Experimental investigation of the influence of nozzle-flow properties on the primary spray breakup

Dem Fachbereich Maschinenbau
an der Technischen Universität Darmstadt
zur
Erlangung des Grades eines Doktor-Ingenieurs
(Dr.-Ing.)
genehmigte

D i s s e r t a t i o n

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Benjamin Sebastian Balewski

aus Stuttgart

Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. C. Tropea, TU Darmstadt
Mitberichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. R. Kneer, RWTH Aachen
Tag der Einreichung:	26.10.2009
Tag der mündlichen Prüfung:	11.12.2009

D17

Forschungsberichte Strömungslehre und Aerodynamik

Band 24

Benjamin Balewski

Experimental investigation of the influence of nozzle-flow properties on the primary spray breakup

D 17 (Diss. TU Darmstadt)

Shaker Verlag
Aachen 2010

Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek
The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available in the Internet at http://dnb.d-nb.de.

Zugl.: Darmstadt, Techn. Univ., Diss., 2009

Copyright Shaker Verlag 2010
All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior permission of the publishers.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-9001-6
ISSN 1610-3114

Shaker Verlag GmbH • P.O. BOX 101818 • D-52018 Aachen
Phone: 0049/2407/9596-0 • Telefax: 0049/2407/9596-9
Internet: www.shaker.de • e-mail: info@shaker.de

Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Dissertation selbständig verfasst und nur die angegebenen Hilfsmittel verwendet habe. Ich habe bisher noch keinen Promotionsversuch unternommen.

Darmstadt, Oktober 2009 Benjamin Balewski

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen einer Industriepromotion im Bereich der Forschung und Vorausentwicklung der Robert Bosch GmbH in enger Zusammenarbeit mit dem Institut für Strömungslehre und Aerodynamik der TU Darmstadt; dort wurde auch die Mehrzahl der Experimente durchgeführt.
Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Cam Tropea für die Betreuung der Dissertation und die zahlreichen Anregungen, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Reinhold Kneer möchte ich mich für die Übernahme des Koreferates und damit für das Interesse an meiner Arbeit bedanken.

Bei Frau Dr. Barbara Heine möchte ich mich insbesondere für die stetige und motivierende Unterstützung und Betreuung bedanken. Die kritischen und äußerst durchdachten Anmerkungen und Ratschläge von Herrn Dr. Philippe Leick haben ebenfalls zum gelingen dieser Arbeit beigetragen. Des Weiteren möchte ich das Team der Wirkkette CR/PJ-SCE nennen und insbesondere die sehr fruchtbare Zusammenarbeit mit Herrn Fabian Fischer in Bezug auf den Abgleich mit der Simulation. Für die Mithilfe bei der Gestaltung der Düsen gilt mein Dank Herrn Dr. Gerhard Sünderhauf und Herrn Thorsten Rankel sowie für die Fertigung der Düsen Herrn Armin Schülke und Herrn Uwe Prang.
Herrn Dr. Walter Bauer und seinem Isotopenlabor gebührt ebenfalls großer Dank, da ohne sie die Durchführung der Röntgenuntersuchungen nicht möglich gewesen wären.

Den Kollegen am Institut für Strömungslehre und Aerodynamik an der TU Darmstadt möchte ich für die freundliche Aufnahme und den Beistand in der schwierigen Anfangszeit danken. Insbesondere ist hier die Unterstützung der Herren Nils van Hinsberg und Matthias Kinzel zu nennen, sowie von Frau Gisa Kadavelil, die mit ihrer stets positiven Einstellung und einem unerschöpflichen Vorrat an Schokolade über manches Tief hinweggeholfen hat. Frau Olympia Kyriopoulos gilt ebenfalls großer Dank, unter anderem auch für die zur Verfügungstellung ihrer Messdaten, welche zur Eliminierung von Fehlern und zur Optimierung der Software für die Bildauswertung beigetragen haben.

Auch Herr Raimund Schledde hat durch seine unermüdliche Unterstützung auf dem langen Weg zu einer funktionierenden Laser und Phasen Doppler Messtechnik zum Gelingen beigetragen.

Zuletzt möchte ich mich noch bei meinem Bruder Jonathan für die anregenden Diskussionen und das Korrekturlesen dieser Arbeit bedanken.

Abstract

In many applications the generation of sprays plays an important role, e.g. in an internal combustion engine the properties of the fuel spray are important for the quality of combustion and subsequently for the fuel consumption and the emissions. To design a spray with the desired characteristics the whole process of atomization has to be understood in detail, especially the connection between nozzle flow and primary breakup, the first part of atomization. Until now, the models describing this process are not satisfactory which is related to the very challenging problem of obtaining suitable experimental data from the nozzle flow as well as from the primary breakup region. This difficulty arises because of the usually small dimensions of the nozzle and the limited optical access to the primary breakup region. Since these data are missing, the modeling of breakup models is difficult and for numerical simulations no comparative data for validation are available. Therefore, the research objective of this work is to provide high resolution data sets of the flow and turbulence in the nozzle combined with quantitative information about the primary breakup region of the spray generated by this nozzle in the atomization regime. This is done for different nozzle geometries designed to obtain turbulence and a secondary flow field as well as for different Reynolds numbers achieved by firstly a change of the medium and secondly by a variation of flow rate.

For this propose, a modified Laser Doppler system (LD, LDV) with a very small measurement volume was applied to measure three components of the velocity and turbulence field inside the transparent nozzles with high resolution. To observe the drops generated and their three component velocity after the breakup right from the nozzle exit a HiDense Dual Mode Phase Doppler system (PD, PDA) was employed. To assure the applicability of the PD system in this optically dense area high speed images from the relevant regions are taken to show that not only ligaments but also spherical drops are present that can be measured by the PD system. In addition a software was developed to allow a quantitative analysis of the images providing ligament diameters, length, growth speed, orientation and surface velocity.

Due to the high optical density, no information about the inner spray regions is available by optical measurement techniques. Therefore a new X-ray measurement system was developed to perform extinction measurements of the spray. Combined with this data taken from different observation directions and a new developed tomographic reconstruction software, it was possible to calculate the three-dimensional density distribution of the spray in the primary breakup region.

Out of these data sets it was found that the turbulence level defines the type and the strength of the breakup. For very low turbulence levels a surface wave based breakup occurs, the onset of the breakup being defined by the viscosity and the velocity. For high turbulence levels, a turbulent primary breakup based on the formation of ligaments attached to the spray core is present. Here, a higher Reynolds number leads to smaller drops which can be explained by smaller scales available in the turbulent spectrum.

Kurzfassung

Die Erzeugung von Sprays spielt in vielen Anwendungen eine wichtige Rolle. Zum Beispiel sind die Eigenschaften eines Sprays in Verbrennungsmaschinen verantwortlich für die Qualität bzw. Vollständigkeit der Verbrennung und damit letztendlich für den Treibstoffverbrauch und den Schadstoffausstoß. Um ein Spray mit den erforderlichen Eigenschaften zu erzeugen muss der ganze Prozess der Zerstäubung verstanden werden, wobei besonders der Bereich des primären Strahlaufbruchs von großer Bedeutung ist. Bis heute sind die Modelle zur Beschreibung des Zerstäubungsprozesses nicht zufriedenstellend, was in der Schwierigkeit der experimentellen Datenbeschaffung sowohl von innerhalb der Düse als auch aus dem Bereich des primären Strahlaufbruchs begründet ist. Aufgrund der damit unvollständigen Datenbasis ist die Entwicklung von Aufbruchmodellen sehr schwierig und auch ein Abgleich mit numerischen Simulationen ist nur an wenigen Stellen möglich.

Aus diesen Gründen ist es ein Hauptziel der vorliegenden Arbeit auf experimentellem Weg einen hoch aufgelösten Datensatz zu erstellen, welcher sowohl Daten der Düsenströmung und der Turbulenzverteilung in der Düse als auch quantitative Daten aus der primären Aufbruchszone des Sprays, welches von derselben Düse erzeugt wird, enthält. Dazu werden verschiedene Düsengeometrien untersucht, die so konzipiert wurden, dass hohe Turbulenz und ein sekundäres Geschwindigkeitsfeld vorhanden ist. Zudem werden Experimente bei verschiedenen Reynoldszahlen vorgenommen, wobei einmal die Reynoldszahl durch eine Änderung in der Viskosität des Mediums und einmal durch eine Veränderung des Volumenstroms erreicht wird.

Zur Erfassung des dreidimensionalen Geschwindigkeit- und Turbulenzfeldes innerhalb transparenter Düsen wird ein modifiziertes Laser Doppler System (LD, LDV) verwendet, welches durch sein sehr kleines Messvolumen eine hohe örtliche Auflösung bereitstellt. Tropfengrößen und ihre dreidimensionale Geschwindigkeit im Raum werden mit einem HiDense Dual Mode Phase Doppler System (PD, PDA) vermessen, wobei Messungen schon direkt nach Düsenaustritt möglich sind. Die Anwendbarkeit dieser Messtechnik im düsennahen Bereich wurde anhand von Hochgeschwindigkeitsaufnahmen bestätigt, auf welchen neben Ligamenten auch sphärische Tropfen zu sehen sind. Zusätzlich wurde zur quantitativen Auswertung der Hochgeschwindigkeitsaufnahmen ein Programm erstellt, welches Durchmesser, Länge, Wachstumsgeschwindigkeit und Orientierung von Ligamenten sowie die Geschwindigkeit der Strahloberfläche berechnen kann.

Aufgrund der hohen optischen Dichte im Bereich des primären Strahlzerfalls sind optische Messtechniken nur begrenzt anwendbar. Um dieses Problem zu umgehen wurde eine neue Messtechnik entwickelt, welche auf der Extinktion von Röntgenstrahlung beruht. Mittels dieser Technik wurden Röntgenaufnahmen des Sprays aus verschiedenen Blickwinkeln erstellt. Aus diesen wurde anschließend mit einer ebenfalls neu erstellten Tomographie-Software die dreidimensionale Dichteverteilung im Spray rekonstruiert.

Basierend auf den gewonnen Datensätzen konnte gezeigt werden, dass das Turbulenzlevel sowohl die Art als auch die Stärke des Aufbruchs maßgeblich bestimmt. Bei sehr niederen Werten beginnt der Aufbruch über Oberflächenwellen und der Beginn des Aufbruchs wird über Viskosität und Strahlgeschwindigkeit definiert. Bei hohem Turbulenzniveau findet ein sogenannter turbulenter Aufbruch statt, welcher sich durch die Ausbildung von Ligamenten auszeichnet die vom Strahlkern ausgehen und anschließend in Tropfen zerfallen.

Contents

Nomenclature vii

1 Introduction 1

2 Fundamentals of atomization 3
2.1 Classification of breakup regimes . . . 3
2.2 Type of studies . . . 8
2.2.1 Real size geometries . . . 9
2.2.2 Large scale models . . . 9
2.2.3 Simplified geometries: principle nozzles . . . 10
2.3 Measurement techniques . . . 10
2.3.1 Optical techniques . . . 10
2.3.2 Sensor based techniques . . . 13
2.3.3 X-ray . . . 14
2.4 Influence of nozzle flow on primary breakup . . . 15
2.4.1 Boundary layer and relaxation of velocity profile . . . 15
2.4.2 Secondary flow field . . . 16
2.4.3 Turbulence . . . 16
2.4.4 Cavitation . . . 18
2.4.5 Pressure pulsation . . . 19
2.4.6 Dissolved gas . . . 19
2.4.7 Liquid and ambient gas interaction . . . 20
2.5 Objectives of this study . . . 20

3 Experimental setup and measurement techniques 23
3.1 Experimental facility . . . 23
3.2 Nozzle design . . . 25
3.3 Points of operation . . . 25
3.4 Temperature, viscosity and dissolved gas . . . 26
3.5 Laser Doppler system . . . 28
3.5.1 Measurement principle . . . 28
3.5.2 Adaption of the LD-system . . . 31
3.5.3 Two-velocity component measurements . . . 32

3.5.4 Three-velocity component measurements 33
3.5.5 System noise and spatial correction of the LD measurements . . . 35
3.5.6 Plausibility of flow field measurements 37
3.6 Phase Doppler system 39
3.6.1 Measurement principle 39
3.6.2 3d DualMode PD setup 40
3.6.3 Influence of settings on the measurement result 42
3.7 X-ray measurements - theoretical background 44
3.7.1 Basic principle 45
3.7.2 Tomography 45
3.7.3 Radon transformation 46
3.7.4 Fourier slice theorem 48
3.7.5 Filtered back projection 50
3.7.6 Filter 52
3.7.7 Fan-beam geometry 54
3.7.8 Cone-beam geometry 58
3.8 X-ray measurements - experimental setup 61
3.8.1 Spectral intensity distribution 61
3.8.2 Distortion correction 63
3.8.3 Acquisition of X-ray images 64
3.8.4 Sensitivity of the X-ray system 65
3.8.5 Absorption coefficient 66
3.8.6 Sensitivity in case of spray measurements 67
3.8.7 Angle step size for tomography 69
3.8.8 Results of the X-ray measurements 70
3.9 High-speed image evaluation 73
3.9.1 Extraction of sub-jets 74
3.9.2 Velocity 78
3.9.3 Drop diameter and two-dimensional drop velocity 79
3.9.4 Validation and limitation 80
3.9.5 Results of high speed evaluations 82
3.9.6 Calculation of the spray angle 87

4 Results and discussion 91
4.1 Influence of Reynolds number due to viscosity variation 91
4.1.1 Flow field 92
4.1.2 Turbulence level 94
4.1.3 Spray mass density distribution 95
4.1.4 Spray visualization 96
4.1.5 Spray angle 97
4.1.6 Summary of the viscosity variation 98
4.2 Influence of flow and turbulence field 100

4.2.1 Differences between geometries 100
4.2.2 Influence of nozzle geometry 100
4.2.3 Spray angle 101
4.2.4 Flow field and turbulence level 102
4.2.5 PD results 103
4.2.6 Summary of the geometry variation 110
4.3 Influence of Reynolds number due to flow rate variation 111
4.3.1 Flow field 111
4.3.2 Turbulence level 111
4.3.3 Optical imaging 113
4.3.4 Density 114
4.3.5 Drop diameter 116
4.3.6 Drop cross velocity and sub-jet growth speed 117
4.3.7 Contour length 118
4.3.8 Sub-jet diameter and length 119
4.3.9 Orientation of sub-jets 120
4.3.10 Summary of the flow rate variations 121
4.4 Sub-jet type of breakup 122
4.4.1 Ratio of sub-jet to drop diameter 122
4.4.2 Breakup type definition based on dimensionless numbers 125
4.4.3 Correlation between sub-jet and drop diameter distribution 126
4.4.4 Summary of sub-jet type of breakup 131

5 Summary and outlook **133**

Bibliography **143**

Nomenclature

A	$\left[m^2\right]$	area
a	$\left[-, \frac{m^2}{s^2}\right]$	constant
b	$[-]$	constant
c	$\left[\frac{m}{s}\right]$	speed of light
D	$[m]$	diameter
d	$[m]$	diameter
D_{10}	$[m]$	mean diameter
D_{32}	$[m]$	Sauter mean diameter
$\vec{e}$	$[-]$	unit vector
E	$[-]$	expected value
F	$[-]$	function in frequency domain
f	$[-]$	function in space domain
f	$[m]$	focal length
h	$[-]$	inverse Fourier transform
$\jmath$	$[m]$	complex number
I	$\left[\frac{W}{m^2}\right]$	intensity
L	$[m]$	length
l	$[m]$	length
s	$[m]$	length
M	$\left[\frac{g}{m^2}\right]$	area mass
N	$\left[\frac{1}{m^3}\right]$	concentration of drops
P	$[-]$	projection in frequency domain
p	$[-]$	projection in space domain
p	$[Pa]$	pressure
r, ϕ	$[m, rad]$	polar coordinates
S	$\left[\frac{W}{m^3}\right]$	spectral intensity density
s, β	$[m, rad]$	polar coordinates

t, s, z	$[m]$	Cartesian coordinates
Tu	$[\%]$	turbulence level
$\overline{u'^2}$	$\left[\frac{m^2}{s^2}\right]$	root mean square of velocity fluctuations
u	$\left[\frac{m}{s}\right]$	velocity, axial velocity
u, v	$[m]$	Cartesian coordinates
v	$\left[\frac{m}{s}\right]$	velocity in $y-$direction, radial velocity
w	$\left[\frac{m}{s}\right]$	velocity in $x-$direction, tangential velocity
x, y, z	$[m]$	Cartesian coordinates

Dimensionless numbers

Oh	$[-]$	Ohnesorge number
Re	$[-]$	Reynolds number
T	$[-]$	Taylor parameter
We	$[-]$	Weber number
Z	$[-]$	modified Ohnesorge number

Greek symbols

δ	$[m]$	fringe spacing
η	$\left[\frac{kg}{ms}\right]$	dynamic viscosity
Λ	$[m]$	radial spatial integral length scale
Λ	$[m]$	wave length
μ	$\left[\frac{1}{m}\right]$	attenuation coefficient
ν	$\left[\frac{m^2}{s}\right]$	kinematic viscosity
ω	$\left[\frac{1}{s}\right]$	vorticity
ω, Θ	$[m, rad]$	polar coordinates
$\overline{\mu}$	$\left[\frac{m^2}{kg}\right]$	absorption coefficient
ρ	$\left[\frac{kg}{m^3}\right]$	density
σ	$\left[\frac{kg}{s^2}\right]$	surface tension
ζ	$[m]$	distance between coordinate systems

Subscripts

0	initial value
B	blop
cr	critical value
D	drop
G, g	gas
L	ligament, sub-jet
L, l	liquid
s	detector

Abbreviations

LD,LDV	Laser Doppler measurements
pdf	probability density function
PD,PDA	Phase Doppler measurements
SMD	Sauter mean diameter
std	standard deviation