

AutoUni – Schriftenreihe

AutoUni 

Christoph Kröger

Stöchiometrisches heterogenes Dieselbrennverfahren im stationären und instationären Motorbetrieb

AutoUni – Schriftenreihe

Band 125

Reihe herausgegeben von/Edited by
Volkswagen Aktiengesellschaft
AutoUni

Die Volkswagen AutoUni bietet Wissenschaftlern und Promovierenden des Volkswagen Konzerns die Möglichkeit, ihre Forschungsergebnisse in Form von Monographien und Dissertationen im Rahmen der „AutoUni Schriftenreihe“ kostenfrei zu veröffentlichen. Die AutoUni ist eine international tätige wissenschaftliche Einrichtung des Konzerns, die durch Forschung und Lehre aktuelles mobilitätsbezogenes Wissen auf Hochschulniveau erzeugt und vermittelt.

Die neun Institute der AutoUni decken das Fachwissen der unterschiedlichen Geschäftsbereiche ab, welches für den Erfolg des Volkswagen Konzerns unabdingbar ist. Im Fokus steht dabei die Schaffung und Verankerung von neuem Wissen und die Förderung des Wissensaustausches. Zusätzlich zu der fachlichen Weiterbildung und Vertiefung von Kompetenzen der Konzernangehörigen, fördert und unterstützt die AutoUni als Partner die Doktorandinnen und Doktoranden von Volkswagen auf ihrem Weg zu einer erfolgreichen Promotion durch vielfältige Angebote – die Veröffentlichung der Dissertationen ist eines davon. Über die Veröffentlichung in der AutoUni Schriftenreihe werden die Resultate nicht nur für alle Konzernangehörigen, sondern auch für die Öffentlichkeit zugänglich.

The Volkswagen AutoUni offers scientists and PhD students of the Volkswagen Group the opportunity to publish their scientific results as monographs or doctor's theses within the "AutoUni Schriftenreihe" free of cost. The AutoUni is an international scientific educational institution of the Volkswagen Group Academy, which produces and disseminates current mobility-related knowledge through its research and tailor-made further education courses. The AutoUni's nine institutes cover the expertise of the different business units, which is indispensable for the success of the Volkswagen Group. The focus lies on the creation, anchorage and transfer of new knowledge.

In addition to the professional expert training and the development of specialized skills and knowledge of the Volkswagen Group members, the AutoUni supports and accompanies the PhD students on their way to successful graduation through a variety of offerings. The publication of the doctor's theses is one of such offers. The publication within the AutoUni Schriftenreihe makes the results accessible to all Volkswagen Group members as well as to the public.

Reihe herausgegeben von/Edited by

Volkswagen Aktiengesellschaft

AutoUni

Brieffach 1231

D-38436 Wolfsburg

<http://www.autouni.de>

Weitere Bände in der Reihe <http://www.springer.com/series/15136>

Christoph Kröger

Stöchiometrisches
heterogenes
Dieselbrennverfahren
im stationären
und instationären
Motorbetrieb

 Springer

Christoph Kröger
Wolfsburg, Deutschland

Zugl.: Dissertation, TU Braunschweig, 2018

Die Ergebnisse, Meinungen und Schlüsse der im Rahmen der AutoUni – Schriftenreihe veröffentlichten Doktorarbeiten sind allein die der Doktorandinnen und Doktoranden.

AutoUni – Schriftenreihe
ISBN 978-3-658-22500-1 ISBN 978-3-658-22501-8 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-3-658-22501-8>

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

© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, ein Teil von Springer Nature 2018

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 ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH und ist ein Teil von Springer Nature

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

Stöchiometrisches heterogenes Dieselmotorenverfahren im stationären und instationären
Motorbetrieb

Von der Fakultät für Maschinenbau
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig

zur Erlangung der Würde

einer Doktor-Ingenieurin oder eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von: Christoph Kröger

aus: Hamburg

eingereicht am: 22.06.2017

mündliche Prüfung am: 11.01.2018

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Peter Eilts
Prof. Dr.-Ing. Hermann Rottengruber

Fällst du siebenmal, stehe achtmal auf.
Nur Siege und keine Niederlagen kennen ist von Nachteil.
Japanische Weisheiten

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner dreijährigen Anstellung als Doktorand bei der Volkswagen AG. Ich war in dieser Zeit in der Konzernforschung Antriebe in der Abteilung Brennverfahren Diesel tätig.

An dieser Stelle möchte ich den Personen danken, die mich während der Anfertigung meiner Dissertation unterstützt haben und auch darüber hinaus mir mit Rat und Tat zur Seite standen. Allen voran danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Peter Eilts, Leiter des Instituts für Verbrennungskraftmaschinen für die Betreuung meiner Arbeit seitens der Technischen Universität Braunschweig. Ich danke Herrn Prof. Dr.-Ing. Hermann Rottengruber, Leiter des Instituts für Mobile Systeme der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, für das Interesse an der Arbeit und die Übernahme des Zweitgutachtens sowie Herrn Prof. Dr.-Ing. Ferit Küçükay, Direktor des Instituts für Fahrzeugtechnik der Technischen Universität Braunschweig, für den Vorsitz der Promotionskommission. Herrn Dr.-Ing. Aiko Mork danke ich für die Betreuung der Arbeit seitens der Volkswagen AG. Ich danke auch den übrigen Kollegen der Unterabteilung K-EFAV/D für die gute Zusammenarbeit und allen weiteren Kollegen der Antriebsforschung, die mir stets hilfreich bei meinen Herausforderungen zur Seite standen. Besonderer Dank geht an Herrn Timo Lemke und die Kollegen des Technikums der Konzernforschung, ohne deren Unterstützung ich die Versuche am Prüfstand und im Fahrzeug nicht hätte durchführen können. Außerdem danke ich den von mir betreuten Studenten für ihre Unterstützung am Prüfstand und am Versuchsfahrzeug mit ihrer engagierten und zuverlässigen Arbeitsweise. Dem Volkswagen Doktorandenkolleg danke ich für die tolle Gemeinschaft und die wertvollen Erfahrungen.

Abschließend möchte ich den Menschen danken, die mich auf meinem Lebensweg begleitet haben und mir mit Unterstützung, Anregung und Motivation zur Seite standen. Dazu zählen allen voran meine Mutter und meine Schwester.

Christoph Kröger

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	XIII
Tabellenverzeichnis	XVII
Abkürzungsverzeichnis	XIX
1 Einleitung	1
2 Konventionelles Dieselmotorenverfahren	5
2.1 Einspritzung und Gemischbildung	6
2.2 Zündung und Verbrennung	7
2.3 Schadstoffe des Dieselmotorenverfahrens: Entstehung und Reduktion	8
2.3.1 Kohlenwasserstoffe	9
2.3.2 Kohlenmonoxid	10
2.3.3 Partikel	10
2.3.4 Stickoxide	11
2.3.5 Ammoniak	13
2.3.6 Innermotorische Maßnahmen zur Schadstoffreduktion	14
2.3.7 Abgasnachbehandlung	18
2.4 Wirkungsgrad und Verluste	28
3 Stöchiometrisches heterogenes Dieselmotorenverfahren	31
3.1 Zusammenfassung bisheriger Veröffentlichungen	31
3.2 Zusammenfassung der Patente	34
3.3 Kurzfassung der wesentlichen Aspekte	35
4 Zielsetzung der Arbeit	37
5 Versuchsaufbau und -durchführung	39
5.1 Versuchsmotor	39
5.2 Versuchsfahrzeug	40
5.3 Prüfstands Aufbau und verwendete Messtechnik	41
5.3.1 Motorprüfstand	42
5.3.2 Fahrzeugprüfstand	43
5.4 Prüfzyklen	44
5.4.1 WHSC- und WHTC-Prüfzyklus	44
5.4.2 NEDC- und WLTC-Prüfzyklus	46
5.5 Rußeintrag in den Partikelfilter	47
6 Stationärer stöchiometrischer Betrieb beim Dieselmotor	51
6.1 Realisierung des stöchiometrischen Betriebs	51

6.2 Einfluss des Luftverhältnisses auf die Emissionen	53
6.2.1 Einfluss einer zyklischen Zwangsanregung	58
6.2.2 Einfluss der Abgasrückführung	62
6.2.3 Ammoniakemissionen infolge des stöchiometrischen Betriebs	63
6.3 Einfluss des Luftverhältnisses auf den Wirkungsgrad	67
6.4 Zusammenfassung der Erkenntnisse	71
7 Instationärer stöchiometrischer Betrieb beim Dieselmotor	73
7.1 Instationärer Betrieb im stöchiometrischen Kennfeldbereich	73
7.2 Übergang vom überstöchiometrischen in den stöchiometrischen Betrieb	77
7.3 Verbesserung der Stickoxidkonvertierung beim Übergang in den stöchiometrischen Betrieb	80
7.4 Emissionspotenzial in verschiedenen Prüfzyklen	83
7.4.1 WHSC-Prüfzyklus	84
7.4.2 WHTC-Prüfzyklus	89
7.4.3 NEDC-Prüfzyklus	93
7.4.4 WLTC-Prüfzyklus	95
7.5 Zusammenfassung der Erkenntnisse	96
8 Beladungs- und Regenerationsverhalten des Partikelfilters in stöchiometrischem Betrieb	99
8.1 Bewertung des Beladungsverhaltens mittels Druckverlust über Partikelfilter	99
8.2 Bewertung des Beladungsverhaltens mittels Rußmasse	104
8.3 Regenerationsverhalten des Partikelfilters	109
9 Zusammenfassung	117
Literatur	121
Anhang	135
A.1 Berechnung stöchiometrischer Luftbedarf	135
A.2 Versuchsmotor	136
A.3 Leistungsbremse	137
A.4 Messtechnik	137
A.5 Prüfzyklen	141
A.6 Wirkungsgrad und Verlustteilung	143
A.7 Ausräumfunktion	145
A.7.1 Bestimmung Kraftstoffmehrverbrauch	145
A.8 Abschätzung Rußeintrag	146
A.9 Zusätzliche Diagramme	147

Abbildungsverzeichnis

1.1	Herausforderungen bei der Entwicklung neuer Dieselmotoren	1
2.1	Schematische Darstellung der Teilprozesse des Dieselmotorenverfahrens [1, 2] .	6
2.2	Übersicht Hochdruckspeichereinspritzsystem [3]	7
2.3	Zerstäubung eines Einspritzstrahls, Kavitation (lat. cavitare „aushöhlen“): Bildung und Auflösung von dampfgefüllten Hohlräumen (Dampfblasen) in Flüssigkeiten, schematisch nach [2, 4]	8
2.4	Zusammensetzung des Rohabgases von Dieselmotoren [1]	9
2.5	Prinzipskizze der Rußbildungsphasen, eigene Darstellung nach [5]	11
2.6	Ruß- und Stickoxide (NO _x)-Bildung als Funktionen der Gastemperatur und des Luftverhältnisses, eigene Darstellung nach [6]	12
2.7	Schematische Darstellung der Hochdruck (HD)- und Niederdruck (ND)-Abgasrückführung	17
2.8	Aufbau eines Drei-Wege-Katalysators, eigene Darstellung nach [7]	19
2.9	Funktion des Drei-Wege-Katalysators beim Ottomotor in Abhängigkeit vom Luftverhältnis (λ), schematisch nach [2, 8–14]	21
2.10	Schematischer Aufbau einer Lambda-Regelung [10, 15]	22
2.11	Funktionsprinzip eines Partikelfilters, eigene Darstellung nach [16]	27
2.12	Verlusteile des Verbrennungsmotors, eigene Darstellung nach [17–19] . .	28
5.1	Prinzipskizze des Versuchsmotors mit Ansaug- und Abgasstrecke, Drei-Wege-Katalysator als Erweiterung	40
5.2	Prüfstands Aufbau mit seinen einzelnen Systemkomponenten	42
5.3	WHSC- und WHTC-Prüfzyklus [20]	45
5.4	Geschwindigkeitsprofil des NEDC- und WLTC-Prüfzyklus	47
5.5	Messaufbau zur Verwiegung des Partikelfilters	49
6.1	Aufteilung des Motorkennfeldes in einen konventionellen überstöchiometrischen und einen stöchiometrischen Betriebsbereich, schematisch	52
6.2	Einfluss des Luftverhältnisses auf die Emissionen, $n = 2000$ l/min, $M_d = 200$ Nm, Abgastemperatur, $n_{\text{Turbine}} > 600$ °C, Messstellen: Rohemissionen, nach Oxidationskatalysator (DOC)/ nach Partikelfilter (PF) und nach Drei-Wege-Katalysator (3WC)	54
6.3	Vergößerte Darstellung der Abbildung 6.2 auf Seite 54, Einfluss des Luftverhältnisses auf die Emissionen, $n = 2000$ l/min, $M_d = 200$ Nm, Abgastemperatur $n_{\text{Turbine}} > 600$ °C, Messstelle: nach Oxidationskatalysator/ nach Drei-Wege-Katalysator	55
6.4	Konvertierungsrate der Abgasnachbehandlung (Oxidations- + Drei-Wege-Katalysator) als Produkt der Konvertierungsraten von NO _x und Kohlenmonoxid (CO) in Abhängigkeit vom Luftverhältnis, $n = 2000$ l/min, $M_d = 200$ Nm	56

6.5	Ergebnisse einer Kennfeldvermessung des Versuchsmotors, Messstelle nach Drei-Wege-Katalysator	58
6.6	Luftverhältnis als Sollwert, Messwert vor Oxidationskatalysator (Regel-Lambdasonde) und Messwert nach Drei-Wege-Katalysator (Mess-Lambdasonde) bei einer Zwangsanregung, Emissionen nach Drei-Wege-Katalysator	59
6.7	Konvertierung als Produkt der Konvertierungsraten von NO_x und CO durch das Abgasnachbehandlungssystem (Oxidations- + Drei-Wege-Katalysator) in Abhängigkeit vom Luftverhältnis bei einer sinusförmigen Zwangsanregung, $n = 2000$ 1/min, $M_d = 200$ Nm	61
6.8	Einfluss von Abgasrückführung in Abhängigkeit vom Luftverhältnis auf die Emissionen, $n = 2000$ 1/min, $M_d = 200$ Nm	62
6.9	Ammoniak (NH_3)-Emissionen in Abhängigkeit vom Luftverhältnis, Messstellen: Rohemissionen, nach Oxidations- und nach Drei-Wege-Katalysator, Grenzwert NH_3 -Emissionen für EU VI im WHSC- und WHTC-Prüfzyklus = 10 ppm, $n = 2000$ 1/min, $M_d = 200$ Nm	64
6.10	NH_3 -Emissionen nach Drei-Wege-Katalysator in Abhängigkeit vom Luftverhältnis bei Veränderung der Amplitude und Frequenz der Zwangsanregung und bei verschiedenen AGR-Raten, $n = 2000$ 1/min, $M_d = 200$ Nm	65
6.11	Analyse des Kraftstoffmehrverbrauchs in Abhängigkeit vom Luftverhältnis, $n = 2000$ 1/min, $M_d = 200$ Nm	67
6.12	Verlusteileitung, $n = 2000$ 1/min und $M_d = 200$ Nm	68
6.13	Kennfeldvergleich spezifischer Kraftstoffverbrauch in g/kWh der beiden Betriebsarten	70
7.1	Lastsprung: 256 Nm auf 314 Nm bei 2000 1/min, Frequenz = 1 Hz, Amplitude = 1 %, Messstelle nach Drei-Wege-Katalysator	74
7.2	Last- und Drehzahlsprung: 146 Nm bei 1440 1/min auf 243 Nm bei 1904 1/min, Frequenz = 1 Hz, Amplitude = 1 %, Messstelle nach Drei-Wege-Katalysator	75
7.3	Modifizierter WHTC-Prüfzyklus: Betriebspunkte des WHTC mit einem Drehmoment ≥ 150 Nm	76
7.4	Lastschnitt bei 2000 1/min, Messstelle Emissionen: nach Drei-Wege-Katalysator	78
7.5	Lastschnitt bei 2000 1/min, Abbildung 7.4 auf Seite 78 als vergrößerte Darstellung, Messstelle Emissionen: nach Drei-Wege-Katalysator	79
7.6	Parameter der Sauerstoffausräumfunktion, schematisch	80
7.7	Effekt der Ausräumfunktion, Lastsprung von 100 Nm auf 200 Nm bei einer Drehzahl von 2000 1/min	81
7.8	Abklingzeit bei Variation der Parameter der Sauerstoff-Ausräumfunktion, Lastsprung von 100 Nm auf 200 Nm bei 2000 1/min	83
7.9	Lage der Betriebspunkte und Aufteilung in konventionellen überstöchiometrischen ($\lambda > 1$) und stöchiometrischen Betrieb ($\lambda = 1$) im WHSC-Prüfzyklus	84

7.10 Gemischter Betrieb aus konventionellem überstöchiometrischen und stöchiometrischem Betrieb im WHSC-Prüfzyklus, Betriebspunkte 2, 4, 5, 7, 9, 10, 11 im stöchiometrischen Betrieb	85
7.11 Vollständig überstöchiometrischer Betrieb im WHSC-Prüfzyklus	86
7.12 Optimierung des WHSC: Erhöhung der AGR-Rate in den überstöchiometrischen Betriebspunkten, Verstellung des Luftverhältnisses in Richtung unterstöchiometrisch in den stöchiometrischen Betriebspunkten . . .	87
7.13 Drehzahl- und Drehmomentverlauf und Aufteilung in konventionellen überstöchiometrischen ($\lambda > 1$) und stöchiometrischen Betrieb ($\lambda = 1$) im WHTC-Prüfzyklus	89
7.14 WHTC mit aktivierter und deaktivierter Ausräumfunktion, Warmstart, Pausenzeit = 0 s, Ausräum- $\lambda = 0,95$, Ausräumzeiten siehe Tabelle A.16 auf Seite 145	90
7.15 Geschwindigkeit und inneres Drehmoment für den NEDC-Prüfzyklus, Pkw Schwungsmassenklasse: 3500 lbs, Nkw Schwungsmassenklasse: 5000 lbs . . .	93
7.16 Geschwindigkeit und inneres Drehmoment für den WLTC-Prüfzyklus, Nkw Schwungsmassenklasse: 6000 lbs	95
7.17 Vergleich Last- und Drehzahlprofile der untersuchten Prüfzyklen mit Vollastlinie des Versuchsmotors	97
8.1 Verlauf Druckverlust über Partikelfilter im WHSC- und WHTC-Prüfzyklus, Ermittlung des Rußeintrags anhand der Differenz des Druckverlusts	100
8.2 Vergleich Rußeintrag im WHSC- und WHTC-Prüfzyklus mittels Druckverlust über Partikelfilter, Mittelwerte aus jeweils drei Messungen	100
8.3 Parametervariation zur Verringerung der Rußemissionen, Messstelle vor Partikelfilter, $n = 1788$ l/min, $M_d = 300$ Nm (Betriebspunkt zehn im WHSC-Prüfzyklus), $\lambda = 0,997$	102
8.4 Vergleich Rußeintrag mittels Druckverlust über Partikelfilter im Prüfzyklus WHSC und WHTC, gemischt stöchiometrischer Betrieb, optimierte Parameter	103
8.5 Masse des Partikelfilters in Abhängigkeit der Temperatur, Messung nach einer Regeneration und nach einem WLTC-Prüfzyklus, Temperaturmessstelle im Partikelfilter außen	105
8.6 Rußeintrag in den Partikelfilter in den Prüfzyklen WHSC, WHTC und NEDC, Bestimmung mittels Wägung	106
8.7 Rußeintrag in den Partikelfilter im Prüfzyklus WLTC: Vergleich vollständig überstöchiometrischen ($\lambda > 1$) mit gemischt stöchiometrischem ($\lambda = 1$) Betrieb	107
8.8 Verlauf der Temperatur und des Rußeintrags in den Partikelfilter über 12 WLTC-Prüfzyklen	108
8.9 Temperaturen vor und nach Partikelfilter und Luftverhältnis während des Endes des achten WLTC-Prüfzyklus	108
8.10 Einflussfaktoren auf die Rußoxidation, unvollständige Aufzählung nach [21–25]	109
8.11 Analyse der Rußoxidation im stöchiometrischen Kennfeldbereich, Serienabgasanlage mit Oxidationskatalysator	111

8.12	Analyse der RuBoxidation im stöchiometrischen Kennfeldbereich, modifizierte Abgasanlage ohne Oxidationskatalysator	112
8.13	Analyse der RuBoxidation im stöchiometrischen Kennfeldbereich, Differenztemperatur der Messstellen Mitte Partikelfilter und Anfang Partikelfilter	113
8.14	Überprüfung der RuBoxidation mittels Bestimmung der eingelagerten Rußmasse, $n = 2250$ 1/min, $M_d = 215$ Nm, modifizierte Abgasanlage ohne Oxidationskatalysator	114
8.15	Vergleich Rußeintrag in den Partikelfilter mit und ohne Oxidationskatalysator im WHSC-Prüfzyklus	114
A.1	Schematischer Aufbau des Fahrzeugprüfstandes, eigene Darstellung nach [26]	141
A.2	Wirkungsgrad Gleichraumprozess η_{GR} in Abhängigkeit vom Verdichtungsverhältnis ε und der Gaszusammensetzung λ als Funktion des Isentropenexponenten κ , eigene Darstellung nach [18] und [19]	143
A.3	Schrittweise Darstellung der Verluste beim Verbrennungsmotor	144
A.4	Abschätzung Rußeintrag nach 1,5 h, Betriebspunkt 2250 1/min und 215 Nm	146
A.5	stationäres Soll-Lambda-Kennfeld, Messstelle vor Oxidationskatalysator	147
A.6	Eingestellte AGR-Rate für den gemischt stöchiometrischen Betrieb	147

Tabellenverzeichnis

1.1	Vergleich der Merkmale der aktuellen Stickoxidnachbehandlungssysteme beim Dieselmotor	2
2.1	Merkmale Brennverfahren [2, 4, 9]	6
2.2	Übersicht der otto- und dieselmotorischen Abgasnachbehandlungssysteme mit ihren Konvertierungs- und Abscheideraten [1, 4, 9, 27, 28]	18
5.1	Kenndaten des Versuchsmotors	39
5.2	Kenndaten des Drei-Wege-Katalysators	40
5.3	Kenndaten des Versuchsfahrzeugs Golf	41
5.4	Kenndaten des Versuchsfahrzeugs Crafter	41
5.5	Geschwindigkeitsdifferenz Crafter und modifizierter Golf, $n = 3900$ 1/min . .	41
5.6	Konditionierte Temperaturen der Motorprüfstandes	42
5.7	Grenzwerte Euro VI in g/kWh für den WHSC- und WHTC-Prüfzyklus [29] .	44
5.8	Grenzwerte Euro 6 in g/km für den NEDC-Fahrzyklus	47
6.1	Untersuchte Amplituden und Frequenzen der Zwanganregung	61
6.2	Kennlinie Frequenz der Lambdaregelung des externen Motorregelungssystem	66
6.3	Vergleich der Wirkungsgradreduzierung bei $\lambda = 1, 1$ und $\lambda = 0,997$	68
6.4	Zusätzliche Daten für die Verlustteilung	69
7.1	Vergleich stöchiometrischer ($\lambda = 1$) mit konventionellem überstöchiometrischen Betrieb ($\lambda > 1$) im modifizierten WHTC-Prüfzyklus, spezifische Emissionen in g/kWh, Mittelwerte aus drei Messungen	77
7.2	Vergleich gemischt stöchiometrischer ($\lambda = 1$) mit vollständig überstöchiometrischem Betrieb ($\lambda > 1$), spezifische Emissionen in g/kWh im Prüfzyklus WHSC, Mittelwerte aus jeweils drei Messungen	85
7.3	Vergleich gemischt stöchiometrischer ($\lambda = 1$) mit vollständig überstöchiometrischem Betrieb ($\lambda > 1$), spezifische Emissionen in g/kWh im Prüfzyklus WHSC, Mittelwerte aus jeweils drei Messungen	87
7.4	Vergleich gemischt stöchiometrischer ($\lambda = 1$) mit vollständig überstöchiometrischem Betrieb ($\lambda > 1$), spezifische Emissionen in g/kWh im Prüfzyklus WHSC, Mittelwerte aus jeweils drei Messungen	88
7.5	Vergleich gemischt stöchiometrischer ($\lambda = 1$) Betrieb mit aktivierter und deaktivierter Ausräumfunktion und mit vollständig überstöchiometrischem Betrieb ($\lambda > 1$), Warmstart, spezifische Emissionen in g/kWh im Prüfzyklus WHTC, Mittelwerte aus jeweils drei Messungen	91
7.6	Spezifische Emissionen in g/kWh im Prüfzyklus WHTC: Vergleich gemischt stöchiometrischer ($\lambda = 1$) mit vollständig überstöchiometrischem Betrieb ($\lambda > 1$), Warmstart, Mittelwerte aus jeweils drei Messungen	92

7.7	Vergleich stöchiometrischer ($\lambda = 1$) Betrieb als Kalt- und Warmstart, spezifische Emissionen in g/kWh im Prüfzyklus WHTC, Mittelwerte aus jeweils drei Messungen, Zeitanteil $\lambda = 1$: 15 %, Drehmomentgrenze 210 Nm	92
7.8	Ergebnisse im NEDC-Prüfzyklus, Vergleich gemischt stöchiometrischer ($\lambda = 1$) mit vollständig überstöchiometrischem ($\lambda > 1$) Betrieb, Kaltstart, Emissionen in g/km, Mittelwerte aus jeweils zehn Messungen	94
7.9	Ergebnisse im WLTC-Prüfzyklus, Vergleich gemischt stöchiometrischer ($\lambda = 1$) mit vollständig überstöchiometrischem ($\lambda > 1$) Betrieb, Kaltstart, Emissionen in g/km, Mittelwerte aus jeweils zehn Messungen	96
7.10	Ergebnisvergleich der untersuchten Prüfzyklen	98
8.1	Darstellung der Emissionen in g/kWh für den vollständig überstöchiometrischen, den gemischt stöchiometrischen sowie den optimierten gemischt stöchiometrischen Betrieb, Mittelwerte aus jeweils drei Messungen	104
8.2	Vermessung WHSC-Prüfzyklus mit gemischt stöchiometrischem Betrieb ($\lambda = 1$) mit und ohne Oxidationskatalysator, spezifische Emissionen in g/kWh, Mittelwerte aus jeweils drei Messungen	115
9.1	Vergleich der Merkmale der Stickoxidnachbehandlungssysteme beim Dieselmotor	117
A.1	Massenanteile [4]	135
A.2	Technische Daten des Versuchsmotors	136
A.3	Technische Daten des Drehmomentenmessflansches	137
A.4	Technische Daten der Asynchronmaschine	137
A.5	Technische Daten der Kraftstoffmessung und -konditionierung	137
A.6	Technische Daten des Luftmassenerfassungssystem	138
A.7	Technische Daten der Temperatursensoren	138
A.8	Technische Daten der Drucksensoren	138
A.9	Technische Daten der AGR-Messgerät	139
A.10	Technische Daten der Abgasmessung	139
A.11	Ergebnisse Kalibrierung Abgasmessanlage (Totzeiten)	139
A.12	Technische Daten der Zylinderdruckindizierung	140
A.13	Technische Daten der Waage	140
A.14	Rolleneinstellwerte Fahrzyklen (Angaben für Scheitelrolle)	142
A.15	Normierte Werte und Dauer der WHSC-Stufen [20]	142
A.16	Dauer Ausräumfunktion in s, Stützstellen inneres Drehmoment in Nm und Drehzahl in 1/min	145

Abkürzungsverzeichnis

l/min	Umdrehungen pro Minute
3WC	Drei-Wege-Katalysator
AG	Aktiengesellschaft
AGR	Abgasrückführung
AI50%	50 % Energieumsetzungspunkt
Al ₂ O ₃	Aluminiumoxid
AV	Auslassventil
AÖ	Auslass öffnet
BaCO ₃	Bariumcarbonat
Ba(NO ₃) ₂	Bariumnitrat
b _e	Spezifischer effektiver Kraftstoffverbrauch
BV	Realer Brennverlauf
°C	Grad Celsius
C	Kohlenstoff
CADC	Common Artemis Driving Cycle
Ce ₂ O ₃	Cer(III)-oxid
CeO ₂	Cer(IV)-oxid
CNG	Compressed Natural Gas
CO	Kohlenmonoxid
CO ₂	Kohlendioxid
Cr	Chrom
C _x H _y	Kohlenwasserstoffe
Δ	Differenz
Δ _R H	Reaktionsenthalpie
DOC	Diesel Oxidationskatalysator
DRZ	Drehzahl
EDC	elektronische Dieselregelung
EGR	Abgasrückführung
ε	Verdichtungsverhältnis
ES	Einlass schließt
η	Wirkungsgrad
ETK	Emulatortastkopf
EU 4/5/6	Abgasnorm Euro 4/5/6 für Pkw
EU IV/V/VI	Abgasnorm Euro IV/V/VI für Nkw
EV	Einlassventil
EX	Expansion
FSN	Filter Smoke Number
ft ³	Kubikfuß
g	Gramm
GR	Gleichraumprozess