

Multi-Parameter-Untersuchung der Gemischbildung in
Verbrennungsmotoren unter Einsatz der
laserinduzierten Fluoreszenz

Der Technischen Fakultät der
Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg

Zur Erlangung des Doktorgrades Dr.-Ing.

vorgelegt von
Dipl.-Ing. Susanne Lieselotte Lind
aus Temeschburg

**Als Dissertation genehmigt von der
Technischen Fakultät
der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg**

**Tag der mündlichen Prüfung: 31.08.2016
Vorsitzender des Promotionsorgans: Prof. Dr. Peter Greil
Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Stefan Will
Prof. Dr. rer. nat. Friedrich Dinkelacker**

Berichte zur Thermodynamik und Verfahrenstechnik

Band 4/2016

Susanne Lind

**Multi-Parameter-Untersuchung der Gemischbildung
in Verbrennungsmotoren unter Einsatz der
laserinduzierten Fluoreszenz**

D 29 (Diss. Universität Erlangen-Nürnberg)

Shaker Verlag
Aachen 2016

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.: Erlangen-Nürnberg, Univ., Diss., 2016

Copyright Shaker Verlag 2016

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-4837-7

ISSN 2365-3957

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Danksagung

Mein Dank gilt allen, die zum erfolgreichen Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Besonderer Dank gilt Prof. Dr.-Ing. Stefan Will für die Betreuung der Arbeit sowie die hervorragende Arbeitsumgebung. Weiterhin danke ich Prof. Dr. rer. nat. Friedrich Dinkelacker für die Übernahme des zweiten Gutachtens, sowie Prof. Dr.-Ing. Sannakaisa Virtanen als fachfremdes Prüfungsmitglied und Prof. Dr.-Ing. Jürgen Karl als Vorsitzenden.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Alfred Leipertz möchte ich für die Unterstützung bei den Veröffentlichungen zum Thema Tracer-Paare danken.

Eine große Stütze während der Promotionszeit war Dr.-Ing. Lars Zigan, der stets mit Rat und Tat zur Seite stand. Vielen Dank für die großartige Betreuung und Unterstützung.

Ich möchte auch der gesamten Verbrennungsgruppe danken. Wir haben uns nicht nur als Team gegenseitig unterstützt, sondern auch in unserer Freizeit viele schöne und lustige Stunden miteinander verbracht. Besonders hervorheben möchte ich an dieser Stelle Dr.-Ing. Johannes Trost, der mich im Rahmen meiner Diplomarbeit an das Thema LIF herangeführt hat und mich auch während meiner Anfangszeit als Doktorand vor allem im Rahmen der Messungen am Motorprüfstand sehr unterstützt hat. Weiterhin möchte ich Dipl.-Wirt.-Ing. Michael Storch nennen mit dem ich mir über vier Jahre das Büro geteilt habe. Danke für die vielen Gespräche und die angenehme Arbeitsatmosphäre.

Ferner möchte ich den Kollegen aus der Arbeitsgruppe „Motorische Verbrennung“ danken. Prof. Dr.-Ing. Michael Wensing hat die Kooperation mit der Verbrennungsgruppe gerne begleitet. Vielen Dank für die vielen interessanten Diskussionen und die Unterstützung. Darüber hinaus möchte ich mich für die gute Zusammenarbeit bei Dr.-Ing. Thomas Mederer und Lukas Weiß, M. Sc. bei der Durchführung der Messungen am Motor und der Spraykammer bedanken.

Ich möchte auch allen Studenten danken, die ich während meiner Zeit am Lehrstuhl betreut habe. Hierbei möchte ich vor allem meine beiden Masteranden Simon Aßmann, M. Sc. und Ulrich Retzer, M. Sc. hervorheben. Ich freue mich, dass beide auch den Weg zur Promotion eingeschlagen haben und wünsche ihnen hierfür viel Erfolg.

Besonderer Dank gilt auch meinen ehemaligen Kolleginnen und Freundinnen Dipl.-Ing. Bettina Münsterjohann und Hanna Koch, M. Sc., die immer für mich da waren, wenn etwas schief gelaufen ist, aber auch um mit mir Erfolge zu feiern.

Danken möchte ich dem gesamten Lehrstuhlpersonal für die hervorragende Arbeitsatmosphäre. Für die Unterstützung von Sekretariat und Technik möchte ich mich besonders bedanken.

Weiterer Dank gilt auch der SAOT für die umfangreiche fachliche und finanzielle Unterstützung. Im Zuge dessen möchte ich mich auch bei Joakim Bood von der Lund University bedanken, welcher mich zwei Wochen lang als Gastwissenschaftler in Lund betreut hat.

Abschließend möchte ich meiner Familie und meinem Freund Christian Kutza danken. Ohne diese große Unterstützung wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen.

Kurzdarstellung

Die vorliegende Arbeit beinhaltet Weiterentwicklungen tracerbasierter laserinduzierter Fluoreszenz (LIF) Techniken zur Untersuchung der Gemischbildung in Verbrennungsmotoren. Dabei steht vor allem die simultane Bestimmung von Temperatur und Äquivalenzverhältnis bzw. Konzentration im Vordergrund. Im Rahmen dieser Arbeit werden neuartige Konzepte zur Multi-Parameter-Untersuchung für Ottomotoren, Gasmotoren sowie Dieselmotoren aufgezeigt, um eine umfassende Charakterisierung der Gemischbildung mittels tracerbasierter LIF-Messtechniken für alle gängigen Motorentypen zu erreichen.

Je nach Motorenkonzept ist die Auswahl geeigneter Tracer im Hinblick auf die physikalischen Eigenschaften des zu untersuchenden Mediums sowie die Sensitivität gegenüber der untersuchten Parameter erforderlich. Eine detaillierte Charakterisierung der eingesetzten Tracer, die Messtechnikentwicklung sowie der erste Einsatz der Messtechniken in einer Spraykammer bzw. einem optisch zugänglichen Verbrennungsmotor werden im Rahmen dieser Arbeit dargestellt. Dieses Vorgehen umfasst den gesamten Bereich von Grundlagenuntersuchungen bis hin zur technischen Anwendung.

Für den Einsatz im Dieselmotor wird 1-Methylnaphthalin ausgewählt. Dieser Tracer ermöglicht über die Methode der 2-Farben-LIF die Bestimmung der Temperatur. Über einen Detektionskanal kann simultan dazu die Konzentration bestimmt werden. Im Rahmen einer Machbarkeitsstudie wird 1-Methylnaphthalin zur simultanen Bestimmung von Temperatur und Kraftstoffpartialdichte in einem Dieselspray eingesetzt.

Für den Einsatz in Gasmotoren, wird innerhalb dieser Arbeit besonders auf die Charakterisierung des Fluoreszenzverhaltens des Tracers Trimethylamin eingegangen, welcher für eine Detektion des Kraftstoff/Luft-Verhältnisses (FAR-LIF) besondere Eignung aufweist. Die Kombination mit einem weiteren Tracer, wie beispielsweise Aceton, würde über die 2-Linien-LIF Technik eine simultane Bestimmung der Temperatur erlauben. Ein vergleichbares Konzept wird für den Einsatz im Ottomotor detailliert vorgestellt. Dabei wurden die Einflüsse möglicher, störender Tracer-Interaktionen bei Einsatz eines Tracer-Paares, bestehend aus Triethylamin und Aceton bzw. 3-Pentanon, untersucht. Dadurch kann eine simultane Untersuchung von Äquivalenzverhältnis und Temperatur bzw. zusätzlich Luftkonzentration erfolgen. Der Einsatz beider Tracer-Paare in einem Ottomotor sowie deren Potential zur Optimierung der Gemischbildung wird aufgezeigt.

Abstract

This work covers improvements of tracer-based laser-induced fluorescence (LIF) techniques for investigation of mixture formation in internal combustion engines. The focus of this work is set on the simultaneous measurement of temperature and equivalence ratio or concentration. Within this work novel concepts for multi-parameter-investigation of gasoline engines, gas engines and diesel engines are presented, to allow for a detailed characterization of mixture formation with tracer-based LIF-techniques for all types of engines.

Depending on the type of engine, a suitable tracer has to be selected with respect to the physical properties of the studied fluid and sensitivity on the investigated parameters. Detailed characterization of the applied tracers, development of measurement techniques and the first application of these techniques in a spray chamber or a optically accessible IC engine, respectively, is shown in this work. This covers the whole range from fundamental investigations to technical application.

For application in a diesel engine, 1-methylnaphthalene was chosen. This tracer can be used for temperature determination with the 2-color-LIF technique. The concentration can be determined simultaneously with one detection channel. 1-methylnaphthalene was applied for the simultaneous detection of temperature and fuel partial density in a diesel spray as proof-of-principle study.

Furthermore, a concept for multi-parameter determination in gas engines is discussed. In this work, the focus is set on the characterization of the fluorescence behavior of trimethylamine, which is suitable for determination of fuel/air-ratio (FAR-LIF) in gas engines. The combination with another tracer, like acetone for example, would allow for simultaneous detection of temperature. A similar concept is presented for application in a gasoline engine in detail. First, effects of unwanted tracer interactions, which are possible when using a tracer-pair consisting of triethylamine and acetone or 3-pentanone, were investigated. This allows for simultaneous investigation of equivalence ratio and temperature or additionally air concentration. The application of both tracer-pairs in a gasoline engine and the potential for optimization of mixture formation is presented.

Inhaltsverzeichnis

0	Formelzeichen und Abkürzungen	3
1	Einleitung	6
2	Theoretische Grundlagen	9
2.1	Dieselmotorische Brennverfahren	9
2.2	Gasmotorische Brennverfahren	10
2.3	Ottomotorische Brennverfahren.....	10
2.4	Optische Messtechniken zur Untersuchung der innermotorischen Gemischbildung	12
2.5	Laserinduzierte Fluoreszenz (LIF).....	13
2.5.1	Absorption	14
2.5.2	Deaktivierung	16
2.5.3	Quantifizierung der Signalstärke des Fluoreszenzsignals.....	19
3	Stand der Technik der laserinduzierten Fluoreszenz	21
3.1	Untersuchung von Fluoreszenzabfallzeiten	22
3.2	Bestimmung der Sauerstoffkonzentration bzw. des Kraftstoff/Luft-Verhältnisses mittels LIF (FAR-LIF)	29
3.3	Temperaturbestimmung mittels LIF	33
3.3.1	2-Farben-LIF	33
3.3.2	2-Linien-LIF	37
3.4	Multi-Parameter-Untersuchung	38
3.5	Zielsetzung der Arbeit.....	40
4	Analyse der Gemischbildung im Dieselmotor	42
4.1	Charakterisierung des Fluoreszenzverhaltens von 1-MN	42
4.1.1	Experimenteller Aufbau	42
4.1.2	Spektrale Untersuchungen von 1-MN.....	44
4.1.3	Untersuchung der Fluoreszenzabfallzeit von 1-MN	49
4.1.4	Kalibrierung der integralen Fluoreszenzintensität von 1-MN	53
4.2	Einsatz von 1-MN zur Detektion von Temperatur und Kraftstoffpartialdichte in einer Einspritzkammer	57
4.2.1	Experimenteller Aufbau	57
4.2.2	Auswertestrategie zur Bestimmung der Temperaturverteilung	59
4.2.3	Auswertestrategie zur Bestimmung der Kraftstoffpartialdichte	60
4.2.4	Ergebnisse der Sprayuntersuchung	61

5	Anwendung der LIF für Gasmotoren	69
5.1	Experimenteller Aufbau.....	69
5.2	Spektrale Untersuchungen von TMA	70
5.3	Untersuchung der Fluoreszenzabfallzeit von TMA	73
6	Analyse der Gemischbildung im Ottomotor	76
6.1	Charakterisierung des Fluoreszenzverhaltens von TEA.....	76
6.1.1	Experimenteller Aufbau	76
6.1.2	Spektrale Untersuchungen von TEA.....	77
6.1.3	Untersuchung der Fluoreszenzabfallzeit von TEA	81
6.1.4	Kalibrierung der integralen Fluoreszenzintensität von TEA	82
6.2	Untersuchung von Tracer-Interaktionen bei den Tracer-Paaren TEA/Aceton und TEA/3-Pentanon	84
6.2.1	Einfluss von Tracer-Interaktionen auf die TEA-Fluoreszenz.....	86
6.2.2	Einfluss von Tracer-Interaktionen auf die Aceton-Fluoreszenz	90
6.3	Einsatz des Tracer-Paares TEA/Aceton zur Multi-Parameter-Detektion im Ottomotor mit Abgasrückführung und Benzindirekteinspritzung	93
6.3.1	Experimenteller Aufbau	94
6.3.2	Auswertestrategie zur Bestimmung der Temperatur und Luftkonzentration	95
6.3.3	Einfluss von Tracer-Interaktionen auf die Temperatur und Luft- konzentration.....	97
6.3.4	Ergebnisse der Multi-Parameter-Detektion mit dem Tracer-Paar TEA/Aceton	98
6.4	Einsatz des Tracer Paares TEA/3-Pentanon zur Multi-Parameter-Detektion im Ottomotor mit Direkteinspritzung und Ladungsschichtung	102
6.4.1	Experimenteller Aufbau	102
6.4.2	Ergebnisse der Multi-Parameter-Detektion mit dem Tracer-Paar TEA/3-Pentanon.....	103
7	Zusammenfassung und Ausblick	113
8	Literaturverzeichnis.....	117