

Johannes Ernst

Experimentelle und numerische Analyse des Impulses von aufbereitetem Kraftstoffspray im düsennahen Bereich der Dieseleinspritzung



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

Johannes Ernst

Experimentelle und numerische Analyse des Impulses von aufbe- reitetem Kraftstoffspray im düsennahen Bereich der Dieseleinspritzung

Johannes Ernst
Stuttgart, Deutschland

Zugl.: Dissertation Universität Stuttgart, 2014

D93

Wissenschaftliche Reihe Fahrzeugtechnik Universität Stuttgart
ISBN 978-3-658-09384-6 ISBN 978-3-658-09385-3 (eBook)
DOI 10.1007/978-3-658-09385-3

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 2015

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.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Fachmedien Wiesbaden ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media (www.springer.com)

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand in der Abteilung Dieselmotoren (RPD) im Bereich Forschung/Vorentwicklung (RD) bei der Daimler AG am Standort Stuttgart-Untertürkheim.

Ich möchte mich bei allen Mitarbeitern des Teams Einspritzung und ganz besonders bei Herrn Dr.-Ing. Thorsten Hergemöller sowie Herrn Dr.-Ing. Lothar Herrmann bedanken, die mir durch zahlreiche Diskussionen bei der Bearbeitung der Fragestellungen, die sich aus dieser Arbeit ergeben haben, Ideen geliefert haben und mich tatkräftig unterstützt haben. Selbstverständlich möchte ich mich auch für die Unterstützung der Studenten Sascha Sauther, Jochen Pfitzer, Michael Funk und Corin Fehrenbach bedanken, deren Abschlussarbeiten ich während dieser Zeit betreut habe.

Darüber hinaus möchte ich mich bei Herrn Dr.-Ing. Christian Krüger und Frau Dipl. Ing. Katja Nording bedanken, die mich in die 1D-Simulationsmodelle eingewiesen haben und 3D-CFD-Simulationen übernommen haben.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. M. Bargende, der mich wissenschaftlich betreut hat und durch seine besonders weite Sicht immer wieder neue Anregungen einbringen konnte. Außerdem bedanke ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. G. Wachtmeister für die Übernahme des Koreferats.

Stuttgart

Johannes Ernst

Kurzfassung

In der innermotorischen Verbrennung kommt dem Einspritzsystem vor allem im Bereich der Dieselanwendung eine besondere Bedeutung im Bezug auf die Schadstoffemissionen zu. Die grundlegende Erforschung der relevanten Zusammenhänge bei der Zerstäubung und der Verdampfung des Kraftstoffes ist das Ziel vielfältiger Untersuchungen und der Einsatzzweck ebenso vieler Messtechniken. Die verwendeten Messtechniken lassen sich in optische, hydraulische und mechanische Messtechniken gliedern. Hydraulische Messverfahren werden schon lange in großem Stil eingesetzt, wogegen optische Verfahren erst mit der Entwicklung der rechnergestützten Bildverarbeitung größere Verbreitung gefunden haben. Mechanischen Messtechniken werden ebenfalls schon lange eingesetzt, haben aber nicht die Bedeutung von optischen oder hydraulischen Prinzipien erlangt. Spezielle mechanische Messtechniken wie die Strahlkraftmessung können aber als Bindeglied in der Analyseketten von Injektorqualifikationen zwischen den hydraulischen, optischen und thermodynamischen Messtechniken zusätzliche Informationen liefern und helfen, bestimmte Fragestellungen zu klären. Der Grund für die geringere Bedeutung der Strahlkraftanalyse liegt unter anderem in der geringen Kenntnis der bei der Messung auftretenden Phänomene und der schwierigen Validierung der Messergebnisse.

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Messung der Strahlkraft bzw. des Strahlimpulses. Im Zuge der Bearbeitung wurde ein Aufbau zur Messung des Strahlimpulsflusses in Betrieb genommen. Die große Anzahl der bei einer Messung anfallenden Messdaten wurde mit eigens entwickelten, verschiedenartigen Algorithmen ausgewertet. Bei der Analyse der so aufbereiteten Messdaten sind zahlreiche Phänomene aufgetreten, die die Messwerte beeinflussen, für die es in der Literatur aber nur wenige unzureichende Erklärungen gibt. Ein

zentrales Thema der Arbeit widmet sich deshalb der Ergründung der auftretenden Phänomene und der Validierung der Messtechnik unter Einbeziehung hydraulischer und optischer Messtechniken sowie Simulationen. Im Zuge der Validierung konnte das strahlkraftspezifische Phänomen der so genannten *Strahlbugwelle* aufgeklärt werden und die Strahlbewertungsgröße *Aufbruchlänge* relativiert werden.

Verschiedene Messungen und Simulationen haben gezeigt, dass die Geometrie der zur Messung erforderlichen Impulsflussumformer entscheidenden Einfluss auf die Qualität der Messergebnisse nimmt. Durch eine Variation verschiedener Prinzipien und Geometrien zur Messumformung konnte eine Optimierung der Messtechnik vorgenommen werden.

Mit einer Untersuchung von verschiedenen Injektorvarianten konnte schließlich die Fähigkeit der Messtechnik demonstriert werden, bestimmte Effekte zu charakterisieren, die mit optischen und hydraulischen Messtechniken nicht sichtbar werden und den Einfluss der Art der Lagerung der Düsennadel auf die Ausformung der Einspritzstrahlen zu bestimmen.

Abstract

There is a high influence for the injection system in combustion engines on the emissions, especially in diesel engines. Therefore, the basic research of the relevant correlations in spray breakup and evaporation is the target of many experiments and measuring techniques. The measuring principles can be divided in hydraulic, optic and mechanic techniques. Hydraulic measuring techniques are commonly used for a long time, whereas optic principles found their popularity mainly after the development of computational image processing. Mechanical measuring techniques are also known for a long time, but did not reach the importance of optical or hydraulic principles. Nevertheless, special mechanic measurement techniques like the spray force measurement can be used to support optic, hydraulic and thermodynamic measurement techniques in the analyzing chain of qualifying injectors. The reason for the relatively low importance of the spray force measurement lies partly in the poor knowledge of the upcoming phenomena during the measurement and the difficult validation of the results.

The present thesis deals with the spray force measurement and the spray momentum. As a basic feature, the setup of a dedicated measurement device was performed in the beginning of the work. To deal with the huge amount of measurement data, different algorithms to analyze the data had to be developed. During the Analysis of the so prepared measurement data, several phenomena showed up, that influence the results and that are hardly described in literature. Therefore, a big part of this work is about the investigation of these phenomena and a validation of the measurement principle by the use of hydraulic and optic measurement techniques and simulations. During the validation process, the phenomenon called *spray bow wave* could be explained and the value *spray breakup length* could be resolved.

By examining different types of injectors, the ability to characterize certain effects of sprays that you can't see with other measurement tools and the influence of the guidance of the injector needle on the spray development could be shown.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	VII
Abstract	IX
Nomenklatur	XIII
1 Einleitung	1
2 Motivation und Zielsetzung	7
3 Grundlagen des Strahlzerfalls	9
3.1 Charakterisierung der Strahlzerfallsbereiche	9
3.2 Auswirkung der Düseninnenströmung auf den Strahlzerfall	17
4 Sprayanalyse – Stand der Technik	21
4.1 Messtechnik	21
4.1.1 Optische Verfahren	22
4.1.2 Laseroptische Messverfahren	31
4.1.3 Hydraulische Messtechniken	36
4.1.4 Mechanische Messverfahren: Strahlkraftmessung	38
4.2 Bewertungsgrößen aus der Strahlkraftmessung	42
5 Messsystem	47
5.1 Aufbau	47
5.2 Injektorfunktionsweise	53

6 Validierung der Messtechnik	59
6.1 Einleitung	59
6.2 Plausibilisierung durch Parametervariation	59
6.3 Quasi 2D-Simulation	65
6.3.1 Beschreibung des Simulationsmodells	66
6.3.2 Randbedingungen und Parametervariationen	69
6.3.3 Simulationsergebnisse und Abgleich mit den experimentellen Untersuchungen	71
6.4 Validierung durch Abgleich der Prallelemente	84
6.4.1 Analyse der Strahlaufbruchlänge	86
6.4.2 Vergleich des düsen nahen Gesamtimpulses	91
6.4.3 Betrachtung der Bugwellen-Theorie	94
6.4.4 3D-CFD Simulation zur Target-Umströmung	100
6.4.5 Validierung der lokalen Messergebnisse durch Abgleich mit dem globalen Strahlimpuls	106
6.4.6 Zusammenfassung der Validierung der Messtechnik	112
7 Anwendung der Messtechnik	113
7.1 Auswertemethoden und Bewertungsgrößen	113
7.1.1 Auswertemethoden der Gesamtimpulsmessung	113
7.1.2 Auswertemethoden der lokalen Impulsverteilung	117
7.2 Einfluss der Düsengeometrie auf die Strahlimpulsstruktur	127
8 Ergebnis und Fazit	139
8.1 Zusammenfassung	139
8.2 Ausblick	140
Literaturverzeichnis	143
Anhang	149
A.1 Kennwerte des eingesetzten Kraftstoffes	149
A.2 Ergebnisse der Parametervariation der ICAS-Simulation	149

Nomenklatur

Abkürzungen

Abb.	Abbildung
A/D	Analog/Digital
CFD	Computational Fluid Dynamics (numerische Strömungsmechanik)
d.h.	das heißt
DoE	Design of Experiments
fps	Bilder pro Sekunde (Frames per second)
ggf.	gegebenenfalls
HC	Hydrocarbons, engl: Kohlenwasserstoffe
i.A.	im Allgemeinen
i.d.R.	in der Regel
ICAS	Interactive Cross-Section Averaged Spray
LDA	Laser Doppler Anemometrie
LED	Light emitting diode
NO_x	Stickoxide
NFZ	Nutzfahrzeug

PDA	Phasen-Doppler Anemometrie
PIV	Particle Image Velocimetry
s.	siehe
u.A.	unter Anderem
vgl.	vergleiche
z.B.	zum Beispiel

Formelzeichen

A_i	Flächenelement des Messpunkts i	mm^2
$A_{Kalotte}$	Oberfläche eines Kugelabschnitts (Kalotte)	mm^2
A_{Kreis}	Oberfläche eines Kreises	mm^2
A_S	sensitive Fläche des Prallelements	mm^2
β	effektiver Strahlkegelwinkel	deg
c	Lichtgeschwindigkeit	$\frac{m}{s}$
d	(sensitiver) Durchmesser des Prallelements	mm
D_{DL}	Düsenlochdurchmesser	mm
E	Elastizitätsmodul	$\frac{N}{m^2}$
$\vec{e}_1, \vec{e}_2, \vec{e}_D$	Einheitsvektoren	—
F	Strahlkraft	N
$f_{D,i}$	Frequenz des auf den Detektor einfallenden Laserlichts der Quelle i	Hz
f_i	Frequenz des Laserlichts von Quelle i	Hz

$f_{Tr,i}$	Frequenz des auf den Tropfen einfallenden Laserlichts von Quelle i	Hz
K	Kavitationszahl	—
K_{krit}	kritische Kavitationszahl	—
L_C	Länge der intakten Flüssigkeitssäule	mm
L_{TR}	Abstand zum Düsenaustritt, ab dem sich erste Tropfen vom Strahl lösen	mm
\dot{m}_{DL}	Massenstrom durch das Düsenloch	$\frac{kg}{s}$
m_E	Einspritzmasse	kg
\dot{M}	Impulsfluss	N
M	Impuls	Ns
M_i	Impulswert des Messpunkts i	Ns
M_{ges}	Gesamtimpuls	Ns
μ_{fl}	Dynamische Viskosität des Fluids	$\frac{kg}{m \cdot s}$
Oh	Ohnesorge-Zahl	—
φ	Prüfstandskoordinate, Höhenwinkel	deg
φ_S	Strahlhöhenwinkel	deg
Δp	Differenzdruck	Pa
p_E	Einspritzdruck	Pa
p_G	Gegendruck	Pa
p_{N_2}	Stickstoffdruck in Messkammer	Pa
p_v	Dampfdruck	Pa

p_{Zyl}	Gasdruck im Zylinder	Pa
Re	Reynolds-Zahl	—
ρ_{fl}	Dichte des Fluids	$\frac{kg}{m^3}$
ρ_g	Gasdichte	$\frac{kg}{m^3}$
ρ_{Zyl}	Gasdichte im Zylinder	$\frac{kg}{m^3}$
R_{Luft}	spezifischen Gaskonstante von Luft	$\frac{J}{kg\ K}$
R_{N_2}	spezifischen Gaskonstante von Stickstoff	$\frac{J}{kg\ K}$
σ_{fl}	Oberflächenspannung des Fluids	$\frac{N}{m}$
t	Zeit	s
θ	Strahlkegelwinkel	deg
Θ	Prüfstandskoordinate, Seitenwinkel	deg
T_{N_2}	Stickstofftemperatur in Messkammer	K
T_{Zyl}	Gastemperatur im Zylinder	K
v_{fl}	Geschwindigkeit des Fluids	$\frac{m}{s}$
We	Weber-Zahl	—
z_S	Eindringtiefe	mm
z	Prüfstandskoordinate, Düsenabstand	mm

Abbildungsverzeichnis

3.1	Strahlzerfall nach REITZ und BRACCO [RB86]	10
3.2	Ohnesorge-Diagramm	13
3.3	Strahlparameter	14
3.4	Tropfenzerfallsmechanismen	16
3.5	Stromfäden und Druckverlauf in kavitierenden und kavitationsfreien Düsen	19
4.1	Messverfahren am Dieselspray	22
4.2	Streulichtaufnahmen einer 7-Loch-Düse mit Strahlparametern	25
4.3	Typische Anordnung einer Anlage zur Aufnahme von Schattenrissbildern	26
4.4	Aufbau zur synchronen Aufnahme von Schattenriss- und Streulichtbildern	28
4.5	Typischer Aufbau der Schlieren-Messtechnik	29
4.6	Geschwindigkeitsfeld der Gasphase um den Primärzerfallsbereich eines Dieselsprays	31
4.7	Schematischer Aufbau eines LDA-Systems	32
4.8	Phasenverschiebung des Laserinterferenzsignals durch Streuung an einem sphärischen Tröpfchen	35
4.9	Messprinzip der Strahlkraftmessung	38
4.10	Mittlere stationäre Werte von Massenstrom und Strahlkraft zur Bestimmung der Strömungskoeffizienten	43
4.11	Schema zur Bestimmung der Aufbruchlänge	46
5.1	Hydraulisches und elektrisches Schema des Strahlimpulslabors	55

5.2	Schnitt durch die Messkammer mit den Freiheitsgraden der Sensorpositionierung	56
5.3	Prinzip der Messwertumformer für die Aufnahme der Strahlkraft	56
5.4	Abtastung des globalen Strahlimpulses	57
5.5	Abtastmuster der lokalen Impulsverteilung im Strahl	57
5.6	Schematischer Aufbau eines servohydraulisch betriebenen Piezo-Injektors	57
5.7	Beispielhafter Verlauf von Einspritzrate und Strahlkraft eines servohydraulisch betätigten Injektors	58
6.1	Messung der Strahlkraft bei Variation des Raildrucks	61
6.2	Messung der Strahlkraft bei Variation des Gegendrucks	62
6.3	Strahlimpuls in Abhängigkeit der eingespritzten Masse	65
6.4	Zusammenhang zwischen realem und effektivem Strahlkegelwinkel	68
6.5	Einspritzrate des untersuchten Injektors für den Basisbetriebspunkt der Strahlimpulsflusssimulation . .	71
6.6	Strahlimpulsfluss eines Düsenlochs im Basisbetriebspunkt im Vergleich zur entsprechenden Strahlkraft	72
6.7	Strahlimpulsfluss eines Düsenlochs im Vergleich zur entsprechenden Strahlkraft in einem Abstand von $z = 10mm$ zum Düsenaustritt bei Variation der Kammerdichte	74
6.8	Einfluss der Kammertemperatur auf den Impulsfluss eines Einspritzstrahls	76