

Marta Cudeiro Torruella

# Partikelemissions- untersuchungen an einem Ottomotor mit Benzindirekteinspritzung und aufgeladenem Magerbetrieb



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-Fahrtsimulator, 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. Hans-Christian Reuss  
Lehrstuhl Kraftfahrzeugmechatronik,  
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

---

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 grammatischen 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
<b>1 Einleitung und Aufgabenstellung . . . . .</b>	<b>1</b>
<b>2 Grundlagen der Gemischbildung und Verbrennung in Ottomotoren . . . . .</b>	<b>3</b>
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
<b>3 Versuchsaufbau und Messverfahren . . . . .</b>	<b>23</b>
3.1 Versuchssaggregate und Prüfstandsaufbau . . . . .	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
<b>4 Untersuchungen der Partikeleigenschaften bei motorischer Verbrennung . . . . .</b>	<b>49</b>
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
<b>5 Optische Untersuchung der Partikelentstehung im Schichtbetrieb . . . . .</b>	<b>71</b>
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
<b>6</b>	<b>Laserbasierte Erfassung des Abgasrusses im Schichtbetrieb . . . . .</b>	<b>105</b>
6.1	Zielsetzung und Versuchsdurchführung . . . . .	105
6.1.1	Versuchsaufbau . . . . .	106
6.1.2	Vergleichbarkeit der optischen Messtechnik . . . . .	108
6.1.3	Sensitivitätsanalyse der Ruß erfassung 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 Versuchsggregate . . . . .	123
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick . . . . .</b>	<b>127</b>
7.1	Zusammenfassung . . . . .	127
7.2	Ausblick . . . . .	129
<b>Literaturverzeichnis . . . . .</b>	<b>131</b>	
<b>A Anhang . . . . .</b>	<b>143</b>	

# 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 $\lambda$ an einem Vierzylinderottomotor mit Direkteinspritzung und strahlgeführtem 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 $V_\lambda$ 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 Differenzündwinkels 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: $D_{\text{Projiziert}}$ , $A_{\text{Projiziert}}$ 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 $M_{\text{Total,DMS}}$ . . . . .	66
4.10 Partikelanzahlkonzentration des DMS 500 über der Partikelanzahlkonzentration des APC 489 . . . . .	67
4.11 Abhängigkeit der Konstante $k$ von der effektiven Dichte $\rho_{\text{eff}}$ und vom Index $b$ .	68
4.12 Theoretische Massenkonzentrationen $M_{\text{Akkum}, \text{DMS}}$ über der gemessenen Massenkonzentration $M_{\text{AVL 483}}$ . . . . .	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 $\lambda$ . $n_{mot} = 2000 \text{ min}^{-1}$ 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 Differenzündwinkels 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 Differenzündwinkels 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 Restgassmasse und des Luftverhältnisses bei der Variation von Steuerzeit Einlass Öffnet EÖ. $n_{mot} = 2000 \text{ min}^{-1}$ und $p_{mi} = 3 \text{ bar}$ im Schichtbetrieb . . . . .	80
5.10	Variation der Steuerzeit Einlass Öffnet EÖ. $n_{mot} = 2000 \text{ min}^{-1}$ und $p_{mi} = 3 \text{ bar}$ im Schichtbetrieb . . . . .	81
5.11	Heizverläufe $H_{5\%}$ , $H_{50\%}$ und $H_{90\%}$ bei Variation der Steuerzeit Einlass Öffnet EÖ. $n_{mot} = 2000 \text{ min}^{-1}$ und $p_{mi} = 3 \text{ bar}$ im Schichtbetrieb . . . . .	82
5.12	Thermodynamische Kenngrößen der vier untersuchten Injektoren. $n_{mot} = 2000 \text{ min}^{-1}$ und $p_{mi} = 3 \text{ bar}$ im Schichtbetrieb . . . . .	84
5.13	Modaler und integrierter Brennverlauf sowie mittlere Gasttemperatur über dem Kurbelwinkel für alle vier Injektoren im Schichtbetrieb . . . . .	84
5.14	Modale und kumulierte Häufigkeitsverteilung der Strahlausbreitung der zweiten Einspritzung bei $22.2^\circ \text{KW v.ZOT}$ von vier Piezo-Injektoren im Schichtbetrieb . . . . .	85
5.15	Mittlere integrale Helligkeit über Kurbelwinkel $\text{MIH}_{\text{KW}}$ der vier Piezo-Injektoren im Schichtbetrieb . . . . .	86
5.16	Häufigkeitsverteilung der Rußstrahlung im Brennraum während des Verbrennungsprozesses. $n_{mot} = 2000 \text{ min}^{-1}$ und $p_{mi} = 3 \text{ bar}$ im Schichtbetrieb . . . . .	87
5.17	Streudiagramme der $\text{MIH}_{\text{ASP}}$ gegenüber den Umsatzpunkten $H_{5\%}$ , $H_{50\%}$ und $H_{90\%}$ . $\text{MIH}_{\text{ASP}}$ , $H_{50\%}$ und $H_{90\%}$ über der Strahlausbreitung der zweiten Einspritzung . . . . .	89
5.18	Streudiagramm der $\text{MIH}_{\text{ASP}}$ über der Strahlausbreitung der zweiten Einspritzung. $n_{mot} = 2000 \text{ min}^{-1}$ und $p_{mi} = 3 \text{ bar}$ im Schichtbetrieb . . . . .	90
5.19	Mittelwert und Standardabweichung der Strahlkenngrößen der zweiten Einspritzung. $n_{mot} = 2000 \text{ min}$ und $p_{mi} = 3 \text{ bar}$ im Schichtbetrieb . . . . .	94
5.20	Mittelwert und Standardabweichung der Strahlkenngrößen der zweiten Einspritzung. $n_{mot} = 3000 \text{ min}^{-1}$ und $p_{mi} = 3 \text{ bar}$ im Schichtbetrieb . . . . .	96
5.21	Maximaler Druckanstieg, Verbrennungsdauer, und Kovarianz des indizierten Mitteldrucks. Untere Reihe: Abgasemission und Brennverlauf. $n_{mot} = 2000 \text{ min}^{-1}$ und $p_{mi} = 3 \text{ bar}$ im Schichtbetrieb . . . . .	97
5.22	Obere Reihe: Maximaler Druckanstieg, Verbrennungsdauer und Kovarianz des indizierten Mitteldrucks. Untere Reihe: Abgasemission und Brennverlauf. $n_{mot} = 3000 \text{ min}^{-1}$ und $p_{mi} = 3 \text{ bar}$ im Schichtbetrieb . . . . .	98
5.23	Korrelation zwischen dem maximalen Druckanstieg $\text{DP}_{\text{Max}}$ und der Partikelanzahlkonzentration für die jeweiligen Einlassvarianten im Schichtbetrieb . . . . .	99
5.24	Mittlere integrale Helligkeit der verschiedenen Einlassvarianten über dem Kurbelwinkel $\text{MIH}_{\text{KW}}$ im Schichtbetrieb. Messungen ohne Laserbeleuchtung . . . . .	100
5.25	Korrelation der mittleren integralen Helligkeit $\text{MIH}_{\text{Messung}}$ 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 $n_{mot} = 2000 \text{ min}^{-1}$ . . . . .	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 $\text{IH}_{60^\circ \text{KW n.ZOT}}$ über $\text{KL}_{\text{End}}$ bei $60^\circ \text{KW n.ZOT}$ . Untere Messreihe: $\text{MIH}_{\text{ASP}}$ über $\text{KL}_{\text{Mittelwert}}$ . . . . .	109

6.5	Maximale Strahlungssignale $S_{LI_{Max}}$ 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 $IH_{60^\circ \text{KW n.ZOT}}$ und der Rußvolumenkonzentration im Abgas $f_v$ im Schichtbetrieb . . . . .	116
6.9	Statistische Sortierung von 200 Verbrennungszyklen nach der Kenngröße $IH_{RGB,60^\circ \text{KW n.ZOT}}$ . . . . .	117
6.10	Häufigkeitsverteilung der flüssigen Kraftstoffphase der Einspritzungen. Ergebnisse für das 10. und 90. Perzentil der Verbrennungszyklen nach $IH_{RGB,60^\circ \text{KW n.ZOT}}$ . . . . .	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 $H_{50\%}$ der Verbrennungszyklen im 10. und 90. Perzentil. Untere Reihe: Verbrennungsduer, maximaler Druck und Mitteldruck $P_{mi}$ . . . . .	122
6.14	Mittlere integrale Helligkeit über dem Kurbelwinkel $MIH_{\text{KW}}$ 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 Injektorstrahllabor 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 $p_{\text{mi}} = 3 \text{ bar}$ ( $t_1 = \mu\text{s}$ ). *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 varierten 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 $\text{MIH}_{\text{ASP}}$ . . . . .	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

$\alpha_{\text{Max}}$	Maximale Anzahl an Bildern
$\epsilon$	Verdichtungsverhältnis
$\eta_{\text{th}}$	Thermodynamischer Wirkungsgrad
$\lambda$	Luftverhältnis
$\rho_{\text{oLuft}}$	Luftdichte
$\rho_{\text{eff}}$	Effektive Partikeldichte
$\rho_{\text{OKS}}$	Kraftstoffdichte
RDE	Real Driving Emissions
AGR	Abgasrückführrate
ASP	Arbeitsspiel
AS	Auslass Schließt
$A_{\text{Max}}$	Maximale Anzahl an Arbeitsspielen
$b_{ij}$	Koagulationskoeffizient
$\text{CH}_4$	Methan
CLD	Chemilumineszenzdetektor
CO	Kohlenmonoxid
$\text{C}_2\text{H}_2$	Acetylen
$\text{C}_2\text{H}_3$	Vinyl
$\text{C}_2\text{H}_4$	Ethen
$\text{C}_3\text{H}_6$	Propylen
DZW	Differenzzündwinkel
$D_f$	Fraktale Dimension des Rußagglomerates
$d_p$	Primärpartikeldurchmesser
EDX	Energiedispersiv Röntgenstrahlung End
EOI	of Injection
EÖ	Einlass Öffnet

---

FID	Flammenionisationsdetektor
FTM	Farbtemperatur-Messgerät
$f_v$	Rußvolumenbruch. Anteil der Partikelmasse am Gesamtvolumen
H	Wasserstoff
$H_2O$	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
$MIH^{\circ}_{KW}$	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
$N_2O$	Distickstoffoxid
$N_n$	Partikelanzahlkonzentration bei der Größenklasse n
OH	Hydroxylradikal
$O_3$	Ozon
PAK	Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe
PM	Partikelmassenkonzentration