

Wissenschaftliche Reihe  
Fahrzeugtechnik Universität Stuttgart

RESEARCH

Nikolaus Held

# Zylinderdruckbasierte Regelkonzepte für Sonderbrennverfahren bei Pkw-Dieselmotoren



 Springer Vieweg

The Springer Vieweg logo features a stylized chess knight icon to the left of the text 'Springer Vieweg'.

---

# **Wissenschaftliche Reihe Fahrzeugtechnik Universität Stuttgart**

## **Herausgegeben von**

M. Bargende, Stuttgart, Deutschland

H.-C. Reuss, Stuttgart, Deutschland

J. Wiedemann, Stuttgart, Deutschland

Das Institut für Verbrennungsmotoren und Kraftfahrwesen (IVK) an der Universität Stuttgart erforscht, entwickelt, appliziert und erprobt, in enger Zusammenarbeit mit der Industrie, Elemente bzw. Technologien aus dem Bereich moderner Fahrzeugkonzepte. Das Institut gliedert sich in die drei Bereiche Kraftfahrwesen, Fahrzeugantriebe und Kraftfahrzeug-Mechatronik. Aufgabe dieser Bereiche ist die Ausarbeitung des Themengebietes im Prüfstandsbetrieb, in Theorie und Simulation.

Schwerpunkte des Kraftfahrwesens sind hierbei die Aerodynamik, Akustik (NVH), Fahrdynamik und Fahrermodellierung, Leichtbau, Sicherheit, Kraftübertragung sowie Energie und Thermomanagement – auch in Verbindung mit hybriden und batterieelektrischen Fahrzeugkonzepten.

Der Bereich Fahrzeugantriebe widmet sich den Themen Brennverfahrensentwicklung einschließlich Regelungs- und Steuerungskonzeptionen bei zugleich minimierten Emissionen, komplexe Abgasnachbehandlung, Aufladesysteme und -strategien, Hybridsysteme und Betriebsstrategien sowie mechanisch-akustischen Fragestellungen.

Themen der Kraftfahrzeug-Mechatronik sind die Antriebsstrangregelung/Hybride, Elektromobilität, Bordnetz und Energiemanagement, Funktions- und Softwareentwicklung sowie Test und Diagnose.

Die Erfüllung dieser Aufgaben wird prüfstandsseitig neben vielem anderen unterstützt durch 19 Motorenprüfstände, zwei Rollenprüfstände, einen 1:1-Fahrsimulator, einen Antriebsstrangprüfstand, einen Thermowindkanal sowie einen 1:1-Aeroakustikwindkanal.

Die wissenschaftliche Reihe „Fahrzeugtechnik Universität Stuttgart“ präsentiert über die am Institut entstandenen Promotionen die hervorragenden Arbeitsergebnisse der Forschungstätigkeiten am IVK.

**Herausgegeben von**

Prof. Dr.-Ing. Michael Bargende  
Lehrstuhl Fahrzeugantriebe,  
Institut für Verbrennungsmotoren und  
Kraftfahrwesen, Universität Stuttgart  
Stuttgart, Deutschland

Prof. Dr.-Ing. Jochen Wiedemann  
Lehrstuhl Kraftfahrwesen,  
Institut für Verbrennungsmotoren und  
Kraftfahrwesen, Universität Stuttgart  
Stuttgart, Deutschland

Prof. Dr.-Ing. Hans-Christian Reuss  
Lehrstuhl Kraftfahrzeugmechatronik,  
Institut für Verbrennungsmotoren und  
Kraftfahrwesen, Universität Stuttgart  
Stuttgart, Deutschland

---

Nikolaus Held

# Zylinderdruckbasierte Regelkonzepte für Sonderbrennverfahren bei Pkw-Dieselmotoren

 Springer Vieweg

Nikolaus Held  
Stuttgart, Deutschland

Zugl.: Dissertation Universität Stuttgart, 2016

D93

Wissenschaftliche Reihe Fahrzeugtechnik Universität Stuttgart  
ISBN 978-3-658-17585-6 ISBN 978-3-658-17586-3 (eBook)  
DOI 10.1007/978-3-658-17586-3

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Springer Vieweg

© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2017

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Vieweg ist Teil von Springer Nature

Die eingetragene Gesellschaft ist Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Abraham-Lincoln-Str. 46, 65189 Wiesbaden, Germany

# Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner dreijährigen Tätigkeit als Doktorand der Universität Stuttgart in der PKW Dieselmotorenentwicklung der Daimler AG in Sindelfingen unter der wissenschaftlichen Leitung von Herrn Prof. Dr.-Ing. M. Bargende.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. M. Bargende für die hervorragende wissenschaftliche Betreuung dieser Arbeit. Durch seinen fachlichen Rat und seine Unterstützung konnte diese Arbeit überhaupt erst entstehen.

Herrn Prof. Dr. sc. techn. T. Koch danke ich für sein Interesse sowie die Übernahme des Koreferats.

Besonders bedanken möchte ich mich bei meinen Vorgesetzten Herrn Dr. F. Duvinage sowie Herrn T. Betz für deren Unterstützung und die ausgezeichneten Rahmenbedingungen, welche maßgeblich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Großer Dank gilt allen Kolleginnen und Kollegen, für ein angenehmes Arbeitsklima, die große Unterstützung und die zahlreichen Diskussionen. An dieser Stelle gilt mein besonderer Dank Herrn Dr.-Ing. C. Barba, Herrn M. Bertelmann, Herrn M. Bröckelmann, Herrn C. Kawetzki, Herrn Z. Marenic, Herrn A. Roll, Herrn Dr.-Ing. T. Steinhilber, Herrn S. Binder, Herrn W. Mayer, Herrn C. Dengler, Herrn Dr.-Ing. S. Espig. Ebenfalls danken möchte ich den Studenten E. Kaya, A. Dönmez und A. Zimmerer, die durch ihr großes Engagement in vielfältiger Weise zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Nicht zuletzt möchte ich mich herzlich bei meiner Familie, speziell meinen Eltern und meinem Bruder, für die stets motivierenden Worte, die große Unterstützung und Geduld bedanken.

Stuttgart

Nikolaus Held

# Inhaltsverzeichnis

Vorwort . . . . .	V
Abbildungsverzeichnis . . . . .	XI
Tabellenverzeichnis . . . . .	XVII
Abkürzungsverzeichnis . . . . .	XIX
Symbolverzeichnis . . . . .	XXI
Kurzfassung . . . . .	XXVII
Abstract . . . . .	XXXI
<b>1 Einleitung . . . . .</b>	<b>1</b>
<b>2 Stand der Technik . . . . .</b>	<b>3</b>
<b>3 Modellierung des Motorprozesses . . . . .</b>	<b>7</b>
3.1 Grundlagen zur Druckverlaufsanalyse . . . . .	7
3.1.1 Zylinderdruckindizierung . . . . .	7
3.1.2 Nulllinienfindung . . . . .	9
3.2 Nulldimensionale Modellierung des Verbrennungsprozesses . . . . .	11
3.2.1 Grundlagen des thermodynamischen Systems Brennraum . . . . .	11
3.2.2 Wärmeübergang im Brennraum . . . . .	16
3.2.3 Brennraumwandtemperaturmodell . . . . .	23
3.3 Stoffeigenschaften des Arbeitsgases . . . . .	24
3.3.1 Chemisches Gleichgewicht . . . . .	24
3.3.2 Gleichgewichtsrechnung für Rauchgas . . . . .	26
3.3.3 Kalorische Stoffeigenschaften . . . . .	30
3.4 Heizverlaufsberechnung . . . . .	34
3.5 Charakteristische Verbrennungskennwerte . . . . .	36
3.5.1 Indizierter Mitteldruck . . . . .	37
3.5.2 Globale Umsatzpunkte der Verbrennung . . . . .	38
3.5.3 Anteil einzelner Einspritzungen am energetischen Gesamtumsatz . . . . .	41

3.5.4	Massenmitteltemperatur im Brennraum . . . . .	42
<b>4</b>	<b>Analyse verschiedener Sonderbrennverfahren . . . . .</b>	<b>45</b>
4.1	Sonderbrennverfahren beim Pkw-Dieselmotor . . . . .	45
4.1.1	Heizbrennverfahren . . . . .	46
4.1.2	Dieselpartikelfilterregeneration . . . . .	48
4.1.3	HC-Light-off Brennverfahren . . . . .	51
4.2	Analyse des Wärmekraftprozesses mittels Kreisprozessrechnung . . . . .	52
<b>5</b>	<b>Versuchsaufbau . . . . .</b>	<b>61</b>
5.1	Versuchsträger . . . . .	61
5.2	Flexibles Motorsteuergerät FI <sup>2RE</sup> . . . . .	61
5.3	Prototyping- und Schnittstellenmodul ES910 . . . . .	63
<b>6</b>	<b>Regelung der Verbrennungslage und -form bei Sonderbrennverfahren . . . . .</b>	<b>65</b>
6.1	Definition des Regelkonzeptes . . . . .	65
6.1.1	Verbrennungslageregelung . . . . .	68
6.1.2	Verbrennungsformregelung . . . . .	80
6.2	Ergebnisse der Regelkonzepterprobung . . . . .	81
6.3	Ergebnisse der Potentialanalyse . . . . .	88
<b>7</b>	<b>Modellbasierte Verbrennungsregelung bei Sonderbrennverfahren . . . . .</b>	<b>97</b>
7.1	Definition des Regelkonzeptes . . . . .	97
7.2	Modellierung der Abgastemperatur vor Turbine . . . . .	99
7.2.1	Modellierung der Gastemperatur im Brennraum . . . . .	100
7.2.2	Modellierung der Abgastemperaturänderung zwischen Brennraum und Turbine . . . . .	104
7.3	Ergebnisse der Erprobung des Abgastemperaturmodells . . . . .	111
7.4	Modellierung eines virtuellen Druckverlaufes ohne Nachverbrennung . . . . .	115
7.4.1	Analyse des Polytropenexponenten in der Expansion . . . . .	115
7.4.2	Ergebnisse der Verifizierung der Polytropenexponentenapproximation . . . . .	118
7.4.3	Ergebnisse der Modellierung der Expansion ohne Nachverbrennung . . . . .	120



7.5 Funktionsstruktur des Regelkonzeptes . . . . .	123
7.6 Ergebnisse der Regelkonzepterprobung . . . . .	125
<b>8 Schlussfolgerung und Ausblick . . . . .</b>	<b>131</b>
<b>Literaturverzeichnis . . . . .</b>	<b>133</b>
<b>Anhang . . . . .</b>	<b>141</b>

# Abbildungsverzeichnis

3.1	Indizierauswertung ( $n = 1000 \text{ min}^{-1}$ , $p_{mi} = 11,0 \text{ bar}$ ) . . . . .	8
3.2	Ein- und Auslassdruckverläufe - DPF-Rgn ( $n = 1600 \text{ min}^{-1}$ , $p_{mi} = 11,2 \text{ bar}$ ) . . . . .	9
3.3	Polytrope Nulllinienfindung nach Hohenberg [36] . . . . .	10
3.4	Thermodynamisches System Brennraum für innere Gemischbildung . . . . .	13
3.5	Brennraumtemperaturen ( $n = 1000 \text{ min}^{-1}$ , $p_{mi} = 11,0 \text{ bar}$ ) . . . . .	23
3.6	Berechnete Gleichgewichtskonstanten aus den Stoffeigenschaften nach Burcat [12] . . . . .	29
3.7	Brenn- und Heizverlauf ( $n = 1000 \text{ min}^{-1}$ , $p_{mi} = 11,0 \text{ bar}$ ) . . . . .	37
3.8	Globale Umsatzpunkte ( $n = 1400 \text{ min}^{-1}$ , $p_{mi} = 13,3 \text{ bar}$ ) . . .	41
3.9	Integrale, normierte Heizverläufe von Zylinder 1 bei 4 Arbeitspielen ( $n = 1400 \text{ min}^{-1}$ , $p_{mi} = 13,3 \text{ bar}$ ) . . . . .	41
3.10	Zylinderindividuelle $H_{50}$ und $H_{70}$ Lagen über 100 Arbeitspiele ( $n = 1400 \text{ min}^{-1}$ , $p_{mi} = 13,3 \text{ bar}$ ) . . . . .	42
3.11	Prozentualer Anteil der Einspritzungen am Gesamtumsatz ( $n = 1400 \text{ min}^{-1}$ , $p_{mi} = 13,3 \text{ bar}$ ) . . . . .	44
3.12	Brennraumtemperatur ( $n = 1400 \text{ min}^{-1}$ , $p_{mi} = 13,3 \text{ bar}$ ) . . . .	44
4.1	Einspritzstrategien in NRM und HBV ( $n = 1400 \text{ min}^{-1}$ , $p_{mi} = 5,4 \text{ bar}$ ) . . . . .	46
4.2	Druckverlaufsanalyse in NRM (grau) und HBV (schwarz) ( $n = 1400 \text{ min}^{-1}$ , $p_{mi} = 5,4 \text{ bar}$ ) . . . . .	47
4.3	Einspritzstrategien in NRM und DPF-Rgn ( $n = 1400 \text{ min}^{-1}$ , $p_{mi} = 5,4 \text{ bar}$ ) . . . . .	49
4.4	Druckverlaufsanalyse in NRM (grau)- und DPF-Rgn (schwarz) ( $n = 1400 \text{ min}^{-1}$ , $p_{mi} = 5,4 \text{ bar}$ ) . . . . .	50
4.5	Einspritzstrategien in NRM und Loff ( $n = 1400 \text{ min}^{-1}$ , $p_{mi} = 5,4 \text{ bar}$ ) . . . . .	51
4.6	Druckverlaufsanalyse in NRM (grau)- und Loff (schwarz) ( $n = 1400 \text{ min}^{-1}$ , $p_{mi} = 5,4 \text{ bar}$ ) . . . . .	53
4.7	Dreifach Seiligerprozess . . . . .	54
4.8	Druck- und Temperaturverläufe Messung und dreifach Seiligerapproximation ( $N = 2000 \text{ min}^{-1}$ , $p_{mi} = 10,2 \text{ bar}$ ) . . .	55

4.9	Dreifach Seiligerprozessrechnung: Druck- und Temperaturverläufe der Wärmemengenvariation . . . . .	56
4.10	Dreifach Seiligerprozessrechnung: Prozessergebnisse der Wärmemengenvariation . . . . .	57
4.11	Dreifach Seiligerprozessrechnung: Druck- und Temperaturverläufe der Lagevariation . . . . .	59
4.12	Dreifach Seiligerprozessrechnung: Prozessergebnisse der Lagevariation . . . . .	60
5.1	Komponenten des OM651eco . . . . .	64
5.2	Versuchsaufbau . . . . .	66
6.1	Ansteuerlogik im DPF-Regenerationsbrennverfahren . . . . .	68
6.2	Regelkonzept . . . . .	70
6.3	Normierte, integrale Heizverläufe ( $n = 2400 \text{ min}^{-1}$ , $p_{mi} = 6,0 \text{ bar}$ ) . . . . .	70
6.4	Normierte, integrale Heizverläufe ( $n = 2000 \text{ min}^{-1}$ , $p_{mi} = 3,0 \text{ bar}$ bis $p_{mi} = 21,8 \text{ bar}$ ) . . . . .	71
6.5	Standardabweichung $\sigma_{H_{50}}$ der Umsatzpunktlage $H_{50}$ im DPF-Regenerationsbrennverfahren . . . . .	72
6.6	Standardabweichung $\sigma_{H_{60}}$ der Umsatzpunktlage $H_{60}$ im DPF-Regenerationsbrennverfahren . . . . .	73
6.7	Standardabweichung $\sigma_{H_{70}}$ der Umsatzpunktlage $H_{70}$ im DPF-Regenerationsbrennverfahren . . . . .	73
6.8	Standardabweichung $\sigma_{H_{80}}$ der Umsatzpunktlage $H_{80}$ im DPF-Regenerationsbrennverfahren . . . . .	74
6.9	Aufteilung der Verbrennung Nulldurchgangskriterium . . . . .	75
6.10	Betriebspunkt ohne Nulldurchgang zwischen Haupt- und Nachverbrennungsphase . . . . .	76
6.11	Aufteilung der Verbrennung in zwei Auswertephasen . . . . .	78
6.12	Nulldurchgang während der Verdampfung der Nacheinspritzung . . . . .	79
6.13	Standardabweichung $\sigma_{H_{50HV}}$ der Umsatzpunktlage $H_{50HV}$ im DPF-Regenerationsbrennverfahren . . . . .	80
6.14	Standardabweichung $\sigma_{H_{60HV}}$ der Umsatzpunktlage $H_{60HV}$ im DPF-Regenerationsbrennverfahren . . . . .	81
6.15	Standardabweichung $\sigma_{H_{70HV}}$ der Umsatzpunktlage $H_{70HV}$ im DPF-Regenerationsbrennverfahren . . . . .	81
6.16	Standardabweichung $\sigma_{H_{80HV}}$ der Umsatzpunktlage $H_{80HV}$ im DPF-Regenerationsbrennverfahren . . . . .	82

6.17	Anteil der Voreinspritzungen $Y_{PI_{HV}}$ am Umsatz der Hauptverbrennungsphase . . . . .	84
6.18	$H_{70_{HV}}$ - und $Y_{PI_{HV}}$ Ist- und Sollwerte ( $n = 1000 \text{ min}^{-1}$ , $p_{mi} = 5,4 \text{ bar}$ ) . . . . .	86
6.19	Funktionsweise der Verbrennungsregelung . . . . .	87
6.20	Ausschnitt Paris-Zyklus im Serienbetrieb . . . . .	89
6.21	Ausschnitt Paris-Zyklus im verbrennungsgeregelten Betrieb . . . . .	90
6.22	Betriebsvergleich bei einer Lastrampe ( $n = 2000 \text{ min}^{-1}$ ; $Schub \rightarrow p_{mi} = 6,0 \text{ bar}$ ) . . . . .	92
6.23	Vergleich der Verbrennungsstabilität im Serienbetrieb zum verbrennungsgeregelten Betrieb . . . . .	93
6.24	Geschwindigkeitsprofil, Verbrennungsmodus und Rußbelastung im doppel NEFZ . . . . .	95
6.25	Abgastemperaturen im doppel NEFZ . . . . .	96
6.26	$T_3$ -Regeleingriffe im doppel NEFZ . . . . .	97
6.27	$T_5$ -Regeleingriffe im doppel NEFZ . . . . .	98
7.1	Vergleich unterschiedlich dicker Thermoelemente gegenüber dem Seriensensor . . . . .	102
7.2	Schema der modellbasierten Abgastemperaturregelung vor Turbine . . . . .	104
7.3	Schema der Modellierung der Abgastemperatur vor Turbine . . . . .	105
7.4	Individuelle Gaskonstante kurz vor „Auslass öffnet“ für das Kennfeld . . . . .	106
7.5	Interne Restgasmasse $m_{R,int}$ für das Kennfeld . . . . .	107
7.6	Zylindermasse $m_Z$ für das Kennfeld . . . . .	108
7.7	Temperatur kurz vor Auslass öffnet $T_{A\ddot{O}}$ für das Kennfeld . . . . .	109
7.8	Regression der modellierten Abgastemperatur vor Turbine $\hat{T}_3$ . . . . .	111
7.9	Statistische Auswertung des Kalibrierdatensatzes mit einer Klassenbreite von 5 K . . . . .	113
7.10	Abgastemperatur bei der Drehzahl-/Lastrampe ( $n = 1500 \text{ min}^{-1}$ , $p_{mi} = 1,8 \text{ bar}$ auf $n = 3000 \text{ min}^{-1}$ , $p_{mi} = 11,9 \text{ bar}$ ) . . . . .	114
7.11	Abgastemperatur bei unterschiedlichen Drehzahl-/Lastsrampen . . . . .	115

7.12	Abgastemperatur bei der Drehzahl-/Lastrampe ( $n = 1500 \text{ min}^{-1}$ , $p_{mi} = 1,8 \text{ bar}$ auf $n = 3000 \text{ min}^{-1}$ , $p_{mi} = 11,9 \text{ bar}$ ) . . . . .	116
7.13	Abgastemperatur bei unterschiedlichen Drehzahl-/ Lastrampen . . . . .	116
7.14	Abgastemperaturverlauf $T_3$ im RTS 95% . . . . .	118
7.15	Statistische Auswertung der Modellierung mit $d = 3\text{mm}$ im RTS 95% . . . . .	118
7.16	Abgastemperaturverlauf $T_3$ im RTS 95% . . . . .	119
7.17	Statistische Auswertung der Modellierung mit $d = 0,75\text{mm}$ im RTS 95% . . . . .	119
7.18	Abweichung der gemessenen Abgastemperatur zwischen Seriensensor und Thermoelement $\Delta T_3$ im RTS 95% . . . . .	120
7.19	Statistische Auswertung der Seriensensorabweichung im RTS 95% . . . . .	120
7.20	Verläufe des Polytropenexponenten bei einer Drehzahlvariation aus einer 1D Verbrennungssimulation . . . . .	122
7.21	Modellierte Verläufe des Polytropenexponenten nach Verbrennungsende . . . . .	123
7.22	Modellierte Brenn- und Polytropenexponentenverläufe . . . . .	123
7.23	Modellierte Polytropenexponentenverläufe . . . . .	124
7.24	Verifizierung der Polytropenexponentenapproximation . . . . .	125
7.25	Differenz bei der Expansionsmodellierung zwischen Modell und konstantem Polytropenexponenten . . . . .	126
7.26	Differenzen bei der Expansionsmodellierung im indizierten Mitteldruck und der Brennraumtemperatur . . . . .	127
7.27	Einfluss der angelagerten Nacheinspritzung auf Brennraumdruck und -temperatur . . . . .	128
7.28	Funktionsstruktur der modellbasierten Verbrennungsregelung . . . . .	130
7.29	Modellbasierte Abgastemperaturregelung bei einer Sollwertvariation im stationären Motorbetrieb . . . . .	131
7.30	Modellbasierte Abgastemperaturregelung mit angepasstem P-Verhalten bei einer Sollwertvariation im stationären Motorbetrieb . . . . .	132
7.31	Modellbasierte Abgastemperaturregelung bei einer Sollwertvariation von $\Delta T_{3,soll} = -40\text{K}$ im stationären Motorbetrieb . . . . .	133

7.32	Modellbasierte Abgastemperaturregelung im ECE City-Zyklus . . . . .	135
A.1	Hauptverbrennungsende mittels Nulldurchgangskriterium . . .	162
A.2	Differenz zwischen Nulldurchgangskriterium und hydraulischem Ansteuerbeginn . . . . .	163
A.3	Geschwindigkeitsprofil und gemessener Momenten- und Drehzahlverlauf des Paris-Zyklus . . . . .	164
A.4	Regeleingriffe im Paris-Zyklus . . . . .	165
A.5	$H70_{HV}$ -Lagen bei einer Lastrampe ( $n = 2000 \text{ min}^{-1}$ ; $Schub \rightarrow p_{mi} = 6,0 \text{ bar}$ ) . . . . .	166
A.6	Betriebsvergleich bei einer Lastrampe ( $n = 1000 \text{ min}^{-1}$ ; $Schub \rightarrow p_{mi} = 5,0 \text{ bar}$ ) . . . . .	167
A.7	Betriebsvergleich bei einer Lastrampe ( $n = 1400 \text{ min}^{-1}$ ; $Schub \rightarrow p_{mi} = 5,0 \text{ bar}$ ) . . . . .	168
A.8	Abgastemperaturen und deren Sollwerte in der DPF-Regeneration im doppel NEFZ . . . . .	169
A.9	Kalibrierung Wandwärmeübergang im Abgaskrümmen im transienten Betrieb . . . . .	174
A.10	Gemessene und modellierte Abgastemperaturen bei einer Kühlwassertemperatur von $50^\circ\text{C}$ . . . . .	175
A.11	Gemessene und modellierte Abgastemperaturen bei einer Kühlwassertemperatur von $75^\circ\text{C}$ . . . . .	176
A.12	Gemessene und modellierte Abgastemperaturen bei einer Kühlwassertemperatur von $95^\circ\text{C}$ . . . . .	177
A.13	Geschwindigkeitsprofil verschiedener Zyklen . . . . .	178
A.14	Abgastemperaturverlauf $T_3$ beim NEFZ . . . . .	179
A.15	Abgastemperaturverlauf $T_3$ beim NEFZ . . . . .	179
A.16	Abweichung der gemessenen Abgastemperatur zwischen Seriensensor und Thermoelement $\Delta T_3$ beim NEFZ . . . . .	179
A.17	Statistische Auswertung der Modellierung mit $d = 3\text{mm}$ beim NEFZ . . . . .	180
A.18	Statistische Auswertung der Modellierung mit $d = 0,75\text{mm}$ beim NEFZ . . . . .	180
A.19	Statistische Auswertung der Seriensensorabweichung im NEFZ . . . . .	180
A.20	Abgastemperaturverlauf $T_3$ beim RTS 5% . . . . .	181
A.21	Abgastemperaturverlauf $T_3$ beim RTS 5% . . . . .	181
A.22	Abweichung der gemessenen Abgastemperatur zwischen Seriensensor und Thermoelement $\Delta T_3$ beim RTS 5% . . . . .	181

A.23	Statistische Auswertung der Modellierung mit $d = 3mm$ beim RTS 5% . . . . .	182
A.24	Statistische Auswertung der Modellierung mit $d = 0,75mm$ beim RTS 5% . . . . .	182
A.25	Statistische Auswertung der Seriensenorabweichung beim RTS 5% . . . . .	182
A.26	Abgastemperaturverlauf $T_3$ beim RTS 50% . . . . .	183
A.27	Abgastemperaturverlauf $T_3$ beim RTS 50% . . . . .	183
A.28	Abweichung der gemessenen Abgastemperatur zwischen Seriensenor und Thermoelement $\Delta T_3$ beim RTS 50% . . . . .	183
A.29	Statistische Auswertung der Modellierung mit $d = 0,75mm$ beim RTS 5% . . . . .	184
A.30	Statistische Auswertung der Modellierung mit $d = 0,75mm$ beim RTS 50% . . . . .	184
A.31	Statistische Auswertung der Seriensenorabweichung beim RTS 50% . . . . .	184
A.32	Brennraumdruck $p_Z$ bei einer Drehzahlvariation aus einer 1D Verbrennungssimulation . . . . .	185
A.33	Brennverläufe $dQ_b/d\varphi$ bei einer Drehzahlvariation aus einer 1D Verbrennungssimulation . . . . .	186
A.34	Verifizierung der Polytropenexponentenapproximation . . . . .	187
A.35	Größen der modellbasierten Abgastemperaturregelung bei einer Sollwertvariation im stationären Motorbetrieb . . . . .	188
A.36	Modellbasierte Abgastemperaturregelung mit angepasstem P-Verhalten bei einer Sollwertvariation im stationären Motorbetrieb . . . . .	189
A.37	Modellbasierte Abgastemperaturregelung im NEFZ . . . . .	190

# Tabellenverzeichnis

3.1	Zylinderindividuelle Standardabweichung der Umsatzpunktlagen . . . . .	42
4.1	Einspritzmassen in NRM und HBV ( $n = 1400 \text{ min}^{-1}$ , $p_{mi} = 5,4 \text{ bar}$ ) . . . . .	47
4.2	Einspritzmassen in NRM und DPF-Rgn ( $n = 1400 \text{ min}^{-1}$ , $p_{mi} = 5,4 \text{ bar}$ ) . . . . .	49
4.3	Einspritzmassen in NRM und Loff ( $n = 1400 \text{ min}^{-1}$ , $p_{mi} = 5,4 \text{ bar}$ ) . . . . .	52
4.4	Approximationszielgrößen des dreifach Seiligerprozesses . . . . .	56
5.1	Aktorik und Sensorik OM651eco . . . . .	63
A.1	$k - \varepsilon$ Turbulenzmodellparameter nach [22] . . . . .	147
A.2	Konzentrationen der Bestandteile trockener Luft nach Burcat [12] . . . . .	147
A.3	Polynomkoeffizienten zur Berechnung der thermodynamischen Eigenschaften im Temperaturbereich: $200 \leq T \leq 1000 \text{ [K]}$ nach [12] . . . . .	148
A.4	Polynomkoeffizienten zur Berechnung der thermodynamischen Eigenschaften im Temperaturbereich: $1000 \leq T \leq 6000 \text{ [K]}$ nach [12] . . . . .	149
A.5	Molmassen $M_i$ der betrachteten Spezies $i$ nach Burcat [12] . . . . .	152
A.6	Molmassen $M_j$ der betrachteten Elemente $j$ nach Burcat [12] . . . . .	152
A.7	Molare Standardbildungsenthalpien $\Delta_f H_{298}^\circ$ nach Burcat [12] . . . . .	153
A.8	Polynomkoeffizienten zur Berechnung der Wärmeleitfähigkeit $\lambda_c$ im Temperaturbereich: $300 \leq T \leq 1000 \text{ [K]}$ nach McBride et al. [54] . . . . .	154
A.9	Polynomkoeffizienten zur Berechnung der Wärmeleitfähigkeit $\lambda_c$ im Temperaturbereich: $1000 \leq T \leq 5000 \text{ [K]}$ nach McBride et al. [54] . . . . .	154
A.10	Polynomkoeffizienten zur Berechnung der dynamischen Viskosität $\eta_v$ nach McBride et al. [54] . . . . .	155
A.11	Polynomkoeffizienten zur Berechnung der dynamischen Viskosität $\eta_v$ nach McBride et al. [54] . . . . .	155



A.12	Parameter des approximierten dreifach Seiligerprozesses . . .	159
A.13	Parameter der Mengenvariation der dreifach Seiligerprozessrechnung . . . . .	159
A.14	Parameter der Lagevariation der dreifach Seiligerprozessrechnung . . . . .	160
A.15	Technische Daten des Versuchsaggregates . . . . .	160
A.16	Technische Daten des TRA-Karte . . . . .	161
A.17	Modellparameter des rationalen Polynoms . . . . .	173
A.18	Kalibrierung Wandmodell . . . . .	174

# Abkürzungsverzeichnis

$T_{135}$	Gastemperatur kurz vor Öffnen der Auslassventile
3D	dreidimensional
AGR	Abgasrückführung
ASP	Arbeitsspiel
AÖ	Auslassventil öffnet
BV	Brennverfahren
CAN	Controller Area Network
CFD	Computational Fluid Dynamics
CRT	Continuously Regeneration Trap
DOC	Diesel Oxidation Catalyst
DPF	Diesel Particulate Filter
DPF-Rgn	DPF-Regenerationsbrennverfahren
DVA	Druckverlaufsanalyse
EKAS	Einlasskanalabschaltung
ES	Einlassventil schließt
ETK	Emulator Tastkopf
EVI	Einspritzverlaufsindikator
FI <sup>2RE</sup>	flexible injection and ignition for rapid engineering
FKFS	Forschungsinstitut für Kraftfahrzeuge und Fahrzeugmotoren Stuttgart
HBV	Heizbrennverfahren
IVK	Institut für Verbrennungsmotoren und Kraftfahrwesen
LLK	Ladeluftkühler
Loff	HC-Light-off-Brennverfahren
MFA	Mercedes Frontwheel Drive Architecture
MSG	Motorsteuergerät

NRM	Normalbrennverfahren
NSC	NO <sub>x</sub> Storage Catalyst
OT	oberer Totpunkt
PEMS	Portable Emissions Measurement System
Pkw	Personenkraftwagen
RDE	Real Driving Emissions
RPC	Rapid Prototyping Control
RTS 50%	Random Norm
RTS 5%	Random Soft
RTS 95%	Random Agressive
SCR	Selective Catalytic Reduction
TRA	thermodynamic real-time analysis
UT	unterer Totpunkt
WLTP	Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedures
ZOT	oberer Zündtotpunkt
ZOT	oberer Totpunkt des Arbeitstaktes
ZZP	Zündzeitpunkt

# Symbolverzeichnis

---

## Griechische Buchstaben

$\alpha$	Wärmeübergangskoeffizient	W/m <sup>2</sup> K
$\Delta$	Verbrennungsterm	-
$\varepsilon_{Diss}$	Dissipationsterm	-
$\eta$	Wirkungsgrad	-
$\eta_{th}$	thermischer Wirkungsgrad	-
$\eta_v$	dynamische Viskosität	kg/m/s
$\kappa$	Isentropenexponent	-
$\lambda$	Luftverhältnis	-
$\lambda_c$	Wärmeleitfähigkeit	W/m/K
$\lambda_L$	Liefergrad	-
$\mu$	mittlere Abweichung	-
$\nu_v$	kinematische Viskosität	m <sup>2</sup> /K
$\phi$	Kurbelwellenwinkel	°KW
$\Pi$	Druckverhältnis	-
$\psi$	Durchflussfunktion	-
$\mathfrak{R}$	universelle Gaskonstante	J/kg/mol
$\rho$	Dichte	kg/m <sup>3</sup>
$\sigma$	Standardabweichung	-
$\tau$	Zeitkonstante eines PT <sub>1</sub> -Gliedes	s
$\nu$	stöchiometrischer Koeffizient	-
$\varphi$	Kurbelwinkel	°KW
$\varphi_{MI}$	hydraulischer Ansteuerbeginn der MI	°KW
$\varphi_{PoI1}$	hydraulischer Ansteuerbeginn der PoI1	°KW
$\zeta$	Verbrennungsterm der Polytropenexponentenapproximation	-

---

## Indizes

$L_F$	Frischlufte
A	Auslass
a	axial
ab	abgeführt
Abg	Abgas
AÖ	Auslassventil öffnet
B	Brennstoff

---

D	Drall
E	Einlass
eff	effektiv
EHV	Ende Hauptverbrennungsphase
ES	Einlassventil schließt
EV	Einlassventil
ext	extern
FF	Feed Forward
geom	geometrisch
ges	gesamt
h	Hub
HD	Hochdruck
HV	Hauptverbrennungsphase
i	Zählindex
in	innen
ind	indiziert
int	intern
k	Kolben
Kr	Krümmen
krit	kritisch
KW	Kühlwasser
L	Leckage
m	Mittelwert
max	maximal
mech	Mechanisch
MI	Haupteinspritzung
Mot	Motor
Mulde	Kolbenmulde
n	Nulllinie
ND	Niederdruck
norm	normiert
NV	Nachverbrennungsphase
o	ohne
OT	oberer Totpunkt
p	isobar
PI	Voreinspritzungen zusammengefasst
PI1	frühe Voreinspritzung
PI2	angelagerte Voreinspritzung
Po1	angelagerte Nacheinspritzung
Po2	späte Nacheinspritzung