

Florian Mirschinka

**Bildgebende Messung der
Wasserwandfilmdicke durch
laserinduzierte Fluoreszenz
und Infrarot-Absorption**

**Bildgebende Messung der Wasserwandfilmdicke
durch laserinduzierte Fluoreszenz und Infrarot-Absorption**

Von der Fakultät für Ingenieurwissenschaften, Abteilung Maschinenbau und Verfahrenstechnik

der

Universität Duisburg-Essen

zur Erlangung des akademischen Grades

eines

Doktors der Ingenieurwissenschaften

Dr.-Ing.

genehmigte Dissertation

von

Florian Mirschinka

aus

Duisburg

Gutachter: Prof. Dr. Sebastian Kaiser
Prof. Dr.-Ing. Michael Wensing

Tag der mündlichen Prüfung: 16.01.2023

Berichte aus dem Maschinenbau

Florian Mirschinka

**Bildgebende Messung der Wasserwandfilmdicke
durch laserinduzierte Fluoreszenz
und Infrarot-Absorption**

Shaker Verlag
Düren 2023

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.: Duisburg-Essen, Univ., Diss., 2023

Copyright Shaker Verlag 2023

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8985-1

ISSN 0945-0874

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 Dissertation entstand während meiner Doktorandentätigkeit im Bereich Powertrain Solutions der Robert Bosch GmbH am Standort Renningen. Die universitäre Betreuung der Arbeit erfolgte am Institut für Energie- und Material-Prozesse der Universität Duisburg-Essen.

An dieser Stelle möchte denjenigen Danken, die zum erfolgreichen Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. Sebastian Kaiser für die Betreuung der Arbeit, die zahlreichen fachlichen Diskussionen sowie die vielen wertvollen Anregungen, die maßgeblich zur Qualität der Arbeit beigetragen haben. Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael Wensing danke ich für das Interesse an der Arbeit und die Übernahme des Korreferats.

In besonderem Maße möchte ich mich bei Herrn Dr.-Ing. Jan Niklas Geiler für die Betreuung der Arbeit seitens der Robert Bosch GmbH sowie für das entgegengebrachte Vertrauen, die vielen fachlichen Diskussionen und die stete Unterstützung bedanken. Für das Ermöglichen der Promotion bei der Robert Bosch GmbH danke ich Herrn Dr.-Ing. Erik Schünemann, Herrn Matthias Mansbart und Herrn Dr.-Ing. Jan Niklas Geiler.

Des Weiteren möchte ich mich bei allen Kollegen für die tolle Zeit, das angenehme Arbeitsklima und die zahlreichen fachlichen sowie privaten Diskussionen und Gespräche bedanken. Namentlich möchte ich Andreas Herzig, Martin Noack und Ralf Köhler erwähnen, die mich bei jeglichen Herausforderungen im Labor unterstützt haben. Ein weiterer großer Dank gilt dem engagierten Einsatz von Julian Nestel, Fabio Messina, Lars Kelting und Yusuf Dönmez, deren Abschlussarbeiten ich im Rahmen meiner Promotion betreuen durfte. Einige

Ergebnisse der Abschlussarbeiten sind in die vorliegende Arbeit eingeflossen. Für das Korrekturlesen dieser Arbeit bedanke ich mich bei Dr.-Ing. Jan Niklas Geiler, Anke Mirschinka, Dr.-Ing. Jonathan Hermann und Julian Nestel.

Abschließend möchte ich mich bei meiner Familie und Freunden für die Unterstützung und den notwendigen Ausgleich zur spannenden, aber auch herausfordernden Zeit als Doktorand bedanken. Mein größter Dank gilt meiner Frau Anke: Vielen Dank für deine unglaubliche Unterstützung, deine Geduld und dein Verständnis vor und während meiner gesamten Doktorandenzeit.

Vielen Dank für alles!

Abstract

Water is very important in many technical processes or applications. It can be used as part of the process or may be a reaction product. Optimization of such processes often requires knowledge of the water film thickness. Within the scope of the present dissertation, two methods were developed for imaging of liquid water films by laser-induced fluorescence (LIF) and near-infrared absorption (NIRA). The development pursued the goal of visualizing water injection in a gasoline engine. Water injection can be used to increase the efficiency and reduce the emissions of an engine. It offers the possibility, for example, of reducing the knock tendency of gasoline engines and optimizing the center of combustion. To achieve the highest efficiency in the design of a water injection system, wall wetting should be avoided.

LIF requires the addition of a marker substance, a so called tracer, to the non-fluorescing water. Therefore, in a first set of experiments the photo-physical properties of potential LIF tracers (1,4-difluorobenzene (DFB), anisole, benzyl alcohol (BnOH), 3-pentanone, diacetyl, eosin Y) were investigated. The obtained database on tracer photophysics facilitates the selection of a suitable tracer for future applications of LIF for water visualization. For example, the fluorescence signal was studied with variation of pressure and temperature. The spectra of the tracers anisole, DFB, diacetyl, and eosin Y showed a spectral red shift with increasing temperature. This spectral shift can be exploited to measure the film temperature according to the so-called two-color LIF approach.

To investigate the co-evaporation of all tracers with water, LIF and NIRA were used simultaneously to quantify the deposited water in a simple spray-onto-plate experiment. The results show that total internal reflection of the

laser beam within droplets can lead to an overestimation of LIF compared to NIRA thickness. Furthermore, it can be seen that, with the exception of BnOH, all tracers evaporate preferentially from the mixture. These findings must be considered in the interpretation of LIF data.

LIF was then used to measure the thickness and temperature of water and fuel wall films on the piston top surface of an optically accessible engine. Anisole and DFB were each used as tracers for water. The two-color LIF approach was chosen to measure the film temperature. Isooctane was used as a surrogate fuel with toluene as a tracer. Since the fluorescence spectrum of DFB overlaps with the fluorescence spectrum of toluene, simultaneous detection of water and fuel was not possible. Therefore, only one of the solvents was mixed with tracer while the other was injected in pure form. In subsequent data processing, the results were overlaid.

Initially, only water without fuel was injected and the wall film formation on the piston top surface was investigated. The results show that an increase in injection pressure leads to a decrease in wall film mass. In addition, the results show that the influence of total internal reflection can also cause overestimated LIF thicknesses in the engine. LIF studies with simultaneous water and fuel injection showed an increase in the mass of the fuel wall film when the injected water mass was increased.

Zusammenfassung

Wasser ist ein Medium, das in vielen technischen Prozessen eingesetzt wird oder als Reaktionsprodukt entsteht. Oftmals setzt die Optimierung solcher Prozesse die Kenntnis über Wasserfilmdicken voraus. In dieser Arbeit wurden zwei Methoden entwickelt, die durch laserinduzierte Fluoreszenz (LIF) und Nahinfrarot-Absorption (NIRA) eine bildgebende Quantifizierung von Wasserfilmdicken ermöglichen.

Die Messtechnikentwicklung erfolgte vor dem Hintergrund der Wassereinspritzung im Ottomotor, die eine technische Lösung zur Wirkungsgradsteigerung und Emissionsreduzierung eines Motors sein kann. Dabei bietet die Wassereinspritzung unter anderem das Potenzial die Klopfneigung von Ottomotoren zu senken und die Verbrennungsschwerpunktlage zu optimieren. Die höchste Effektivität eines Wassereinspritzsystems wird erreicht, wenn die Benetzung der Brennraumwände durch Wasser vermieden wird.

Da Wasser selbst nicht fluoreszieren kann, muss dem Wasser ein Stoff zugemischt werden, der nach Anregung mit einem Laser fluoresziert. Dieser Stoff wird Tracer genannt. Zunächst wurden im Zuge der LIF-Messtechnikentwicklung potenzielle Tracer (1,4-Difluorbenzol (DFB), Anisol, Benzylalkohol (BnOH), 3-Pentanon, Diacetyl, Eosin Y) hinsichtlich ihrer photophysikalischen Eigenschaften untersucht. Diese Datenbasis zur Photophysik der Tracer kann für künftige Anwendungen, in denen Wasser durch LIF visualisiert werden soll, zur Auswahl eines geeigneten Tracers dienen. Unter anderem wurde das Fluoreszenzsignal bei Variation des Drucks und der Temperatur untersucht. Dabei zeigten die Tracer Anisol, DFB, Diacetyl und Eosin Y eine spektrale Rotverschiebung bei Erhöhung der Temperatur. Diese Spektralverschiebung kann zur Messung der Gemischtemperatur nach dem sogenannten Zwei-Farben LIF-Ansatz ge-

nutzt werden.

Zur Untersuchung des Verdampfungsverhaltens der Wasser-Tracer-Gemische auf einer Oberfläche wurden simultane LIF- und NIRA-Messungen durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass Totalreflexion des Laserstrahls innerhalb von Tropfen zu einer Überschätzung der durch LIF im Vergleich zur durch NIRA gemessenen Filmdicke führen kann. Bis auf BnOH zeigen alle untersuchten Tracer ein präferentielles Verdampfungsverhalten aus dem Wasser-Tracer-Gemisch. Dies muss in der Interpretation der LIF-Daten berücksichtigt werden.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde LIF an einem optisch zugänglichen Otto-Einzyliermotor zur Quantifizierung der Filmdicke und -temperatur der Wasser-Tracer-Gemische auf der Kolbenoberfläche eingesetzt. Anisol und DFB wurden jeweils als Tracer verwendet. Zur Messung der Temperatur wurde der Zwei-Farben LIF-Ansatz gewählt. Als Kraftstoff wurde Isooctan mit dem Tracer Toluol eingesetzt. Da sich das Fluoreszenzspektrum von DFB mit dem Fluoreszenzspektrum von Toluol überlappt, war eine simultane Detektion von Wasser und Kraftstoff nicht möglich. Folglich wurde jeweils nur eines der Lösungsmittel mit Tracer versetzt, während das andere in reiner Form eingespritzt wurde. In der anschließenden Datenverarbeitung wurden die Ergebnisse überlagert. Zunächst wurde ausschließlich Wasser ohne Kraftstoff eingespritzt und die Wandfilmbildung auf der Kolbenoberfläche untersucht. Dabei zeigte sich, dass eine Erhöhung des Einspritzdrucks eine Reduzierung der Wandfilmmasse bewirkt. Auch im Motor kann Totalreflexion des Laserstrahls innerhalb von Tropfen zu überschätzten Filmdicken führen. LIF-Untersuchungen der Wassereinspritzung mit simultaner Kraftstoffeinspritzung zeigten, dass eine Erhöhung der eingespritzten Wassermasse in einer Erhöhung der Masse des Kraftstoffwandfilms resultieren kann.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	V
Tabellenverzeichnis	XIII
Nomenklatur	XV
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Zielsetzung und Aufbau der Arbeit	3
2 Bildgebende Wandfilmdickenmessung	5
2.1 Messtechniken	5
2.2 Grundlagen der laserinduzierten Fluoreszenz	10
2.3 Grundlagen der Infrarot-Absorption	17
2.4 Stand der Technik	22
2.4.1 LIF zur Wandfilmdickenbestimmung	22
2.4.2 LIF zur Temperaturbestimmung	27
2.4.3 Infrarot-Absorption	30
3 Spektroskopische Untersuchung der LIF-Tracer	33
3.1 Tracer-Vorauswahl	34
3.2 Methoden und Material	39
3.2.1 Versuchsaufbau	39
3.2.2 Datenverarbeitung	43
3.3 Ergebnisse	49
3.3.1 Absorption und Fluoreszenzspektren	49
3.3.2 Mehrfache Laseranregung	57
3.3.3 Variation der Anregungsenergie und des Drucks	59

3.3.4	Variation der Filmdicke und Tracerkonzentration	64
3.3.5	Temperaturvariation	72
3.3.6	Verdampfung in Mischung mit Wasser	85
3.4	Zusammenfassung	96
4	NIRA im Vergleich zu LIF	101
4.1	Methoden und Material	102
4.1.1	Versuchsaufbau	102
4.1.2	Versuchsdurchführung und Datenverarbeitung	104
4.2	NIRA-Detektionswellenlängen	113
4.3	Ergebnisse	118
4.3.1	NIRA-Signal bei Dicken- und Temperaturvariation	118
4.3.2	Einfluss von Totalreflexion	120
4.3.3	Simultane LIF- und NIRA-Messungen	122
4.4	Zusammenfassung	135
5	LIF-Messungen am optisch zugänglichen Motor	139
5.1	Versuchsaufbau	140
5.1.1	Versuchsaggregat	140
5.1.2	Strahlengang	143
5.2	Kalibrierung	147
5.2.1	Dickenkalibrierung	147
5.2.2	Temperaturkalibrierung	149
5.3	Versuchsdurchführung und Datenverarbeitung	152
5.4	Auswahl der Betriebspunkte	158
5.5	Ergebnisse bei reiner Wassereinspritzung	160
5.5.1	Zeitliche Entwicklung des Wandfilms	160
5.5.2	Variation der Wassermasse	170
5.5.3	Variation des Einspritzdrucks	172
5.6	Ergebnisse bei Isooctan- und Wassereinspritzung	174
5.7	Zusammenfassung	180
6	Zusammenfassung und Ausblick	183
6.1	Zusammenfassung	183
6.2	Ausblick	188

Konferenzbeiträge und Veröffentlichungen	193
Betreute Studienabschlussarbeiten	195
Literaturverzeichnis	197
A Anhang zu Kapitel 3	221
B Anhang zu Kapitel 4	223
C Anhang zu Kapitel 5	225