

Laserbasierte Untersuchung der Prozesse in einem Ottomotor mit strahlgeführtem Brennverfahren

Vom Fachbereich Maschinenbau
an der Technischen Universität Darmstadt

zur

Erlangung des Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte

D i s s e r t a t i o n

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Roman Stiehl

aus Haan

Berichterstatter:	Prof. Dr. rer. nat. habil. A. Dreizler
Mitberichterstatter:	Prof. Dr.-Ing R. Kneer
Tag der Einreichung:	01. Juli 2014
Tag der mündlichen Prüfung:	07. Oktober 2014

Stuttgart 2015

D17

Bibliografische Information der Deutschen Bibliothek

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

Stiehl, Roman:

Laserbasierte Untersuchung der Prozesse in einem Ottomotor
mit strahlgeführtem Brennverfahren
ISBN 978-3-86376-161-5

Alle Rechte vorbehalten

1. Auflage 2015

© Optimus Verlag, Göttingen

© Coverfotos: Roman Stiehl

URL: www.optimus-verlag.de

Printed in Germany

Papier ist FSC zertifiziert (holzfrei, chlorfrei und säurefrei,
sowie alterungsbeständig nach ANSI 3948 und ISO 9706)

Das Werk, einschließlich aller seiner Teile, ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes in Deutschland ist ohne Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Danksagung

Diese Arbeit entstand während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Reaktive Strömungen und Messtechnik der TU Darmstadt in Zusammenarbeit mit der Abteilung Combustion and Emission Control der Daimler AG in Stuttgart. Mein besonderer Dank geht an Prof. Andreas Dreizler für die Möglichkeit, bei ihm am Fachgebiet zu promovieren. Seine positive Art und die fachliche Kompetenz waren eine ausgezeichnete Basis für meine Arbeit.

Darüber hinaus möchte ich mich bei Prof. Reinhold Kneer bedanken. Er hat mich während des Studiums für die Laserdiagnostik begeistert und ich freue mich sehr über sein Interesse an meiner weiteren Arbeit und die Übernahme des Koreferats.

Einen großen Teil der letzten Jahre durfte ich bei Daimler in Untertürkheim verbringen. Dort hat Dr. Christian Krüger, weit über seine Rolle als Teamleiter hinaus, zum Erfolg der Arbeit beigetragen. Viele der umgesetzten Ideen haben ihren Ursprung in einem unserer zahlreichen Gespräche. Mit vielen Kollegen habe ich täglich im Labor und Büro zusammengearbeitet und dabei große Unterstützung erfahren. Stellvertretend für alle möchte ich an dieser Stelle zwei von ihnen besonders danken: Dr. Jürgen Schorr hat mir stets den Rücken freigehalten, so dass ich mich voll und ganz auf die Arbeit im Labor konzentrieren konnte. Dort konnte ich immer auf die kompetente Hilfe und das offene Ohr von Günter Kukutschka zählen.

Ein großer Dank geht auch an die Kolleginnen und Kollegen in Darmstadt. Obwohl ich nicht so häufig am Fachgebiet war, habe ich mich immer gut aufgenommen gefühlt und neben dem fachliche Austausch den Zusammenhalt unter den Kollegen genossen. Mein besonderer Dank gilt Dr. Elias Baum und Dr. Brian Peterson, die mir bei allen Fragen zu Messtechnik und Auswertung stets kompetent geholfen haben. Bei Dr. Benjamin Böhm möchte ich mich für die vielen Diskussionen und Anregungen in den letzten Jahren bedanken. Den Studenten, mit denen ich zusammen arbeiten durfte, insbesondere bei Felix Eitel, danke ich für die Ideen, Impulse und den Spaß an der gemeinsamen Arbeit.

Auch meine Freunde und meine Familie haben einen großen Teil zum Gelingen dieser Arbeit, nicht nur in Bezug auf die Kommasetzung, beigetragen. Bei ihnen möchte ich mich für die Unterstützung während des Studiums und der Promotion bedanken. Der größte Dank gilt meiner Frau Lena. Ihr vorbehaltloser Rückhalt hat diese Arbeit erst möglich gemacht.

Darmstadt, im Juli 2014

Roman Stiehl

Für Lena.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	1
1.2	Stand der Forschung	2
1.3	Kontext und Ziel der Arbeit	4
1.4	Aufbau der Arbeit	6
2	Grundlagen	7
2.1	Grundlagen des Verbrennungsmotors	7
2.1.1	Thermodynamik des Ottomotors	9
2.2	Turbulente Strömungen	11
2.2.1	Erhaltungsgleichungen	11
2.2.2	Grundlegende Eigenschaften turbulenter Strömungen	12
2.2.3	Statistische Beschreibung	12
2.2.4	Kinetische Energie	14
2.2.5	Kohärente Strömungsstrukturen	15
2.2.6	Innere motorische Strömungen	16
2.3	Motorische Sprühstrahlen	17
2.4	Verbrennung	20
2.4.1	Flammeneigenleuchten	21
2.5	Direkteinspritzung im Ottomotor	23
2.5.1	Brennverfahren	23
2.5.2	Gemischbildung für strahlgeführte Brennverfahren	26
3	Optische Messtechnik	29
3.1	Strömungsmesstechnik	29
3.2	Diagnostik der Einspritzung	32
3.3	Verbrennungsdiagnostik	33
4	Versuchsaufbau und -durchführung	35
4.1	Transparentaggregat	35
4.2	Indiziermesstechnik am Motor	38
4.3	Untersuchte Einspritztimings	38
4.4	Optische Diagnostik am Motor	41
4.4.1	Versuchsaufbau für Geometrie 1	42
4.4.2	Versuchsaufbau für Geometrie 2	44
4.4.3	Versuchsumfang und Durchführung	44

5	Datenauswertung	47
5.1	Strömungsmessungen	47
5.1.1	Vektorberechnung	47
5.1.2	Kinetische und turbulente kinetische Energie	48
5.1.3	Wirbelerkennung	51
5.2	Einspritzdiagnostik	53
5.2.1	Sprayabstand	56
5.2.2	Trajektorie des Sprühstrahls	57
5.3	Verbrennungsdiagnostik	58
5.3.1	Angewendeter Algorithmus	58
5.3.2	Auswertung der Farbinformation für Geometrie 2	59
5.3.3	Abgleich mit den Indizierdaten	61
5.4	Statistische Auswertungen	62
5.4.1	Konditionierte Mittelwerte	62
5.4.2	Korrelationskoeffizient	62
5.4.3	Räumliche Darstellung des Korrelationskoeffizienten	63
6	Innermotorische Strömungen	65
6.1	Einlassströmung	65
6.2	Detaillierte Analyse der Kompressionsströmung für Geometrie 2	67
6.2.1	Geschwindigkeitsverteilung	70
6.2.2	Position des Tumblezentrums	71
6.2.3	Zyklus-zu-Zyklus Schwankungen	73
6.3	Einfluss der Geometrie auf die Kompressionsströmung	75
7	Interaktion zwischen Strömung und Einspritzung	81
7.1	Einfluss der ersten Einspritzung auf die Strömung	81
7.2	Fluktuationen der Einspritzung	89
7.2.1	Ansteuerdauer	90
7.2.2	Zylinderdruck und Gasdichte	91
7.2.3	Fluktuationen des Kraftstoffdruckes	92
7.2.4	Interaktion zwischen Strömung und Einspritzung	93
7.3	Vergleich der beiden Geometrien	100
7.3.1	Untersuchung des Sprayabstandes	100
7.3.2	Untersuchung der Trajektorie des Sprühstrahls	103
8	Motorische Verbrennung	107
8.1	Daten der Motorindizierung	107
8.2	Interaktion zwischen Strömung und Verbrennung	109
8.2.1	Untersuchung der Flammenausbreitung für Geometrie 1	109
8.2.2	Vergleich der Verbrennung in Geometrie 1 und 2	113
8.3	Spektrale Untersuchung der Flammeneigenleuchtens	114
9	Zusammenfassung und Ausblick	117
A	Algorithmus zur Bestimmung der Trajektorie des Sprühstrahls	131