

Optische Untersuchungen zum Einfluss von  
Biokraftstoffen auf die Rußbildung bei  
ottomotorischen Verbrennungsvorgängen

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

zur

Erlangung des Doktorgrades Dr.-Ing.

vorgelegt von  
Dipl.-Wirt.-Ing. Michael Storch  
aus Marienberg

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

Tag der mündlichen Prüfung: 19.12.2016  
Vorsitzender des Promotionsorgans: Prof. Dr.-Ing. Reinhard Lerch  
Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Stefan Will  
Prof. Dr.-Ing. Dimosthenis Trimis

Berichte zur Thermodynamik und Verfahrenstechnik

Band 1/2017

**Michael Storch**

**Optische Untersuchungen zum Einfluss von  
Biokraftstoffen auf die Rußbildung bei  
ottomotorischen Verbrennungsvorgängen**

D 29 (Diss. Universität Erlangen-Nürnberg)

Shaker Verlag  
Aachen 2017

**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 2017

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-5227-5

ISSN 2365-3957

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen  
Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9  
Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

## **Danksagung**

Die vorliegende Arbeit entstand als Dissertation im Rahmen meiner wissenschaftlichen Tätigkeit am Lehrstuhl für Technische Thermodynamik (LTT) der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg in der Arbeitsgruppe Verbrennungstechnik. Diese Arbeit wurde ermöglicht durch die finanzielle Unterstützung des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL), vertreten durch die Fachagentur Nachwachsender Rohstoffe (FNR) und der Erlangen Graduate School in Advanced Optical Technologies (SAOT).

Herrn Prof. Dr.-Ing Stefan Will als Lehrstuhlinhaber und Doktorvater danke ich besonders für das Ermöglichen der Bearbeitung eines solch interessanten, angewandten Forschungsthemas unter äußerst angenehmer Arbeitsatmosphäre. Ich danke ihm zudem für die persönliche Förderung und kompetente wissenschaftlichen Betreuung.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Dimosthenis Trimis, dem Inhaber des Lehrstuhls für Verbrennungstechnik am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) und Projektpartner danke ich für die freundliche Übernahme des Zweitgutachtens dieser Arbeit, sowie des Weckens meines Interesses an der Verbrennungstechnik und optischer Messtechnik in seiner Zeit als Lehrstuhlinhabers an der TU Bergakademie Freiberg. Ebenso möchte ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael Wensing, LTT für seine fachlich kompetente Unterstützung auf dem Gebiet der motorischen Verbrennung und der Übernahme des Prüfungsvorsitzes danken. Weiter danke ich dem ehemaligen Lehrstuhlinhaber Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Alfred Leipertz für die Unterstützung der Arbeit besonders während meiner Anfangszeit am LTT.

Großer Dank gilt meinem Arbeitsgruppen- und Projektleiter Dr.-Ing. Lars Zigan für die zahlreichen fachlichen Diskussionen, die wertvollen Ratschläge und die hervorragende Unterstützung beim Publizieren. Ferner danke ich meinen Arbeitsgruppenkollegen Dr.-Ing. Susanne Lind, Thomas Werblinski, Ellen Hertle und Ulrich Retzer für die kollegiale Arbeitsatmosphäre und die freundliche Unterstützung im Büro- und Laboralltag. Besonderer Dank gilt zudem Matthias Kögl für seine Hilfsbereitschaft, seine Begeisterung für kreative technische Lösungen, sowie sein hohes Interesse am gemeinsamen Veröffentlichen.

Für die hilfreichen Tipps während meiner Einarbeitungszeit und die erfolgreiche Zusammenarbeit bei gemeinsamen Messphasen danke ich den ehemaligen LTT-Mitarbeitern Dr.-Ing. Thomas Mederer und Dr.-Ing. Tobias Knorsch. Zudem möchte ich mich bei den wissenschaftlichen Mitarbeitern Richard Weiß, Sebastian Bornschlegel und Chris Conrad der Arbeitsgruppe „Motorische Verbrennung“ sowie Michael Altenhoff und Franz Huber der Arbeitsgruppe „Partikelmesstechnik“ des LTTs bedanken.

Ein besonderer Dank gilt zudem den technischen Mitarbeitern und dem Sekretariat sowie allen weiteren Angestellten des LTT. Ihr habt maßgeblich zur positiven, kollegialen Arbeitsatmosphäre beigetragen. Die Zeit am Lehrstuhl wird mir immer in sehr guter Erinnerung bleiben.

Den von mir betreuten Studien- und Diplomarbeitern Stefan Erdenkäufer, Anh Duc Nguyen, Ildong Park, Florian Hinrichsen, Matthias Grumann, Axel Werner, Andreas Pfaffenberger, Markus Labus und Michael Schloderer möchte ich ganz herzlich danken. Mit ihrer tatkräftigen Unterstützung haben sie maßgeblich zum Erfolg dieser Arbeit beigetragen. Es war eine sehr angenehme, wenn auch während mancher Messphasen intensive Zusammenarbeit. Es freut mich, dass Ihr mich als Doktorand begleitet habt.

Ferner möchte ich den Projektpartnern der TU Bergakademie Freiberg und des KITs für die erfolgreiche Zusammenarbeit und die gemeinsamen Veröffentlichungen im Rahmen des öffentlich geförderten Verbundvorhabens „BiOtto“ danken. Namentlich möchte ich die Freiburger Kolleginnen und Kollegen Dr.-Ing. Stefan Voß (GWA), Isabel Frenzel, Prof. Dr.-Ing. Christian Hasse (NTFD), Steffen Salenbauch, Prof. Dr. Sven Kureti (RT) und Maria Nitzer-Noski besonders hervorheben.

Von ganzem Herzen danke ich meinen Eltern, die mich über die Jahre hinweg uneingeschränkt unterstützt haben und damit den Grundstein für meinen Werdegang gelegt haben. Neben meinen Eltern danke ich meinen beiden Schwestern, Freunden und besonders meiner Partnerin Franziska Dietel mit Familie, die mir stets mit großem Verständnis für die investierte Zeit, moralischen Beistand und notwendigem Rückhalt zur Seite standen. Ihnen allen widme ich diese Arbeit.

## Kurzfassung

Die Nutzung von Biokraftstoffen in Kombination mit der Benzindirekteinspritzung (BDE) kann einen essentiellen Beitrag zur Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen im Transportsektor leisten. Bei modernen BDE-Motoren ist jedoch ein erhöhter Feinstaubausstoß festzustellen. Im Hinblick auf den Einsatz biogener Kraftstoffe stellt sich damit die Frage, inwieweit eine Reduktion des motorisch erzeugten Partikelausstoßes bei der BDE möglich ist. Dafür ist Detailwissen über den Einfluss des Kraftstoffs auf die komplexen motorischen Verbrennungsprozesse notwendig. Wichtige Vertreter der Biokraftstoffe sind aktuell die Alkohole Ethanol und n-Butanol. In der Arbeit kommen optische Messtechniken zum Einsatz, um die unterschiedlichen Teilprozesse im Transparentmotor zu visualisieren und wichtige Kenngrößen zu quantifizieren. Zur Vertiefung des Verständnisses wird die Wirkkette zwischen Einspritzung und Rußbildung unter vereinfachten Bedingungen in einer Einspritzkammer mit Zündung und Verbrennung des Sprays analysiert. Mittels simultaner High-Speed-Visualisierung von Rußleuchten und OH\*-Chemilumineszenz werden wichtige rußende Betriebspunkte identifiziert und mit einem Rußpartikelsensor im motorischen Abgas verglichen. Weiterhin werden die Einspritzung und Gemischbildung durch High-Speed-Shadowgraphy und planarer laserinduzierter Fluoreszenz (LIF) analysiert. Die Quantifizierung des Rußvolumenanteils während der Verbrennung erfolgt mittels Kopplung aus planarer laserinduzierter Inkandescenz (LII) und Extinktionsmessung für ausgewählte Betriebspunkte. Neben der Untersuchung von Isooktan-Ethanolmischungen kommen auch aromatische Kohlenwasserstoffe zum Einsatz. Die Zumischung von 35% Toluol zu Isooktan konnte das Rußverhalten eines Realkraftstoffs sehr gut nachbilden.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Zumischung eines hohen Anteils von Ethanol (z.B. E85) zu Isooktan und reines n-Butanol zur Rußreduktion führt. Die Ursache liegt in den chemischen Eigenschaften des Kraftstoffs (z.B. geringes C-H-Verhältnis, molekular gebundener Sauerstoff). Im Gegensatz dazu wurde speziell im Katalysatorheizbetrieb festgestellt, dass die Beimischung einer geringen Menge an Ethanol (E20) in Isooktan zu verstärkter Rußbildung führen kann. Mit den Untersuchungen der Sprayverbrennung in der Einspritzkammer konnten wichtige Einspritzbedingungen für die Rußbildung identifiziert werden. Bei hohem Kammerdruck (8 bar) und moderater Kammertemperatur (473 K) konnte ebenso eine erhöhte Rußbildungstendenz für E20 gegenüber Isooktan festgestellt werden. Dieses Verhalten scheint durch physikalische Eigenschaften des Kraftstoffs hervorgerufen zu werden. Speziell sind hier die hohe Verdampfungsenthalpie und das nicht-ideale Mischungsverhalten zu nennen, welche die Verdampfung beeinflussen und damit den Rußausstoß erhöhen.

## Abstract

The usage of biofuels combined with modern innovative engine combustion concepts like direct injection (DI) is beneficial for reaching future CO<sub>2</sub>-emission limitations in spark-ignition (SI) engine combustion. The drawback of these concepts is the higher particulate matter (PM) emission level. The question arises whether the usage of alcoholic biofuels (esp. ethanol, n-butanol) can be beneficial for reduction of the PM emissions in DISI engine combustion. Therefore, detailed knowledge about the complex interaction chain of injection, mixture formation, combustion and soot formation is necessary, which is strongly dependent on different fuel specific properties.

In this work, both qualitative and quantitative optical measurement techniques were applied in a modern optical accessible engine. Furthermore, an injection chamber was equipped with an ignition system and a spark plug in order to analyze single process steps under more simplified conditions. Simultaneous OH\*-chemiluminescence and soot luminosity imaging was applied together with an exhaust gas particle sensor based on laser-induced incandescence (LII). During the combustion process a quantification of the soot volume fraction was achieved by coupling planar LII and laser-extinction measurements (LEM) for selected operating points. The mixture formation was analyzed by planar tracer laser-induced fluorescence (LIF). Conventional gasoline exhibits a higher sooting tendency than isooctane. This behavior can be modeled by a fuel blend of 35vol. % of toluene in isooctane.

In general, the results show that fuels containing high ethanol contents e.g. pure ethanol and E85 (85 vol. % of ethanol in isooctane) can reduce the soot formation tendency. This reduction is based on the chemical fuel properties, such as the small C-H ratio and the fuel bound oxygen. In addition, pure n-butanol also showed reduced sooting tendency in comparison to isooctane in engine combustion with homogeneous mixture. In contrast, for particular operating points (e.g. catalyst heating) stronger soot formation was detected for E20 in comparison to pure isooctane. Similar results could be obtained within the spray combustion measurements in the injection chamber. Here ambient conditions of 8 bar and 473 K were determined as critical. It was found that especially at conditions with short mixing time the physical fuel properties like the non-ideal mixing behavior and the higher enthalpy of evaporation of ethanol may govern the soot formation mechanisms prior to chemical properties. In the engine combustion process this behavior can result in increased exhaust particle volume fraction.

## Inhaltsverzeichnis

<b>Formelzeichen, Abkürzungen und Indizes .....</b>	<b>3</b>
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>7</b>
<b>2 Grundlagen.....</b>	<b>11</b>
2.1 Wirkkette der BDE bei der ottomotorischen Verbrennung .....	11
2.2 Rußbildung und Partikelemission bei der Benzindirekteinspritzung .....	22
2.3 Messtechniken zur Charakterisierung der Einspritzung und Gemischbildung..	30
2.4 Messtechniken zur Charakterisierung der Verbrennung und Rußbildung.....	34
<b>3 Stand der Forschung .....</b>	<b>45</b>
3.1 Untersuchung der Zerstäubung und Gemischbildung von Biokraftstoffen .....	45
3.2 Verbrennung und Rußbildung von Biokraftstoffen .....	48
3.3 Zielsetzung der Arbeit.....	55
<b>4 Versuchsträger und experimenteller Aufbau .....</b>	<b>57</b>
4.1 Einzylinder-Transparentmotor .....	57
4.2 Einspritzkammer .....	67
Laserinduzierte Inkandeszenz (LII) und Extinktionsmessung.....	73
4.3 Untersuchte Kraftstoffe und Kraftstoffmischungen .....	78
<b>5 Ergebnisse und Diskussion .....</b>	<b>81</b>
5.1 Ergebnisse der motorischen Untersuchungen .....	81
5.1.1 Betriebspunktauswahl .....	81
5.1.2 Betriebspunkt „Vergleichspunkt“ und „Späte Einspritzung“ .....	85
5.1.3 Betriebspunkt „Global Fett“ .....	92
5.1.4 Betriebspunkt „Katalysatorheizen – Inhomogenes Gemisch“ .....	96
5.1.5 Betriebspunkt „Katalysatorheizen – Poolfire“ .....	104
5.1.6 Zusammenfassung für Ethanol-Isooktan-Gemische .....	109
5.1.7 Betrachtung des Rußverhaltens weiterer Kraftstoffe .....	110
5.2 Untersuchungen in der Einspritzkammer.....	115
5.2.1 Betriebspunktauswahl .....	115
5.2.2 Phänomenologie der Sprayverbrennung .....	118
5.2.3 Einspritzung und Verdampfung von Ethanol-Isooktan-Gemischen .....	122
5.2.4 Verbrennung von Ethanol-Isooktan-Gemischen.....	126
5.2.5 Rußverhalten von E20 und Isooktan.....	137
5.2.6 Rußverhalten von n-Butanol und Kraftstoffen mit Aromatenanteil .....	141

<b>6</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>145</b>
<b>7</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>151</b>
<b>8</b>	<b>Anhang.....</b>	<b>175</b>
8.1	Bestimmung der Temperatur aus dem Rußleuchten.....	175
8.2	Auflistung untersuchter Betriebspunkte in der Einspritzkammer.....	176