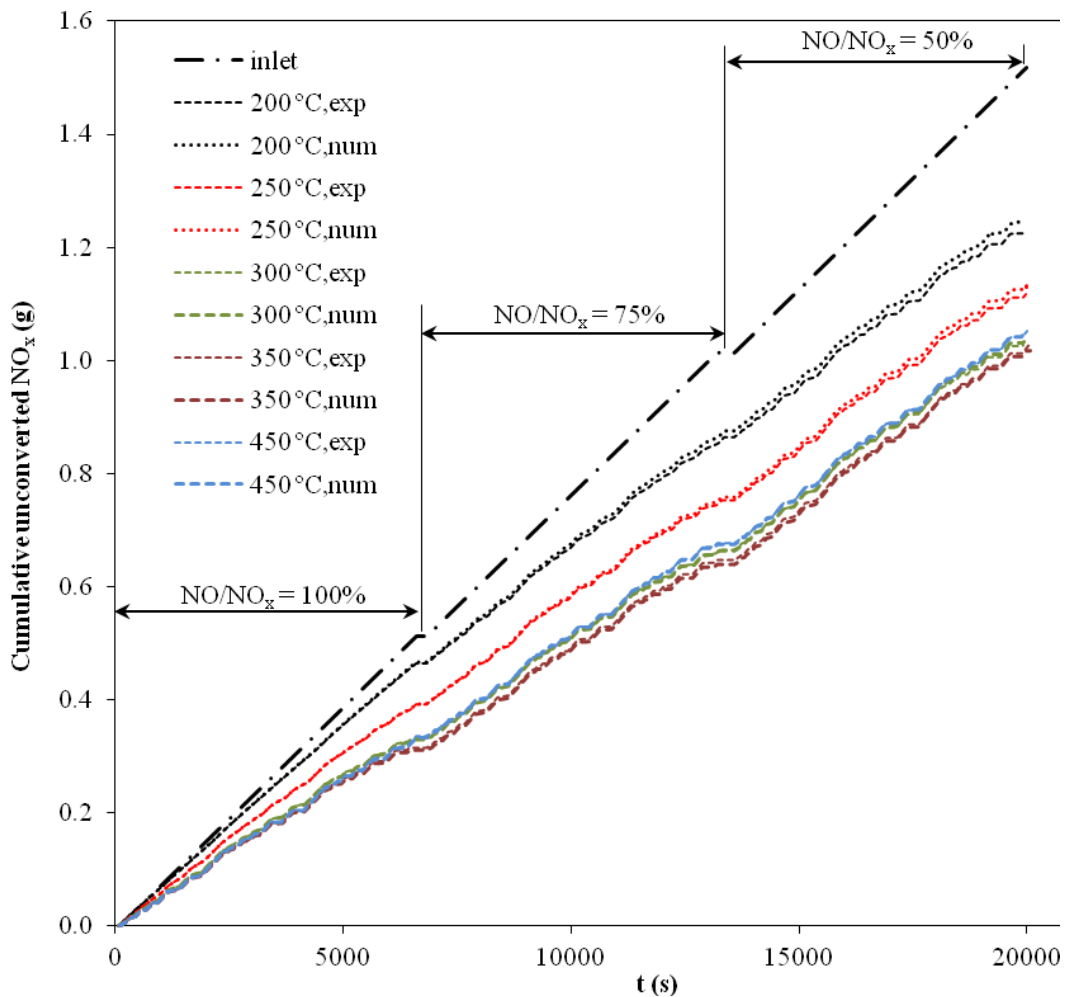


Figure 7. Predicted and experimental evolution of cumulated NO<sub>x</sub> during 20,000 s of fast transient SCR operation at five different temperatures and three ratios of NO/NO<sub>x</sub> (50%, 75% and 100%) for a GHSV = 50,000 h<sup>-1</sup>.

To investigate the performance of NO<sub>x</sub> reduction under dynamic operation and verify the simulation results, the cumulative mass of the outlet NO<sub>x</sub> was calculated for all five temperatures over 20,000 s of dynamic operation with different ratios of NO<sub>in</sub>/NO<sub>x,in</sub> and varying dosage of ammonia. The NO<sub>x</sub> reduction in the system is illustrated as the difference between the cumulative NO<sub>x</sub> at the inlet and outlet of the system in Figure 7. Increasing the temperature enhanced the DeNO<sub>x</sub> performance, which was highest at 350 °C. A further increase in temperature, however, led to a reduction in the DeNO<sub>x</sub> performance which is generally observed in SCR systems.

Figure 8 (left) presents the outlet cumulative NO<sub>x</sub> versus temperatures after 20,000 s of dynamic run for all 90 operating conditions (two space velocities, three NO<sub>2,in</sub>/NO<sub>x,in</sub> ratios, three dosages of ammonia and five temperatures). Excellent predictions can be seen for both space velocities at all temperatures providing strong evidence for the validity of the developed model and the chemistry utilised as well as the parameterisation. NO<sub>x</sub> reduction was more efficient at low space velocity due to longer residence time, while the trends of the system response were similar at both space velocities. Ammonia slip is a critical issue in SCR systems, which requires careful control of the amount of urea, which is injected upstream of the converter as the source of ammonia. Figure 8 (right) depicts the cumulative ammonia slip after 20,000 s of dynamic operation for all 90 different conditions, as listed above, as a function of temperature. The left axis shows the cumulative mass, while the right axis presents the ra-

tion of cumulative ammonia slip and total inlet ammonia. The predicted ammonia slip agreed well with the experimental data.

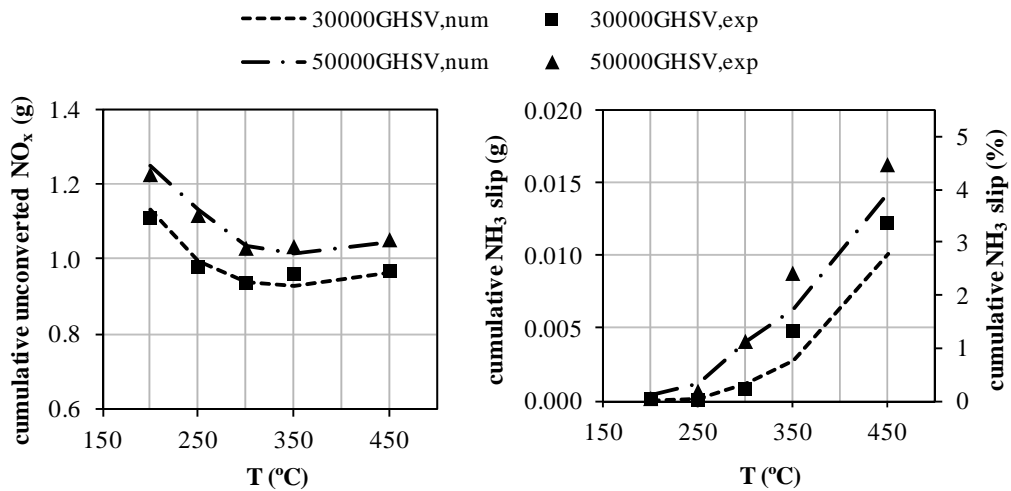


Figure 8. Cumulative NO<sub>x</sub> (left) and ammonia slips (right) after 20,000 s of fast transient operation for different ratios of NO/NO<sub>x</sub> at different temperatures and space velocities.

#### 8.1.4. Non-isothermal operation

Non-isothermal simulation is necessary to investigate the performance of an SCR system, since the system mainly operates in transient non-isothermal conditions. The transient response of the system to the temperature steps in the feed is predicted by a heat transfer model coupled to the reaction kinetics.

As illustrated in Figure 9, the inlet temperature and concentrations and the numerical results are compared with measurements at the outlet. Inlet temperature is ramped from 200 to 450 °C and inlet ammonia is increased corresponding to the optimum dosage of ammonia for 10 ppm slip which is the same as the dosage for the system in steady state. Ammonia adsorption capacity of the catalyst decreases by increasing the temperature, therefore ammonia desorbs from the surface. In the contrary, rate of NO<sub>x</sub> reduction increases in high temperature and consequently more ammonia is consumed in the system. In parallel of these two opposite effects, ammonia dosage increases in the inlet to provide enough ammonia for reduction at high temperature. While the ammonia feed is increased, amplification of the ammonia and the two other facts result the ammonia slip rise and after that the outlet ammonia decreases. NO conversion is monotonously increases by increasing the temperature. NO<sub>x</sub> reduction in the non-isothermal condition is predicted well by numerical simulation.

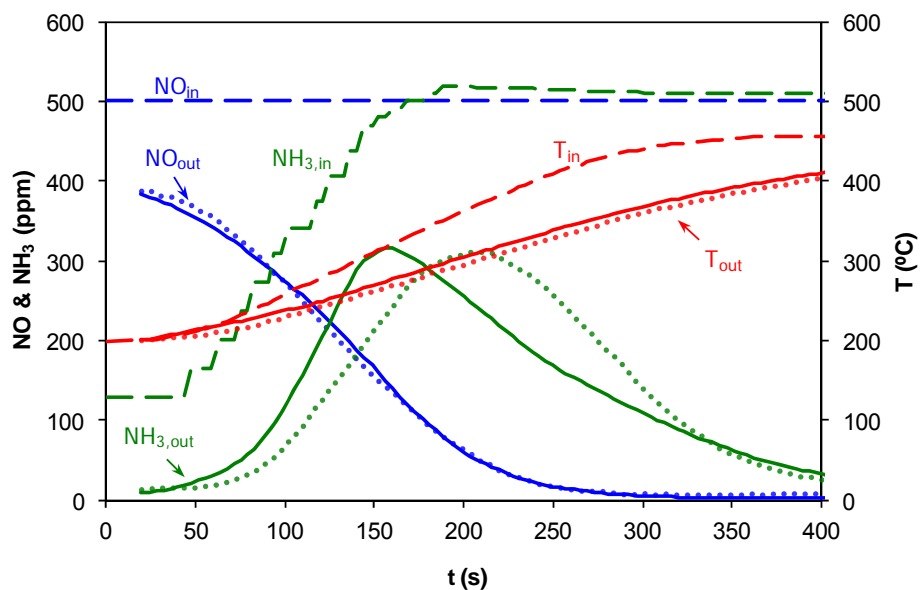


Figure 9. Comparison of predicted and experimental system response to the inlet temperature step at GHSV = 50,000 h<sup>-1</sup>, NO/NO<sub>x</sub> = 100% and optimum ammonia dosage (resulting in 10 ppm slip). Symbols: experiment, lines: simulation, dashed line: inlet, red: temperature, blue: NO, green: NH<sub>3</sub>.

## 8.2. Main results achieved

- Excellent agreement between the predicted responses of the system and measured data in all 180 cases for steady states and during the transitions including effects due to ammonia inhibition.
- Propose an accurate method for parameterization of the chemical kinetics in a broad range of Diesel operating conditions.
- Development of a reliable model for predicting an SCR system under the highly transient conditions representative of automotive Diesel engine operation.
- Accepted article about the proposed calibration method, following the publication in IMECE2010-40431 [2], and simulation of the fast transient condition to international journal of engine research (IJER) [4].
- Transient simulation of NO<sub>x</sub> reduction under non-isothermal conditions, poster presented in MODEGAT II international symposium in Sep 2011 [8].
- Successful Ph.D. project titled by "Simulation of NO<sub>x</sub> reduction over a Fe-Zeolite catalyst in an NH<sub>3</sub>-SCR system and calibration of the related parameters", published as ETH doctoral dissertation [5] defended in 1.Jun. 2011.
- Successful publication of the simulation results under slow transient condition and steady state in SAE 2011-01-2084, JSAE20119195 [3].
- Successful publication of the calibration procedure and simulation of transient operation and steady state in IMECE2010-40431 [2]
- Starting up the follow-up project (CCEM-NADiP) for simulation of urea spray and ammonia formation upstream of the SCR catalyst.

## 8.3. Activities within the project (seminars, workshops etc.)

- CCEM-NEADS Workshop, 11.12.2007, EMPA Dübendorf
- CCEM-NEADS Workshop, 4.11.2008, ETH Zürich
- LAV Scientific Seminar Series, 28.04.2009, ETH Zürich
- CCEM-NEADS Workshop, 7.07.2009, PSI, Würenlingen
- LAV Scientific Seminar Series, 9.06.2010, ETH Zürich
- CCEM-NEADS final meeting, 18.06.2010, EMPA Dübendorf
- CCEM-NADiP kick-off meeting, 18.06.2010, EMPA Dübendorf
- Ph.D. doctoral examination of D-MAVT, 1.06.2011, ETH Zürich
- CCEM-NADiP workshop, 21.10.2011, PSI, Villigen.

## 8.4. References

- [1] Elsener, M., and Kröcher, O., 2009, "Parametrisierung Fe-Zeolith," Paul Scherrer Institute (PSI), Switzerland.
- [2] Sharifian, L., Wright, Y. M., Boulouchos, K., Elsener, M., and Kröcher, O., 2010, "Simulation of NO<sub>x</sub> Reduction in an Ammonia-SCR System with an Fe-Zeolite Catalyst and Calibration of Related Parameters," ASME Conference Publications IMECE2010-40431.
- [3] Sharifian, L., Wright, Y. M., Boulouchos, K., Elsener, M., and Kröcher, O., SAE2011-01-2084, JSAE20119195, 2012, "Transient simulation of NO<sub>x</sub> reduction over a Fe-Zeolite catalyst in an NH<sub>3</sub>-SCR system and study of the performance under different operating conditions," SAE Int. J. Fuels Lubr., 5(1), pp. 370-379.
- [4] Sharifian, L., Wright, Y. M., Boulouchos, K., Elsener, M., and Kröcher, O., 2011, "Calibration of a model for the selective catalytic reduction with ammonia including NO oxidation and simulation of NO<sub>x</sub> reduction over an Fe-zeolite catalyst under highly transient conditions," International Journal of Engine Research, accepted.
- [5] Sharifian, L., 2011, "Simulation of NO<sub>x</sub> reduction over a Fe-Zeolite catalyst in an NH<sub>3</sub>-SCR system and calibration of the related parameters," ETH Doctoral Thesis, DISS. ETH NO. 19736.

- [6] Tronconi, E., Nova, I., Ciardelli, C., Chatterjee, D., and Weibel, M., 2007, "Redox features in the catalytic mechanism of the "standard" and "fast" NH<sub>3</sub>-SCR of NO<sub>x</sub> over a V-based catalyst investigated by dynamic methods," *Journal of Catalysis*, 245(1), pp. 1-10.
- [7] Chatterjee, D., Koci, P., Schmeißer, V., Marek, M., Weibel, M., and Krutzsch, B., 2010, "Modelling of a combined NO<sub>x</sub> storage and NH<sub>3</sub>-SCR catalytic system for Diesel exhaust gas aftertreatment," *Catalysis Today*, 151(3-4), pp. 395-409.
- [8] Sharifian, L., Wright, Y. M., Boulouchos, K., Elsener, M., and Kröcher, O., 2011, "Transient simulation of NO<sub>x</sub> reduction over a Fe-Zeolite catalyst in an NH<sub>3</sub>-SCR system under non-isothermal operating conditions," *International Symposium on Modeling of Exhaust-Gas After-Treatment (MODEGAT II)*, Bad Herrenalb/ Karlsruhe, Germany.

## 9. Publikationen

### 9.1. Arbeitspaket 4: Russgeregelter Dieselmotor

- ❖ Nanoparticle Conference
  - 2008: Measurement and Analysis of Soot Emissions During Transient Operation of a Common Rail Passenger Car Diesel Engine, P. Kirchen
  - 2009: Investigation of In-Cylinder Soot Formation and Oxidation during Transient Engine Operation, P. Kirchen
  - 2010: Comparison of Soot Measurement Instruments during Transient and Steady State Operation, C. Barro
  - 2011: Development and Evaluation of an Optical in-cylinder Soot Measurement Method, C. Barro
- ❖ FVV Herbsttagung 2010
  - Band Nr. R551, pp. 195-218, Russgeregelter Dieselmotor, F. Tschanz, C. Barro
- ❖ Stuttgarter Motorensymposium 2011
  - Concepts for on-line simulation and feedback control of pollutant emissions from Diesel engines F. Tschanz, C. Barro
- ❖ Dieselmotorensymposium Esslingen 2011
  - Erkenntnisse zu Russbildung und – oxidation unter Verwendung von Vor- und Nacheinspritzung in einem Dieselmotor mittels 3-Farbenpyrometrie, C. Barro

### 9.2. Arbeitspaket 5: Numerical Simulation of NO<sub>x</sub> reduction in an NH<sub>3</sub>-SCR system

- Sharifian, L., Wright, Y. M., Boulouchos, K., Elsener, M., and Kröcher, O., 2011, "Calibration of a model for the selective catalytic reduction with ammonia including NO oxidation and simulation of NO<sub>x</sub> reduction over an Fe-zeolite catalyst under highly transient conditions," *International Journal of Engine Research*, doi: 10.1177/1468087412437825.
- Sharifian, L., Wright, Y. M., Boulouchos, K., Elsener, M., and Kröcher, O., SAE2011-01-2084, JSAE20119195, 2012, "Transient simulation of NO<sub>x</sub> reduction over a Fe-Zeolite catalyst in an NH<sub>3</sub>-SCR system and study of the performance under different operating conditions," *SAE Int. J. Fuels Lubr.*, 5(1), pp. 370-379.
- Sharifian, L., Wright, Y. M., Boulouchos, K., Elsener, M., and Kröcher, O., 2011, "Transient simulation of NO<sub>x</sub> reduction over a Fe-Zeolite catalyst in an NH<sub>3</sub>-SCR system under non-isothermal operating conditions," *International Symposium on Modeling of Exhaust-Gas After-Treatment (MODEGAT II)*, Bad Herrenalb/ Karlsruhe, Germany.
- Sharifian, L., 2011, "Simulation of NO<sub>x</sub> reduction over a Fe-Zeolite catalyst in an NH<sub>3</sub>-SCR system and calibration of the related parameters," *ETH Doctoral Thesis, DISS. ETH NO. 19736.*

- Sharifian, L., Wright, Y. M., Boulouchos, K., Elsener, M., and Kröcher, O., 2010, "Simulation of NO<sub>x</sub> Reduction in an Ammonia-SCR System with an Fe-Zeolite Catalyst and Calibration of Related Parameters," ASME Conference Publications IMECE2010-40431.