

Wissenschaftliche Reihe
Fahrzeugtechnik Universität Stuttgart

RESEARCH

Marta Cudeiro Torruella

Partikelemissions- untersuchungen an einem Ottomotor mit Benzindirekteinspritzung und aufgeladenem Magerbetrieb



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

Marta Cudeiro Torruella

Partikelemissions- untersuchungen an einem Ottomotor mit Benzindirekteinspritzung und aufgeladenem Magerbetrieb

Marta Cudeiro Torruella
Stuttgart, Deutschland

Zugl.: Dissertation Universität Stuttgart, 2016

D93

Wissenschaftliche Reihe Fahrzeugtechnik Universität Stuttgart
ISBN 978-3-658-17186-5 ISBN 978-3-658-17187-2 (eBook)
DOI 10.1007/978-3-658-17187-2

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

*Caminante, son tus huellas
el camino, y nada más;
caminante, no hay camino;
se hace camino al andar.*

“Cantares”, von Antonio Machado

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Zeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin bei der Daimler AG in der Mercedes-Benz Ottomotorenentwicklung. Mein besonders herzlicher Dank gilt zunächst Herrn Prof. M. Bargende für die Übernahme der wissenschaftlichen Betreuung, für seine wertvollen Anregungen und Ratschläge, sowie für das entgegengebrachte Vertrauen. Ferner möchte ich Herrn Prof. U. Spicher für das Interesse an dieser Arbeit und die bereitwillige Übernahme des Korreferats danken.

Besonders möchte ich mich bei allen Kollegen der Daimler AG bedanken, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Mein Dank gilt Herrn A. Waltner für das in mich gesetzte Vertrauen. Für die Initiierung dieses Forschungsthemas, die Diskussions- und Hilfsbereitschaft möchte ich Herrn Dr. Jürgen Fischer besonders danken. Die Betreuung bei der Daimler AG übernahm Herr Dr. Werner Sauter. Neben den sehr anregenden und wertvollen Diskussionen möchte ich mich auch für seine Geduld, bei der Korrektur meiner Arbeit, herzlich bedanken. Für die Unterstützung bei den Messungen mit optischer Sondermesstechnik danke ich den Herren Dr. Eberhard Kraus und Horst Prilop. Weiter geht mein Dank an die Kollegen der Forschung Dr. C. Krüger und Dr. Jürgen Schorr. Des Weiteren möchte ich den Herren Florian Dörrer, Kai Gou und Stefan Demel für die gute Zusammenarbeit und Unterstützung durch die Anfertigung von Studienarbeiten unter meiner Betreuung danken. Auch möchte ich mich bei meinem Doktorandenvorgänger Dr. Thomas Reck bedanken, der mir mit zahlreichen Ratschlägen die Fertigstellung der Dissertation unendlich erleichterte.

An dieser Stelle richtet sich mein herzlichster Dank an meinen Kollegen Dr. Peter Hohner für seine intensive fachliche und grammatikalische Vorkorrektur während der letzten Phase dieser Arbeit. Seine Unterstützung in beispielloser Form war ein Antrieb, in verzweifelten Stunden, weiterzuarbeiten. Herzlichen Dank für seine Freundschaft und jeden anderen wertvollen, unterstützenden Beistand. Ohne ihn wäre die Arbeit nicht zustande gekommen.

Gracias a mis padres, María Teresa y Jose Luis por alentarme en la decisión de iniciar este viaje. Su apoyo incondicional y convicción inquebrantable me han ayudado a superar los momentos de dudas y desánimo. Ellos me han regalado la perspectiva cuando sólo sentía el tiempo escaparse entre mis manos. Ahora es una obra terminada, gracias. Sois mi mejor ejemplo de humildad, disciplina y perseverancia. Uno de las mayores satisfacciones de mi vida habrá sido haceros sentir orgullosos de mí. Os quiero.

Stuttgart

Marta Cudeiro Torruella

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	XI
Tabellenverzeichnis	XV
Nomenklatur	XIX
Kurzfassung	XXI
Abstract	XXIII
1 Einleitung und Aufgabenstellung	1
2 Grundlagen der Gemischbildung und Verbrennung in Ottomotoren	3
2.1 Grundlagen der strahlgeführten Benzindirekteinspritzung	4
2.1.1 Thermodynamik des Magerbrennverfahrens	6
2.1.2 Charakterisierung der Ladungsbewegung	7
2.2 Innermotorische Schadstoffentstehung	9
2.2.1 Gasförmige Emissionen	9
2.2.2 Grundlagen der Rußbildung und -oxidation	11
2.2.3 Thermodynamische und chemische Aspekte der Rußbildung	15
2.2.4 Partikelemission bei Ottomotoren mit Direkteinspritzung	17
3 Versuchsaufbau und Messverfahren	23
3.1 Versuchsaggregate und Prüfstands Aufbau	23
3.1.1 Vierzylinderottomotor	23
3.1.2 Einzylinder-Transparentaggregat	24
3.1.3 Messtechnik am instationären Motorprüfstand	26
3.1.4 Konstruktive Maßnahmen zur Beeinflussung der Ladungsbewegung	28
3.2 Grundlagen der Partikelmesstechnik	32
3.2.1 Herkömmliche Messverfahren	32
3.2.2 Alternative Messverfahren	33
3.3 Optische Partikelmessverfahren und Analysemethoden	35
3.3.1 Strahlungseigenschaften von Verbrennungsflammen	35
3.3.2 Zweifarbenmethode	37
3.3.3 Laserinduzierte Inkadeszenz	39
3.3.4 Hochgeschwindigkeitsvisualisierung der Verbrennung	42
4 Untersuchungen der Partikeleigenschaften bei motorischer Verbrennung	49
4.1 Charakterisierung der Partikelgrößenverteilung	49
4.1.1 Kalter Motorbetrieb	51
4.1.2 Schichtbetrieb	56
4.2 Theoretische Bestimmung der Partikelmasse im Schichtbetrieb	61
4.2.1 Versuchsdurchführung und Auswerteverfahren	61
4.2.2 Ermittlung der effektiven Partikeldichte und der Partikelmasse	65
5 Optische Untersuchung der Partikelentstehung im Schichtbetrieb	71
5.1 Einfluss motorischer Parameter auf die Partikelentstehung	71
5.1.1 Einfluss der Verbrennungsschwerpunktlage	72
5.1.2 Einfluss des Luftverhältnisses	75

5.1.3	Einfluss des Kurbelwinkelabstands zwischen der Einspritzung zur Zündung	77
5.1.4	Einfluss der Einlasssteuerzeiten	80
5.2	Wechselwirkungen zwischen Einspritzung und Rußentstehung	82
5.2.1	Thermodynamische und optische Charakterisierung der Einspritzstrahlgeometrie	83
5.2.2	Arbeitsspielaufgelöste Charakterisierung der Rußstrahlung	89
5.3	Variation der Zylinderinnenströmung durch konstruktive Maßnahmen	91
5.3.1	Einfluss auf die Einspritzstrahlgeometrie	93
5.3.2	Einfluss auf den Verbrennungsablauf	96
5.3.3	Einfluss auf die innermotorische Rußstrahlung und die Partikelemission	100
6	Laserbasierte Erfassung des Abgasrußes im Schichtbetrieb	105
6.1	Zielsetzung und Versuchsdurchführung	105
6.1.1	Versuchsaufbau	106
6.1.2	Vergleichbarkeit der optischen Messtechnik	108
6.1.3	Sensitivitätsanalyse der Rußerfassung im Abgas	111
6.2	Korrelation zwischen Rußkonzentration im Brennraum und im Abgas	114
6.2.1	Analyse der Zyklusschwankungen im Abgasruß	114
6.2.2	Statistische Analyse der auffälligen Arbeitsspiele	117
6.2.3	Vergleich der Versuchsaggregate	123
7	Zusammenfassung und Ausblick	127
7.1	Zusammenfassung	127
7.2	Ausblick	129
	Literaturverzeichnis	131
A	Anhang	143

Abbildungsverzeichnis

2.1	Kreisprozess eines Ottomotors mit stöchiometrischer (links) und überstöchiometrischer Verbrennung (rechts) [159]	4
2.2	Brennverfahren von Ottomotoren mit Direkteinspritzung und Schichtladungsfähigkeit [166]	6
2.3	Schematische Darstellung der Zylinderinnenströmung. Tumble- (links) und Drall-Ladungsbewegung (rechts) [40]	8
2.4	Schadstoffemissionen in Abhängigkeit vom Luftverhältnis λ an einem Vierzylinderottomotor mit Direkteinspritzung und strahlgeführten Brennverfahren	9
2.5	Schematische Darstellung der Partikelbildungsmechanismen [12]	12
2.6	HACA-Reaktion (links) und Polymerisationprozess (rechts) des planaren Wachstums der PAK [38]	13
2.7	Abhängigkeit der Rußbildung bei vorgemischten Flammen von der Verbrennungstemperatur und dem C/O-Verhältnis [42]	15
2.8	Darstellung der Flamme einer Kerze mit diffusiver Verbrennung	16
2.9	Sättigungsgrad und räumliche Darstellung azyklischer und aromatischer Kohlenwasserstoffe und deren Rußneigung [47, 82]	17
2.10	Repräsentative Partikelgrößenverteilung nach [68] und [127]	20
3.1	Brennraumkonfiguration des Mercedes-Benz Vierzylinderottomotors mit Abgasturboaufladung und strahlgeführtem Magerbrennverfahren [15]	23
3.2	Schnittebene des optischen Versuchsträgers	24
3.3	Schnittebene des Einzylinder-Transparentaggregats und der optischen Abgaszelle	25
3.4	Versuchsaufbau und beteiligte Messtechnik am Einzylinder-Transparentaggregat	26
3.5	Darstellung der Einspritzparameter einer Dreifacheinspritzung im Schichtbetrieb	27
3.6	Überblick eingesetzter Einlassvarianten am endoskopischen Vierzylindermotor: Leitsysteme und Lochblechvariante	29
3.7	Darstellung der untersuchten Einlassvarianten	30
3.8	Stationär Tumble-Vermessung der konstruktiven Maßnahmen (Querrohr-Verfahren)	31
3.9	Simulation der Intensität der Tumble-Ladungsbewegung der Einlassnockenwellenvarianten im Schichtbetrieb	32
3.10	Messprinzip des Mobilitätsspektrometers DMS500	34
3.11	Beispiel einer TEM-Probe und schematische Darstellung der Agglomerate	35
3.12	Darstellung verschiedener Strukturen von Agglomeraten und deren fraktalen Dimensionen D_f	35
3.13	Bandenspektren von Gaskomponenten bei der Verbrennung von Kohlenwasserstoffen [83].	36
3.14	KL Verlauf und Rußtemperatur sowie Spannungssignale V_λ der diskreten Wellenlängen	39
3.15	Zeitlicher Verlauf der Signalintensitäten in Abhängigkeit von den Detektionswellenlängen	40

3.16	Schematische Darstellung des LII 200 Messsystems	42
3.17	Visualisierung des Einspritzstrahls am Einzylinder-Transparentaggregat (links) und am Vierzylindermotor (rechts)	44
3.18	Iterative Konturerkennung mittels Chan-Vese Algorithmus	45
3.19	Geometrische Kenngröße der flüssigen Kraftstoffphase	46
3.20	Darstellung von drei Arbeitsspielen mit verschiedener Drehungleichförmigkeit und der resultierenden kurbelwinkel-basierte Bildaufnahme	47
3.21	Sensitivitätsanalyse des Einflusses der Drehungleichförmigkeit auf die Bildauf- Bildaufnahme während des Einspritzvorganges	48
4.1	Mittlerer Anzahldurchmesser CMD während des NEFZ Zyklus	50
4.2	Untersuchung der Mehrfacheinspritzung im Katalysator-Heizen im Fahrprofil NEFZ	52
4.3	Untersuchung der Mehrfacheinspritzung im Warmlauf im Fahrprofil NEFZ . .	54
4.4	Variation der Verbrennungsschwerpunktlage im Schichtbetrieb bei $n_{mot} = 2000 \text{ min}^{-1}$ und $p_{mi} = 3 \text{ bar}$	57
4.5	Variation des Differenzzündwinkels DZW im Schichtbetrieb bei $n_{mot} = 2000 \text{ min}^{-1}$ und $p_{mi} = 3 \text{ bar}$	58
4.6	TEM-Aufnahme eines Partikels im Schichtbetrieb	59
4.7	Charakterisierung der Morphologie der Primärpartikel im Schichtbetrieb. Von links nach rechts: $D_{Projiziert}$, $A_{Projiziert}$ und O/C-Verhältnis	60
4.8	Lognormale Partikelanzahl $\frac{dN}{d\log(D_p)}$ ($q=1$), Partikeloberflächen- $\frac{dS}{d\log(D_p)}$ ($q=2$) und Partikelvolumenverteilung $\frac{dV}{d\log(D_p)}$ ($q=3$)	63
4.9	Parametrisierung der Größenverteilung der Partikelanzahl und Auswerteprozedur zur Modellierung der Partikelmassenkonzentration $M_{Total,DMS}$	66
4.10	Partikelanzahlkonzentration des DMS 500 über der Partikelanzahlkonzentration des APC 489	67
4.11	Abhängigkeit der Konstante k von der effektiven Dichte ρ_{eff} und vom Index b .	68
4.12	Theoretische Massenkonzentrationen $M_{Akkum, DMS}$ über der gemessenen Massenkonzentration $M_{AVL 483}$	69
4.13	Verteilung der Partikelanzahlkonzentration und -massenkonzentration (nach Gl. 4.13) über dem Mobilitätsdurchmesser im Akkumulationsmodus	70
5.1	Strahlgeometrie der ersten und zweiten Einspritzung für die Variation von $H_{50\%}$. $n_{mot} = 2000 \text{ min}^{-1}$ und $p_{mi} = 3 \text{ bar}$ im Schichtbetrieb	73
5.2	Variation der Verbrennungsschwerpunktlage $H_{50\%}$. $n_{mot} = 2000 \text{ min}^{-1}$ und $p_{mi} = 3 \text{ bar}$ im Schichtbetrieb	74
5.3	Thermodynamische Analyse der Variation der Verbrennungsschwerpunktlage $H_{50\%}$ bei $n_{mot} = 2000 \text{ min}^{-1}$ und $p_{mi} = 3 \text{ bar}$ im Schichtbetrieb	75
5.4	Variation des globalen Luftverhältnisses λ . $n_{mot} = 2000 \text{ min}^{-1}$ und $p_{mi} = 3 \text{ bar}$ im Schichtbetrieb	76
5.5	Thermodynamische Analyse von Brennverlauf, Brennraumdruck und Gastemperatur. Variation des globalen Luftverhältnisses im Schichtbetrieb . . .	77
5.6	Variation des Differenzzündwinkels DZW. $n_{mot} = 2000 \text{ min}^{-1}$ und $p_{mi} = 3 \text{ bar}$ im Schichtbetrieb	78
5.7	Thermodynamische Analyse von Brennverlauf, Brennraumdruck und Gastemperatur. Variation des Differenzzündwinkels DZW im Schichtbetrieb . .	79

5.8	Heizverläufe $H_{5\%}$, $H_{50\%}$ und $H_{90\%}$ bei Variation des Differenzzündwinkels DZW im Schichtbetrieb	79
5.9	Berechnung der internen Restgasmasse und des Luftverhältnisses bei der Variation von Steuerzeit Einlass Öffnet EÖ. $n_{\text{mot}} = 2000 \text{ min}^{-1}$ und $p_{\text{mi}} = 3 \text{ bar}$ im Schichtbetrieb	80
5.10	Variation der Steuerzeit Einlass Öffnet EÖ. $n_{\text{mot}} = 2000 \text{ min}^{-1}$ und $p_{\text{mi}} = 3 \text{ bar}$ im Schichtbetrieb	81
5.11	Heizverläufe $H_{5\%}$, $H_{50\%}$ und $H_{90\%}$ bei Variation der Steuerzeit Einlass Öffnet EÖ. $n_{\text{mot}} = 2000 \text{ min}^{-1}$ und $p_{\text{mi}} = 3 \text{ bar}$ im Schichtbetrieb	82
5.12	Thermodynamische Kenngrößen der vier untersuchten Injektoren. $n_{\text{mot}} = 2000 \text{ min}^{-1}$ und $p_{\text{mi}} = 3 \text{ bar}$ im Schichtbetrieb	84
5.13	Modaler und integrierter Brennverlauf sowie mittlere Gastemperatur über dem Kurbelwinkel für alle vier Injektoren im Schichtbetrieb	84
5.14	Modale und kumulierte Häufigkeitsverteilung der Strahlausbreitung der zweiten Einspritzung bei 22.2 °KW v.ZOT von vier Piezo-Injektoren im Schichtbetrieb	85
5.15	Mittlere integrale Helligkeit über Kurbelwinkel MIH_{KW} der vier Piezo-Injektoren im Schichtbetrieb	86
5.16	Häufigkeitsverteilung der Rußstrahlung im Brennraum während des Verbrennungsprozesses. $n_{\text{mot}} = 2000 \text{ min}^{-1}$ und $p_{\text{mi}} = 3 \text{ bar}$ im Schichtbetrieb	87
5.17	Streudiagramme der MIH_{ASP} gegenüber den Umsatzpunkten $H_{5\%}$, $H_{50\%}$ und $H_{90\%}$. MIH_{ASP} , $H_{50\%}$ und $H_{90\%}$ über der Strahlausbreitung der zweiten Einspritzung	89
5.18	Streudiagramm der MIH_{ASP} über der Strahlausbreitung der zweiten Einspritzung. $n_{\text{mot}} = 2000 \text{ min}^{-1}$ und $p_{\text{mi}} = 3 \text{ bar}$ im Schichtbetrieb	90
5.19	Mittelwert und Standardabweichung der Strahlkenngrößen der zweiten Einspritzung. $n_{\text{mot}} = 2000 \text{ min}$ und $p_{\text{mi}} = 3 \text{ bar}$ im Schichtbetrieb	94
5.20	Mittelwert und Standardabweichung der Strahlkenngrößen der zweiten Einspritzung. $n_{\text{mot}} = 3000 \text{ min}^{-1}$ und $p_{\text{mi}} = 3 \text{ bar}$ im Schichtbetrieb	96
5.21	Maximaler Druckanstieg, Verbrennungsdauer, und Kovarianz des indizierten Mitteldrucks. Untere Reihe: Abgasemission und Brennverlauf. $n_{\text{mot}} = 2000 \text{ min}^{-1}$ und $p_{\text{mi}} = 3 \text{ bar}$ im Schichtbetrieb	97
5.22	Obere Reihe: Maximaler Druckanstieg, Verbrennungsdauer und Kovarianz des indizierten Mitteldrucks. Untere Reihe: Abgasemission und Brennverlauf. $n_{\text{mot}} = 3000 \text{ min}^{-1}$ und $p_{\text{mi}} = 3 \text{ bar}$ im Schichtbetrieb	98
5.23	Korrelation zwischen dem maximalen Druckanstieg DP_{Max} und der Partikelanzahlkonzentration für die jeweiligen Einlassvarianten im Schichtbetrieb	99
5.24	Mittlere integrale Helligkeit der verschiedenen Einlassvarianten über dem Kurbelwinkel MIH_{KW} im Schichtbetrieb. Messungen ohne Laserbeleuchtung	100
5.25	Korrelation der mittleren integralen Helligkeit MIH_{Messung} und der Partikelanzahl für die jeweiligen Einlassvarianten im Schichtbetrieb	101
6.1	Visualisierter Brennraumbereich der Farbkamera und des Farbtemperatur-Messgeräts	106
6.2	Synchronisationsschema der Hochgeschwindigkeitskameras und des gekoppelten Laserpulses. Triggerimpulse und Kenngrößen bei $n_{\text{mot}} = 2000 \text{ min}^{-1}$	107
6.3	Messaufbau des Messgeräts LII 200 am Einzylinder Transparentaggregat in der Messposition. Rechtes Bild: Nahaufnahme der optischen Abgaszelle	107
6.4	Obere Messreihe: Lichthelligkeit $IH_{60\text{°KW n.ZOT}}$ über KL_{End} bei 60 °KW n.ZOT . Untere Messreihe: MIH_{ASP} über $KL_{\text{Mittelwert}}$	109

6.5	Maximale Strahlungssignale $S_{LII_{Max}}$ im "Skip-Fire" Modus. $n_{mot} = 2000 \text{ min}^{-1}$ und $p_{mi} = 3 \text{ bar}$ im Schichtbetrieb	112
6.6	Eindimensionale Berechnung der Einlass- und Auslassmassenströme bei unterschiedlichen Aufnahmezeitpunkten im Schichtbetrieb	113
6.7	Korrelation zwischen relativer Rußkonzentration im Brennraum KL und Rußvolumenkonzentration im Abgas f_v im Schichtbetrieb	115
6.8	Korrelation zwischen der integralen Lichthelligkeit im Brennraum $IH_{60^\circ KW n.ZOT}$ und der Rußvolumenkonzentration im Abgas f_v im Schichtbetrieb	116
6.9	Statistische Sortierung von 200 Verbrennungszyklen nach der Kenngröße $IH_{RGB,60^\circ KW n.ZOT}$	117
6.10	Häufigkeitsverteilung der flüssigen Kraftstoffphase der Einspritzungen. Ergebnisse für das 10. und 90. Perzentil der Verbrennungszyklen nach $IH_{RGB,60^\circ KW n.ZOT}$	118
6.11	Mittlere integrale Helligkeit MIH , OH-Signal, Rußtemperatur und relative Rußkonzentration über dem Kurbelwinkel	119
6.12	Mittelwertbilder der seitlichen Brennraumvisualisierung für das 10. und 90. Perzentil der Verbrennungszyklen	121
6.13	Obere Reihe: $H_{5\%}$, $H_{50\%}$ und $H_{90\%}$ der Verbrennungszyklen im 10. und 90. Perzentil. Untere Reihe: Verbrennungsdauer, maximaler Druck und Mitteldruck p_{mi}	122
6.14	Mittlere integrale Helligkeit über dem Kurbelwinkel MIH_{KW} am Einzylinder-Transparentaggregat und am Vierzylindermotor im Schichtbetrieb	123
6.15	Vergleich der Einspritzzeiten und des Zündvorgangs am Einzylinder-Transparentaggregat und am Vierzylindermotor	124
6.16	Vergleich der Umsatzpunkte $H_{5\%}$, $H_{50\%}$, $H_{90\%}$ am Einzylinder-Transparentaggregat und am Vierzylindermotor bei gleichem Betriebspunkt im Schichtbetrieb	125
A.1	Ergebnisse aus dem Injektorstrahlabor der untersuchten Injektoren im Kapitel 5.2	131

Tabellenverzeichnis

1.1	Europäische Emissionsgrenzwerte für Ottomotoren mit Direkteinspritzung [24, 25, 26, 29]. (*) Bis 2017 gilt ein Emissionsgrenzwert von $6 \times 10^{12} \frac{\#}{\text{km}}$	2
3.1	Technische Kenngrößen des Versuchsträgers	23
3.2	Tabelle mit relevanten Motorparametern im Schichtbetrieb	27
3.3	Konstruktive Maßnahmen zur Beeinflussung der Ladungsbewegung	30
3.4	Technische Daten des Messgeräts LII 200 [3]	41
3.5	Technische Daten der Kamera LaVision HighSpeedStar 8 [84]	42
3.6	Kameraeinstellungen am Einzylinder-Transparentaggregat [116, 117]	43
3.7	Kenngrößen der innermotorischen Lichthelligkeit durch hoch-aufgelöste endoskopische Visualisierungsmethoden	44
4.1	Variationen der Mehrfacheinspritzung im Homogen-Split Betrieb während der Katalysator-Heiz-Phase. * Ergibt sich aus der motorischen Lasteinstellung . . .	52
4.2	Variation der Mehrfacheinspritzung während der Warmlauf-Phase im Homogen-Split Betrieb. * Ergibt sich aus der motorischen Lasteinstellung . . .	54
4.3	Einspritzstrategie für den Ausgangspunkt bei $n_{\text{mot}} = 2000 \text{ min}^{-1}$ und $p_{\text{mi}} = 3 \text{ bar}$ im Schichtbetrieb	56
4.4	Zusammenfassung der untersuchten Einspritzstrategien im Schichtbetrieb bei $n_{\text{mot}} = 2000 \text{ min}^{-1}$ und $p_{\text{mi}} = 3 \text{ bar}$ ($t_{i1} = \mu\text{s}$). *Zwei Messungen	61
5.1	Überblick der Verbrennungsparameter im Schichtbetrieb der Ausgangsmessung bei $n_{\text{mot}} = 2000 \text{ min}^{-1}$ und $p_{\text{mi}} = 3 \text{ bar}$	71
5.2	Übersicht der variierten Verbrennungsparameter im Schichtbetrieb. *Ausgangsmessung	72
5.3	Ausgangsbedatung für die Untersuchung mit verschiedenen Piezo-Injektoren im Schichtbetrieb	83
5.4	Quadrantenhäufung der mittleren integralen Helligkeit MIH_{ASP}	91
5.5	Messparameter der Kamera High Speed Star8	92
5.6	Einspritzparameter für die Untersuchung mit unterschiedlichen Ladungsbewegungen im Schichtbetrieb	93
6.1	Zusammenfassung der untersuchten optischen Kenngrößen am Einzylinder Transparentaggregat. *FTM=Farbtemperatur-Messgerät	108
6.2	Überblick über die Einspritzparameter der Referenzmessung im Schichtbetrieb	114
6.3	Stationäre Motortemperaturen am Einzylinder-Transparentaggregat und am Vierzylindermotor. $n_{\text{mot}} = 2000 \text{ min}^{-1}$ und $p_{\text{mi}} = 3 \text{ bar}$ im Schichtbetrieb	126

Nomenklatur

α_{Max}	Maximale Anzahl an Bildern
ϵ	Verdichtungsverhältnis
η_{th}	Thermodynamischer Wirkungsgrad
λ	Luftverhältnis
$\rho_{\text{O}_{\text{Luft}}}$	Luftdichte
ρ_{eff}	Effektive Partikeldichte
ρ_{OKS}	Kraftstoffdichte
RDE	Real Driving Emissions
AGR	Abgasrückführrate
ASP	Arbeitsspiel
AS	Auslass Schließt
A_{Max}	Maximale Anzahl an Arbeitsspielen
b_{ij}	Koagulationskoeffizient
CH_4	Methan
CLD	Chemilumineszenzdetektor
CO	Kohlenmonoxid
C_2H_2	Acetylen
C_2H_3	Vinyl
C_2H_4	Ethen
C_3H_6	Propylen
DZW	Differenzzündwinkel
D_f	Fraktale Dimension des Rußagglomerates
d_p	Primärpartikeldurchmesser
EDX	Energiedispersive Röntgenstrahlung End
EOI	of Injection
EÖ	Einlass Öffnet

FID	Flammenionisationsdetektor
FTM	Farbtemperatur-Messgerät
f_v	Rußvolumenbruch. Anteil der Partikelmasse am Gesamtvolumen
H	Wasserstoff
H ₂ O	Wasser
H _{50%}	Umsatzpunkt von 50 Prozent des Heizfortschritts
H _{5%}	Umsatzpunkt von 5 Prozent des Heizfortschritts
H _{90%}	Umsatzpunkt von 90 Prozent des Heizfortschritts
IH _{Bild}	Integrale Helligkeit eines Bildes
KL	Relative Rußkonzentration
k	Isentropenexponent
k _f	Fraktaler Faktor
MIH _{KW}	Mittlere integrale Helligkeit pro Kurbelwinkel gemittelt aus n Arbeitsspielen
MIH _{ASP}	Mittlere integrale Helligkeit pro Arbeitsspiel gemittelt aus n Bildern
MIH _{Messung}	Mittlere integrale Helligkeit einer Messung
m _{Lst}	Stöchiometrische Luftmasse die zur Verbrennung notwendig ist
m _L	Luftmasse
NO	Stickmonoxid
NO _x	Stickoxide
NO ₂	Stickstoffdioxid
N ₂	Stickstoff
N ₂ O	Distickstoffoxid
N _n	Partikelanzahlkonzentration bei der Größenklasse n
OH	Hydroxylradikal
O ₃	Ozon
PAK	Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe
PM	Partikelmassenkonzentration