Technische Universität Braunschweig

ivb

M. Sc. Alexander Pauls

Optische Untersuchung der Gemischbildung eines kleinen direkteinspritzenden Ottomotors

Berichte aus dem ivb | Band 38 | Braunschweig 2022

NFF NIEDERSÄCHSISCHES FORSCHUNGSZENTRUM FAHRZEUGTECHNIK

Optische Untersuchung der Gemischbildung eines kleinen direkteinspritzenden Ottomotors

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

zur Erlangung der Würde

eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von:	**Alexander Pauls, M. Sc.**
geboren in:	**Ekibastus**

eingereicht am:	**07.07.2021**
mündliche Prüfung am:	**20.12.2021**

Vorsitz:	**Prof. Dr.-Ing. Ferit Küçükay**
Gutachter:	**Prof. Dr.-Ing. Peter Eilts**
	Prof. Dr. Friedrich Dinkelacker

2022

Berichte aus dem ivb

Band 38

Alexander Pauls

Optische Untersuchung der Gemischbildung eines kleinen direkteinspritzenden Ottomotors

Shaker Verlag
Düren 2022

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

Zugl.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 2021

Copyright Shaker Verlag 2022
Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8714-7
ISSN 2364-3862

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren
Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9
Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen des Vorhabens 1223 „GDI Grenzdurchmesser II“ der Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen (FVV) e. V. während meiner Anstellung als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Verbrennungskraftmaschinen (ivb) der Technischen Universität Braunschweig. Dieses Projekt wurde durch das Programm zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF-Nr. 19092 N/1) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF) e. V. aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.
Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Peter Eilts für die Möglichkeit dieses Thema am ivb zu bearbeiten und für die Betreuung dieser Arbeit. Neben dem regen Interesse an meiner Arbeit möchte ich mich auch für das mir entgegengebrachte Vertrauen und die wegweisenden Diskussionen bedanken.
Herrn Prof. Dr. Friedrich Dinkelacker danke ich für die Übernahme des Korreferats und das Interesse an dieser Arbeit sowie Herrn Prof. Dr.-Ing. Ferit Küçükay für den Vorsitz des Prüfungsausschusses. Weiterhin möchte ich mich für die Tätigkeit als Obmann in dem Projekt bei Herrn Dipl.-Ing. Marc Sens bedanken.
Des Weiteren möchte ich mich bei den Mitarbeitern des Sekretariats und der Buchhaltung für die organisatorische und finanzielle Bearbeitung des Projektes bedanken. Ebenfalls gilt mein besonderer Dank den Mitarbeitern der Werkstatt für die Unterstützung und die Beratung bei dem Aufbau und der Inbetriebnahme der Prüfstände.
Den wissenschaftlichen Mitarbeitern möchte ich für die fachliche und überfachliche Unterstützung während der Projektbearbeitung herzlichst danken. Der Zusammenhalt und die gegenseitige Hilfe in schwierigen Zeiten haben enorm zu der besonderen Atmosphäre beigetragen, an die ich mich in Zukunft sehr gerne erinnern werde. Insbesondere danke ich Marius Betz für die Unterstützung in schwerer Stunde.
Weiterhin möchte den Studierenden, welche mich während der Projektdurchführung begleitet haben, für die enorme Unterstützung meinen großen Dank aussprechen.
Meinen Freunden Max, Jonny und Witalij danke ich für die unterstützenden Worte und die guten Zeiten, die mir während der Promotion so sehr geholfen haben.
Mein größter Dank gilt meiner Mutter Katharina, die solange an mich geglaubt hatte, bis ich es selber konnte. Meiner Schwester Viktoria gilt besonderer Dank für die erhellenden und ermunternden Worte an trüben Tagen.

Ihr seid meine größte Motivation.

Braunschweig, 29.06.2021 Alexander Pauls

Kurzfassung

Die Zielsetzung dieser Arbeit im Rahmen des FVV-Vorhabens „GDI Grenzdurchmesser II“ war es, anhand der thermodynamischen Ergebnisse aus dem FVV Vorhaben „GDI Grenzdurchmesser“ das Verständnis der Gemischbildung bei sehr kleinem Bohrungsdurchmesser mittels laserinduzierter Exciplex Fluoreszenz (LIEF) an einem Transparentmotor zu vertiefen. Ebenfalls sollten offene Fragestellungen in Bezug auf die Partikelemissionen zu den beiden untersuchten Zylinderkopfkonzepten (3- und 4-Ventile) beantwortet werden.

In Voruntersuchungen an einer optisch zugänglichen Hochdruckkammer wurde zunächst die Signalkalibrierung durchgeführt um die Aussagekraft der LIEF zu ermitteln. Diese Vorarbeiten erlaubten die Anwendung der LIEF am Transparentmotor.

Bei den Untersuchungen zum 3V-Konzept konnte ermittelt werden, weshalb eine Ladungsbewegungsklappe bei früher Einspritzung zunehmend an Einfluss verliert. Des Weiteren wurde beim Vergleich der beiden eingesetzten Injektoren gezeigt, dass ein höherer Massenstrom bei gleicher eingespritzter Masse sich reduzierend auf Ventil und Wandbenetzung auswirkt. Gleichzeitig konnte nachgewiesen werden, dass sich dieser Trend bei einer Einspritzdruckerhöhung entgegengesetzt verhält.

Bei den optischen Untersuchungen am 4V-Konzept wurde gezeigt, dass ein 7-Loch Injektor mit geringerer Eindringtiefe Nachteile gegenüber einem 6-Lochinjektor hat. Weiterhin konnte ermittelt werden weshalb sich eine Ladungsbewegungsklappe negativ auf die Gemischbildung auswirkt. Dies widerspricht der geläufigen Meinung.

Abstract

The objective of this work within the framework of the FVV project "GDI Boundary Bore II" was to use the thermodynamic results from the FVV project "GDI Boundary Bore I" to deepen the understanding of mixture formation at very small bore diameters by the application of laser-induced exciplex fluorescence (LIEF) on a transparent engine. The aim was also to answer open questions with regard to particle emissions for the investigated cylinder head concepts (3- and 4-valve).

In preliminary investigations on an optically accessible high-pressure chamber, the signal calibration was first carried out to determine the significance of the LIEF. This preliminary work allowed the LIEF to be applied on the transparent engine.

During the investigations on the 3V concept, it was possible to determine why a charge motion flap increasingly loses its influence with early injection. Furthermore, a comparison of the two injectors used showed that a higher mass flow with the same injected mass has a reducing effect on the valve and wall wetting. At the same time, it was shown that this trend is reversed when the injection pressure is increased.

The optical investigations on the 4V concept showed that a 7-hole injector with lower penetration depth has disadvantages compared to a 6-hole injector. Furthermore, it could be determined why a tumble flap can have a negative effect on the mixture formation. This is contrary to common opinion.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort I

Kurzfassung III

Abstract V

Nomenklatur IX

1 Einleitung und Motivation 1

2 Stand der Technik 5

2.1 Benzindirekteinspritzung und Gemischbildung 5

2.2 Grundlagen zu Partikelemissionen 10

2.2.1 Eigenschaften von Partikeln 10

2.2.2 Partikelbildung- und Oxidation 12

2.2.3 Einflussgrößen auf die Partikelbildung 13

2.2.4 Partikelemissionsquellen bei der Direkteinspritzung 14

2.3 Optische Messtechnik – Laserinduzierte (Exciplex) Fluoreszenz 18

2.3.1 Temperaturabhängigkeit des Signals der Flüssigphase 21

2.3.2 Quantifizierung der Gasphase mittels FAR-LIF 22

3 Charakterisierung der optischen Messtechnik 24

3.1 Versuchsaufbau Hochdruckkammer 24

3.2 Signalkalibrierung an der Hochdruckkammer 25

3.2.1 Substitution des Ersatzkraftstoffes 26

3.2.2 Bestimmung des Crosstalks 29

3.2.3 Anwendung der Exciplex-Thermometrie 31

3.2.4 Anwendung der FAR-LIF 33

4 Anwendung optischer Messtechnik am Transparentmotor 34

4.1 Versuchsträger 34

4.2 Motorenprüfstand 37

4.3 Signalkalibrierung 38

4.4 Prozess der Bildbearbeitung 42

5 Ergebnisse der optischen Untersuchungen 44
5.1 Beurteilung der Gemischbildung am 3V-Konzept 45
5.1.1 3V Injektorenvergleich im Betriebspunkt 1 46
5.1.2 3V Injektorenvergleich mit einer Einspritzdruckerhöhung im Betriebspunkt 1 55
5.1.3 Einfluss der Ladungsbewegungsklappe - Injektor T-31243 60
5.1.4 3V Injektorenvergleich im Betriebspunkt 2 70
5.1.5 3V Injektorenvergleich im Betriebspunkt 5 77
5.1.6 3V Injektorenvergleich mit einer Einspritzdruckerhöhung im Betriebspunkt 5 84
5.2 Beurteilung der Gemischbildung am 4V-Konzept 91
5.2.1 4V Injektorenvergleich 91
5.2.2 Einfluss der Ladungsbewegungsklappe - Injektor T-31169 104
5.2.3 Einfluss der Ladungsbewegungsklappe - Injektor T-31170 116
6 Zusammenfassung und Ausblick 126
Literaturverzeichnis 131
Abbildungsverzeichnis 148
Tabellenverzeichnis 157
Anhang 158