

# Einfluss der Kraftstoffeigenschaften auf die dieselmotorische Gemischbildung

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

zur Erlangung der Würde  
eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von: Dipl.-Ing. Matthias Zink

aus (Geburtsort): Lübeck

eingereicht am: 06.11.2014

mündliche Prüfung am: 27.04.2015

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Peter Eilts  
Prof. Dr.-Ing. Horst Harndorf



Berichte aus dem ivb

Band 11

**Matthias Zink**

**Einfluss der Kraftstoffeigenschaften auf die  
dieselmotorische Gemischbildung**

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.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 2015

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 978-3-8440-4150-7

ISSN 2364-3862

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)

## **Vorwort**

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen einer Industriepromotion im Zentralbereich Forschung und Vorausbwicklung der Robert Bosch GmbH. Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Peter Eilts für die Betreuung dieser Arbeit und die wissenschaftlichen Anregungen. Ebenso möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Horst Hamdorf für das Interesse an dieser Arbeit und die Übernahme des Korreferats bedanken.

Außerdem bedanke ich mich bei allen Kolleginnen und Kollegen der Abteilung CR/AEE für die Zusammenarbeit und Unterstützung bei der Durchführung der Forschungsarbeiten. Bei Herrn Dr.-Ing. Thorsten Raatz möchte ich mich für die Betreuung und die gewährten Freiheiten bei der Verwirklichung dieser Arbeit bedanken. Für die kritische Durchsicht dieser Arbeit möchte ich mich bei Herrn Dr.-Ing. Philippe Leick bedanken.

Stuttgart, im Oktober 2014

Matthias Zink



# Inhaltsverzeichnis

<b>Symbolverzeichnis.....</b>	<b>vi</b>
<b>1 Einleitung.....</b>	<b>1</b>
<b>2 Grundlagen der Flüssigkeitszerstäubung.....</b>	<b>3</b>
2.1 Mechanismen des Strahlzerfalls .....	3
2.2 Strahlzerfall im Atomization Regime .....	4
2.2.1 Turbulenz .....	5
2.2.2 Kavitation.....	6
2.2.3 Relaxation des Geschwindigkeitsprofils .....	7
2.2.4 Aerodynamische Kräfte.....	8
2.3 Verdampfung .....	9
2.4 Kraftstoffeinfluss auf die dieselmotorische Einspritzung und Verdampfung .....	10
<b>3 Versuchsaufbau und Messtechnik.....</b>	<b>13</b>
3.1 Einspritzsystem .....	13
3.2 Einspritzmengenmessung.....	14
3.3 Strahlkraftmessung.....	14
3.4 Optische Messungen .....	20
3.5 Statistische Versuchsplanung und Modellbildung .....	25
<b>4 Düsenaustrittszustand.....</b>	<b>31</b>
4.1 Düsendurchfluss.....	31
4.2 Austrittskraft .....	34
4.3 Zusammenfassung Düsenaustrittszustand.....	37
<b>5 Strahlkraftmessungen .....</b>	<b>39</b>
5.1 Flüssigkeitsunabhängige Einflussgrößen auf die Strahleigenschaften.....	39

5.1.1	Gasdichte.....	39
5.1.2	Raildruck.....	40
5.1.3	Düsengeometrie.....	41
5.2	Einfluss der Flüssigkeitseigenschaften .....	43
5.2.1	Vergleich der Strahleigenschaften für drei Flüssigkeiten .....	43
5.2.2	Strahlbreite.....	44
5.2.3	Impulsdichte im Strahlzentrum.....	53
5.2.4	Penetrationsverhalten .....	55
5.2.5	Einfluss der Flüssigkeitseigenschaften bei verschiedenen Gasdichten .....	57
5.2.6	Einfluss der Flüssigkeitseigenschaften bei verschiedenen Düsengeometrien .....	59
5.3	Einfaches Strahlbreitemodell.....	61
5.4	Zusammenfassung der Strahlkraftmessungen .....	68
<b>6</b>	<b>Optische Messungen.....</b>	<b>71</b>
6.1	Flüssigkeitsunabhängige Einflussgrößen auf die Strahleigenschaften.....	71
6.1.1	Gasdichte.....	71
6.1.2	Raildruck.....	72
6.1.3	Gastemperatur .....	73
6.2	Einfluss der Flüssigkeitseigenschaften .....	74
6.2.1	Vergleich der Strahleigenschaften für drei Flüssigkeiten .....	74
6.2.2	Strahlbreite.....	76
6.2.3	Penetrationsverhalten .....	85
6.3	Zusammenfassung der optischen Messungen .....	97
<b>7</b>	<b>Vergleich von Strahlkraft- und optischen Messungen .....</b>	<b>99</b>
7.1	Strahlbreite.....	99
7.2	Penetrationsverhalten .....	107
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung.....</b>	<b>115</b>

---

<b>Anhang.....</b>	<b>119</b>
A Erläuterungen Düsenparameter .....	119
B Untersuchte Flüssigkeiten .....	120
C Wiederholmessungen Strahlkraftkammer .....	122
D Wiederholmessungen Hochdruck-/Hochtemperaturkammer.....	124
E Schwellwerte für die Berechnung des Penetrationsverlaufs.....	126
F Berechnung quasistationärer Kenngrößen an der Strahlkraftkammer .....	127
G Modellierung des Penetrationsverlaufs.....	128
H Weitere Diagramme der Strahlkraftmessungen .....	132
I Weitere Diagramme der optischen Messungen.....	135
<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>141</b>

## Symbolverzeichnis

### Abkürzungen

CAS	Registrierungsnummer für chemische Stoffe (Chemical Abstracts Service)
CoV	relative Standardabweichung (Coefficient of Variation)
DoE	Design of Experiments
FAME	Fettsäuremethylester (Fatty Acid Methyl Ester)
GtL	Gas-to-Liquid
LOO	Leave-One-Out-Methode
px	Pixel
$R^2$	Bestimmtheitsmaß
RME	Rapsmethylester
RMSE	Modellfehler (Root Mean Square Error)
SL	Spritzloch

### Dimensionslose Kennzahlen

$B$	Transfer Number
$K$	Kavitationszahl nach Bergwerk
$Oh$	Ohnesorge-Zahl
$Re$	Reynolds-Zahl
$We$	Weber-Zahl

### Lateinische Symbole

$A$	(Querschnitts-) Fläche	$m^2$
$a$	Skalierungsfaktor Kegelwinkel	-
$C_{Dichte}$	Korrekturfaktor Flüssigkeitsdichte	-
$C_{Visk}$	Korrekturfaktor Viskosität	-
$C_I$	Korrekturfaktor Eindringverlauf	-
$c_a$	Flächenkontraktionskoeffizient	-
$c_d$	Durchflusskoeffizient	-
$c_p$	spez. Wärmekapazität	$J/kg \cdot K$
$c_v$	Geschwindigkeitskoeffizient	-
$d$	Durchmesser	$m$

$F$	Kraft	N
$f$	Brennweite	m
$HE$	hydroerosiver Verrundungsgrad	%
$h$	spez. Enthalpie	J/kg
$h_{vap}$	spez. Verdampfungsenthalpie	J/kg
$I$	Impuls; Intensität	N·s; a.u.
$k$	Konizitätsfaktor Spritzloch	-
$L_S$	Eindringtiefe	m
$m$	Masse	kg
$\dot{m}$	Massenstrom	kg/s
$n$	Anzahl Messungen	-
$p$	Druck	bar
$Q$	Einspritzvolumen	m <sup>3</sup>
$Q_{hyd}$	hydraulischer Durchfluss	cm <sup>3</sup> /30s
$\dot{Q}$	Einspritzverlauf	m <sup>3</sup> /s
$r$	radialer Abstand zur Strahlachse	m
$t$	Zeit	s
$T$	Temperatur	K
$T_S$	Siedetemperatur	K
$T_5$	Temperatur bei der 5 Vol-% verdampft sind	K
$T_{95}$	Temperatur bei der 95 Vol-% verdampft sind	K
$u$	Geschwindigkeit	m/s
$x$	Abstand zur Mittelachse der Einspritzdüse; Eingangsgröße DoE-Modell	m; -
$y$	Ausgangsgröße DoE-Modell	-

### Griechische Symbole

$\alpha$	(Kegel-) Winkel	°
$\beta$	Reflektionswinkel	°
$\eta$	dynamische Viskosität	Pa·s
$\nu$	kinematische Viskosität	m <sup>2</sup> /s
$\rho$	Dichte	kg/m <sup>3</sup>
$\sigma$	Oberflächenspannung; Breite (Gaußverteilung); Standardabweichung	N/m; m
$\varphi$	Seitenwinkel	°
$\psi$	Höhenwinkel	°

**Indizes**

0	Strahlzentrum
<i>B</i>	(Schlieren-) Blende
<i>Ber</i>	Bernoulli
<i>D</i>	Dampf
<i>Diff</i>	Differenz
<i>eff</i>	effektiv
<i>E</i>	Einspritzung
<i>F</i>	Flüssigkeit
<i>G</i>	Gas; Gaußverteilung
<i>Geg</i>	Gegen
<i>geo</i>	geometrisch
<i>kr</i>	kritisch
<i>Mess</i>	Messung
<i>Modell</i>	Modell
<i>max</i>	Maximum
<i>norm</i>	normiert
<i>R</i>	Rechteckverteilung
<i>Rail</i>	Raildruck
<i>Ref</i>	Referenzzustand
<i>rel</i>	relativ
<i>S</i>	Strahl
<i>Schw</i>	Schwelle
<i>SL</i>	Spritzloch
<i>Tr</i>	Tropfen
$\varphi$	Seitenwinkel
$\psi$	Höhenwinkel