

Laserbasierte Untersuchung der Prozesse in einem Ottomotor mit strahlgeführtem Brennverfahren

Vom 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. Roman Stiehl

aus Haan

Berichterstatter:	Prof. Dr. rer. nat. habil. A. Dreizler
Mitberichterstatter:	Prof. Dr.-Ing R. Kneer
Tag der Einreichung:	01. Juli 2014
Tag der mündlichen Prüfung:	07. Oktober 2014

Stuttgart 2015

D17

Bibliografische Information der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Stiehl, Roman:

Laserbasierte Untersuchung der Prozesse in einem Ottomotor
mit strahlgeführtem Brennverfahren
ISBN 978-3-86376-161-5

Alle Rechte vorbehalten

1. Auflage 2015

© Optimus Verlag, Göttingen

© Coverfotos: Roman Stiehl

URL: www.optimus-verlag.de

Printed in Germany

Papier ist FSC zertifiziert (holzfrei, chlorfrei und säurefrei,
sowie alterungsbeständig nach ANSI 3948 und ISO 9706)

Das Werk, einschließlich aller seiner Teile, ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes in Deutschland ist ohne Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Danksagung

Diese Arbeit entstand während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Reaktive Strömungen und Messtechnik der TU Darmstadt in Zusammenarbeit mit der Abteilung Combustion and Emission Control der Daimler AG in Stuttgart. Mein besonderer Dank geht an Prof. Andreas Dreizler für die Möglichkeit, bei ihm am Fachgebiet zu promovieren. Seine positive Art und die fachliche Kompetenz waren eine ausgezeichnete Basis für meine Arbeit.

Darüber hinaus möchte ich mich bei Prof. Reinhold Kneer bedanken. Er hat mich während des Studiums für die Laserdiagnostik begeistert und ich freue mich sehr über sein Interesse an meiner weiteren Arbeit und die Übernahme des Koreferats.

Einen großen Teil der letzten Jahre durfte ich bei Daimler in Untertürkheim verbringen. Dort hat Dr. Christian Krüger, weit über seine Rolle als Teamleiter hinaus, zum Erfolg der Arbeit beigetragen. Viele der umgesetzten Ideen haben ihren Ursprung in einem unserer zahlreichen Gespräche. Mit vielen Kollegen habe ich täglich im Labor und Büro zusammengearbeitet und dabei große Unterstützung erfahren. Stellvertretend für alle möchte ich an dieser Stelle zwei von ihnen besonders danken: Dr. Jürgen Schorr hat mir stets den Rücken freigehalten, so dass ich mich voll und ganz auf die Arbeit im Labor konzentrieren konnte. Dort konnte ich immer auf die kompetente Hilfe und das offene Ohr von Günter Kukutschka zählen.

Ein großer Dank geht auch an die Kolleginnen und Kollegen in Darmstadt. Obwohl ich nicht so häufig am Fachgebiet war, habe ich mich immer gut aufgenommen gefühlt und neben dem fachliche Austausch den Zusammenhalt unter den Kollegen genossen. Mein besonderer Dank gilt Dr. Elias Baum und Dr. Brian Peterson, die mir bei allen Fragen zu Messtechnik und Auswertung stets kompetent geholfen haben. Bei Dr. Benjamin Böhm möchte ich mich für die vielen Diskussionen und Anregungen in den letzten Jahren bedanken. Den Studenten, mit denen ich zusammen arbeiten durfte, insbesondere bei Felix Eitel, danke ich für die Ideen, Impulse und den Spaß an der gemeinsamen Arbeit.

Auch meine Freunde und meine Familie haben einen großen Teil zum Gelingen dieser Arbeit, nicht nur in Bezug auf die Kommasetzung, beigetragen. Bei ihnen möchte ich mich für die Unterstützung während des Studiums und der Promotion bedanken. Der größte Dank gilt meiner Frau Lena. Ihr vorbehaltloser Rückhalt hat diese Arbeit erst möglich gemacht.

Darmstadt, im Juli 2014

Roman Stiehl

Für Lena.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	1
1.2	Stand der Forschung	2
1.3	Kontext und Ziel der Arbeit	4
1.4	Aufbau der Arbeit	6
2	Grundlagen	7
2.1	Grundlagen des Verbrennungsmotors	7
2.1.1	Thermodynamik des Ottomotors	9
2.2	Turbulente Strömungen	11
2.2.1	Erhaltungsgleichungen	11
2.2.2	Grundlegende Eigenschaften turbulenter Strömungen	12
2.2.3	Statistische Beschreibung	12
2.2.4	Kinetische Energie	14
2.2.5	Kohärente Strömungsstrukturen	15
2.2.6	Innere motorische Strömungen	16
2.3	Motorische Sprühstrahlen	17
2.4	Verbrennung	20
2.4.1	Flammeneigenleuchten	21
2.5	Direkteinspritzung im Ottomotor	23
2.5.1	Brennverfahren	23
2.5.2	Gemischbildung für strahlgeführte Brennverfahren	26
3	Optische Messtechnik	29
3.1	Strömungsmesstechnik	29
3.2	Diagnostik der Einspritzung	32
3.3	Verbrennungsdiagnostik	33
4	Versuchsaufbau und -durchführung	35
4.1	Transparentaggregat	35
4.2	Indiziermesstechnik am Motor	38
4.3	Untersuchte Einspritztimings	38
4.4	Optische Diagnostik am Motor	41
4.4.1	Versuchsaufbau für Geometrie 1	42
4.4.2	Versuchsaufbau für Geometrie 2	44
4.4.3	Versuchsumfang und Durchführung	44

5	Datenauswertung	47
5.1	Strömungsmessungen	47
5.1.1	Vektorberechnung	47
5.1.2	Kinetische und turbulente kinetische Energie	48
5.1.3	Wirbelerkennung	51
5.2	Einspritzdiagnostik	53
5.2.1	Sprayabstand	56
5.2.2	Trajektorie des Sprühstrahls	57
5.3	Verbrennungsdiagnostik	58
5.3.1	Angewendeter Algorithmus	58
5.3.2	Auswertung der Farbinformation für Geometrie 2	59
5.3.3	Abgleich mit den Indizierdaten	61
5.4	Statistische Auswertungen	62
5.4.1	Konditionierte Mittelwerte	62
5.4.2	Korrelationskoeffizient	62
5.4.3	Räumliche Darstellung des Korrelationskoeffizienten	63
6	Innermotorische Strömungen	65
6.1	Einlassströmung	65
6.2	Detaillierte Analyse der Kompressionsströmung für Geometrie 2	67
6.2.1	Geschwindigkeitsverteilung	70
6.2.2	Position des Tumblezentrums	71
6.2.3	Zyklus-zu-Zyklus Schwankungen	73
6.3	Einfluss der Geometrie auf die Kompressionsströmung	75
7	Interaktion zwischen Strömung und Einspritzung	81
7.1	Einfluss der ersten Einspritzung auf die Strömung	81
7.2	Fluktuationen der Einspritzung	89
7.2.1	Ansteuerdauer	90
7.2.2	Zylinderdruck und Gasdichte	91
7.2.3	Fluktuationen des Kraftstoffdruckes	92
7.2.4	Interaktion zwischen Strömung und Einspritzung	93
7.3	Vergleich der beiden Geometrien	100
7.3.1	Untersuchung des Sprayabstandes	100
7.3.2	Untersuchung der Trajektorie des Sprühstrahls	103
8	Motorische Verbrennung	107
8.1	Daten der Motorindizierung	107
8.2	Interaktion zwischen Strömung und Verbrennung	109
8.2.1	Untersuchung der Flammenausbreitung für Geometrie 1	109
8.2.2	Vergleich der Verbrennung in Geometrie 1 und 2	113
8.3	Spektrale Untersuchung der Flammeneigenleuchtens	114
9	Zusammenfassung und Ausblick	117
A	Algorithmus zur Bestimmung der Trajektorie des Sprühstrahls	131

Nomenklatur

Große lateinische Buchstaben		Einheit
A	Fläche	m^3
D	Durchmesser	m
E	Energie	J
F	Verteilungsfunktion	-
H_U	Heizwert	kJ kg^{-1}
H_{10}	10% Umsatzpunkt	$^{\circ}\text{KWvZOT}$
I	Intensität	spezifisch
K	massebezogene, kinetische Energie	$\text{m}^2 \text{s}^{-2}$
L_{st}	stöchiometrische Luftmenge	-
N	Anzahl	-
Q	Wärmemenge	J
\dot{Q}	Wärmestrom	W
R	Korrelationskoeffizient	-
T	Periodendauer	s
T	Temperatur	K
V	Volumen	m^3
W	Arbeit	J

Kleine lateinische Buchstaben		Einheit
f	Brennweite	m
	Frequenz	Hz
	Freiheitsgerade	-
g_i	Gravitation in Richtung i	m s^{-2}
h	Kolbenhub	m
i	Laufindex	-
k	Laufindex	-
	massebezogene, turbulente kinetische Energie	$\text{m}^2 \text{s}^{-2}$
l	Länge	m
l_0	integrales Längenmaß	m
l_k	Kolmogorov Längenmaß	m
m	Masse	kg
n	Drehzahl	s^{-1}
	Laufindex	-
p	Druck	bar
p_{me}	effektiver Mitteldruck	bar
p_{mi}	indizierter Mitteldruck	bar

Nomenklatur

p_{mr}	Reibmitteldruck	bar
s	Kolbenhub	m
	Schlupf	-
\dot{s}	Kolbengeschwindigkeit	m s^{-1}
s_L	laminare Flammengeschwindigkeit	m s^{-1}
s_T	turbulente Flammengeschwindigkeit	m s^{-1}
t	Zeit	s
u	Geschwindigkeit	m s^{-1}
x, y, z	kartesische Koordinaten	m

Große griechische Buchstaben

Einheit

Δ	Differenz	spezifisch
Γ	Wirbelkriterium	-

Kleine griechische Buchstaben

Einheit

α	Winkel	$^\circ$
$\delta_{i,j}$	Kronecker-Symbol	-
ϵ	Emissionsgrad	-
	Verdichtungsverhältnis	-
η	dynamische Viskosität	$\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$
κ	Isentropenexponent	-
λ	Verbrennungsluftverhältnis	-
	Wellenlänge	nm
λ_s	Schubstangenverhältnis	-
μ	dynamische Viskosität	$\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$
φ	beliebige Strömungsgröße	spezifisch
ρ	Dichte	kg m^{-3}
σ	Oberflächenspannung	N m^{-1}
	Standardabweichung	spezifisch
τ	Zeitkonstante	s
$\tau_{i,j}$	Defomationsgeschwindigkeitstensor	$\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$
θ	Kurbelwellenphase	$^\circ\text{KWvZOT}$

Definitionen

\mathbf{x}	Vektorgröße x
x	skalare Größe x
$ x $	Betrag
$\langle x \rangle$	zeitlicher Mittelwert
	Ensemble- bzw. Phasenmittelwert
\bar{x}	räumlicher Mittelwert

Indizes

0	auf den Ausgangszustand bezogen
∞	auf die Umgebung bezogen
<i>B</i>	Brennstoff
<i>b</i>	black body, dt.: Schwarzer Körper
<i>BB</i>	Blow By
<i>D</i>	Düse
<i>e</i>	effektiv
<i>fl</i>	Flüssigkeit
	Flamme
<i>G</i>	Gas
<i>g</i>	Grenz
<i>H</i>	Hub
<i>i</i>	innere
	Laufindex
	Richtung
<i>inj</i>	Einspritzung
<i>j</i>	Laufindex
	Richtung
<i>k</i>	Laufindex
	Richtung
<i>K</i>	Konvektion
<i>KF</i>	Korrelationsfenster
<i>kin</i>	kinetische
<i>L</i>	Luft
<i>max</i>	maximal
<i>min</i>	minimal
<i>p</i>	Partikel
	Pause
	Projektion
<i>prop</i>	Propagation, Ausbreitung
<i>r</i>	Reibung
<i>R</i>	Ruß
<i>rec</i>	Aufnahme
<i>rel</i>	relativ
<i>st</i>	stöchiometrisch
<i>Tr</i>	Tropfen
<i>TZ</i>	Tumblezentrum
<i>V</i>	Vektor
<i>WW</i>	Wandwärme
<i>Zyl</i>	Zylinder

Dimensionslose Kennzahlen

Oh	Ohnesorgezahl
Re	Reynoldszahl
We	Weberzahl

Abkürzungen

ASB	Ansteuerbeginn
ASE	Ansteuerende
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor, dt.: Komplementärer Metalloxid-Halbleiter
COV	Coefficient of Variance, dt.: Variationskoeffizient
FTLE	Finite Time Lyapunov Exponent
HS	High Speed, dt.: Hochgeschwindigkeit
IB	Irisblende
KW	Kurbelwinkel
KW	Kurbelwelle
KW _n ZOT	Kurbelwinkel nach dem oberen Totpunkt der Zündung
KW _v ZOT	Kurbelwinkel vor dem oberen Totpunkt der Zündung
LDA	Laser Doppler Anemometrie
LIF	Laser Induzierte Fluoreszenz
Nd:YLF	Neodymdotiertes Yttrium Lithium Fluorid
OT	Oberer Totpunkt
PDA	Phasen Doppler Anemometrie
PIV	Particle Image Velocimetry
RANS	Reynolds Averaged Navier Stokes, dt.: Reynolds-gemittelte Navier-Stokes
SA	Sprayabstand
TR	Time Resolved, dt.: zeitlich aufgelöst
UT	Unterer Totpunkt
ZZP	Zündzeitpunkt

Abbildungsverzeichnis

2.1	Darstellung der 4 Takte eines Ottomotorzyklus, nach [57].	8
2.2	Modell-Energiespektrum einer Strömung mit voll ausgebildeter, isotroper Turbulenz, nach [107].	14
2.3	Schematische Darstellung innermotorischer Strömungen, nach [72].	16
2.4	Schematische Darstellung und Einteilung des Primärzerfalls von Sprühstrahlen in Zerfallsregime, nach [92] und [120].	18
2.5	Spektrum der Chemilumineszenz von Iso-Oktan	22
2.6	Strahlungsspektrum eines schwarzen Strahlers.	22
2.7	p-V Diagramm für verschiedene Motoren mit Direkteinspritzung, nach [130].	24
2.8	Einteilung verschiedener Schichtbrennverfahren, nach [130].	25
2.9	Schematische Darstellung des Aufbaus von Hohlkegel-Injektoren, nach [94].	26
2.10	Schematische Darstellung des Sprühstrahls eines nach außen öffnenden Injektors.	27
3.1	Prinzip der Particle Image Velocimetry, nach [109].	29
4.1	Skizze des verwendeten Motors.	36
4.2	Kontur des Ansaugkanals für beide Geometrien.	37
4.3	Spannungsverlauf am Injektor für eine Dreifacheinspritzung.	39
4.4	Schematische Darstellung der untersuchten Einspritztimings.	41
4.5	Schematische Darstellung des Laserlichtschnitts im Brennraum.	42
4.6	Aufbau der optischen Diagnostik.	43
4.7	Laserpulsabstand Δt im gesamten Zyklus für die Messung mit Geometrie 2.	46
5.1	Beispielvektorfeld für Geometrie 2 zum Zeitpunkt $266,5^\circ\text{KWvZOT}$	48
5.2	Schematische Darstellung des Wirbelkriteriums, nach [15].	52
5.3	Beispiel der Anwendung des Wirbelkriteriums auf die innermotorische Strömung.	53
5.4	Beispiel Aufnahmen eines Sprühstrahls.	54
5.5	Beispiele für unterschiedlich ausgebildete Sprühstrahlen $263\ \mu\text{s}$ nach ASB. .	55
5.6	Schematische Darstellung des Algorithmus zur Bestimmung des Sprayabstandes.	56
5.7	Darstellung des Algorithmus zur Bestimmung der Trajektorie des Einspritzstrahls.	57
5.8	Beispielaufnahme des Flammeneigenleuchtens und schematische Darstellung der Auswertung.	58
5.9	Spektrale Sensitivität der Farbkamera Photron SA-X, nach [33].	59
5.10	Mittlere Fläche der Flamme für Timing A, aufgeteilt in die einzelnen Farbkanäle.	60

5.11	Vergleich der Daten des Flammeneigenleuchtens mit der Motorindizierung.	61
5.12	Darstellung der geometrischen Größen bei der Vektorprojektion.	63
5.13	Beispiel für die räumliche Verteilung des Korrelationskoeffizienten.	64
6.1	Mittlere Strömung in beiden Ebenen für Geometrie 2 zu den Zeitpunkten 300, 270, und 240°KWvZOT.	66
6.2	Mittlere Strömung in beiden Ebenen für Geometrie 2 zu den Zeitpunkten 210, 180, und 150°KWvZOT.	68
6.3	Mittlere Strömung in beiden Ebenen für Geometrie 2 zu den Zeitpunkten 120, 90, 60 und 45°KWvZOT.	69
6.4	Schematische Darstellung der möglichen Strömungsentwicklung in der Kompression für Geometrie 2.	71
6.5	Mittlere Position des Tumblezentrums für Geometrie 2 in Mittel- und Ventilebene.	72
6.6	Räumliche Verteilung der turbulenten kinetischen Energie für Geometrie 2 45°KWvZOT.	73
6.7	Auf die x-Position des Tumblezentrums konditionierte Mittelwerte der Strömung für Geometrie 2, 45 und 110°KWvZOT.	74
6.8	Autokorrelation der Koordinaten des Tumblezentrums für Geometrie 2 in der Kompression.	75
6.9	Vergleich der phasengemittelten Strömung für beide Geometrien in der Kompression.	76
6.10	Position des Tumblezentrums für Geometrie 1 und 2. Die Größe der Symbole zeigt den Anteil der Zyklen mit einem detektierten Tumblezentrum an. Die Kontur des Zylinderkopfes ist im oberen Teil angedeutet.	77
6.11	Räumlich gemittelte, turbulente kinetische Energie und Standardabweichung der Position des Tumblezentrums für beide Geometrien.	78
7.1	Phasengemittelte Strömung zum Zeitpunkt 36,75°KWvZOT für Timing E und F.	82
7.2	Phasengemittelte Strömung zum Zeitpunkt 33 und 29,25°KWvZOT für Timing E.	82
7.3	Mittlere Strömung nach der ersten Einspritzung für Timing F und G.	84
7.4	Mittlere Strömung nach der ersten Einspritzung für Timing B.	84
7.5	Räumlich gemittelte kinetische und turbulente, kinetische Energie $\overline{K_\theta}$ und $\overline{k_\theta}$ vor und nach der ersten Einspritzung für Timing B, E und G.	85
7.6	Räumlich gemittelte, kinetische Energie der Einzelzyklen E_{kin} vor und nach der ersten Einspritzung für Timing B.	86
7.7	Auf die vertikale Position des Tumblezentrums zum Zeitpunkt $\theta=45^\circ$ KWvZOT konditionierte Mittelwerte für Timing E zu den Zeitpunkten $\theta=45$ und $36,75^\circ$ KWvZOT	87
7.8	Akkumulierte Häufigkeitsverteilung des Spraysabstands der ersten und zweiten Einspritzung für Timing A.	89
7.9	Akkumulierte Häufigkeit des Sprayabstandes für Einspritzungen mit unterschiedlichen Ansteuerdauern.	91

7.10	Akkumulierte Häufigkeit des Sprayabstandes für Einspritzungen mit jeweils identischer Ansteuerdauer.	91
7.11	Phasengemittelter Verlauf des Kraftstoffdruckes für Timing A. Grau hinterlegt sind die Minimal- und Maximal-Werte für jeden Zeitpunkt. Ab dem Zündzeitpunkt (26°KWvZOT) sind die Werte aufgrund von elektrischen Interferenzen mit dem Zündsystem ausmaskiert.	92
7.12	Auf den Sprayabstand der zweiten Einspritzung konditionierte Mittelwerte der Strömung aus 25 Zyklen zum Zeitpunkt $\theta=30,75^\circ\text{KWvZOT}$ für Timing C.	93
7.13	Differenz der auf den Sprayabstand der zweiten Einspritzung konditionierten Mittelwerte zum Zeitpunkt $30,75^\circ\text{KWvZOT}$ und Räumliche Verteilung des Korrelationskoeffizienten zwischen der Strömung $30,75^\circ\text{KWvZOT}$ und dem Sprayabstand der zweiten Einspritzung für Timing C.	94
7.14	Räumliche Verteilung des Korrelationskoeffizienten zwischen der Strömung $40,5^\circ\text{KWvZOT}$ und dem Sprayabstand der erste Einspritzung für Timing C.	95
7.15	Akkumulierte Häufigkeit des Sprayabstandes der zweiten Einspritzung für Timing A,D und E	96
7.16	Phasengemittelte Strömung für Timing A, D und E zum Zeitpunkt $29,25^\circ\text{KWvZOT}$. Die Bereiche größter Korrelation aus Abbildung 7.13b sind hervorgehoben.	97
7.17	Turbulente kinetische Energie für Timing A, D und E zum Zeitpunkt $29,25^\circ\text{KWvZOT}$. Die Bereiche größter Korrelation aus Abbildung 7.13b sind hervorgehoben.	97
7.18	Räumliche Verteilung der Korrelationskoeffizienten zwischen dem Sprayabstand der zweiten Einspritzung und der Strömung zu den Zeitpunkten $\theta=32,25, 40, 48$ und $55,5^\circ\text{KWvZOT}$ für Timing C.	98
7.19	Phasenmittel der Strömung vor der zweiten Einspritzung ($29,25^\circ\text{KWvZOT}$) für beide Geometrien und Timing A.	100
7.20	Akkumulierte Häufigkeit des Sprayabstandes der ersten und zweiten Einspritzung für Timing A in Geometrie 1 und 2.	101
7.21	Räumliche Verteilung der Korrelationskoeffizienten zwischen dem Sprayabstand der zweiten Einspritzung und der Strömung zum Zeitpunkten $29,25^\circ\text{KWvZOT}$ für Timing A in beiden Geometrien. Zur Verdeutlichung zeigen die Vektorpfeile die phasengemittelte Strömung.	102
7.22	Räumliche Verteilung der Korrelationskoeffizienten zwischen dem Sprayabstand der zweiten Einspritzung und der Strömung zum Zeitpunkten $40,5^\circ\text{KWvZOT}$ für Timing A in beiden Geometrien. Zur Verdeutlichung zeigen die Vektorpfeile die phasengemittelte Strömung.	102
7.23	Mittlere Position des Schwerpunkts der Sprühstrahlen für Geometrien 1 und 2 zu drei verschiedenen Zeitpunkten nach ASB.	103
7.24	Mittelwerte der Strömung für beide Geometrien vor und nach der zweiten Einspritzung ($\theta=28,75$ und $23,5^\circ\text{KWvZOT}$)	104
8.1	Auf H10 konditionierte Mittelwerte der binarisierten Aufnahmen des Flammeneigenleuchtens zum Zeitpunkt $13,6^\circ\text{KWvZOT}$	110
8.2	Auf den 10% Umsatzpunkt konditionierte Mittelwerte der Flammenfläche und der x-Koordinate des Flammenschwerpunktes.	111

8.3	Auf die x-Koordinate der Flammenposition konditionierte Mittelwerte der Strömung in Geometrie 1 für Timing A während der zweiten Einspritzung ($\theta = 26,25$ KWvZOT).	112
8.4	Räumliche Verteilung des Korrelationskoeffizienten zwischen der Strömung und der horizontalen Position der Flamme für Timing A in Geometrie 1. . .	112
8.5	Mittlere Flammenfläche und Position des Flammenschwerpunktes für Timing A in Geometrie 1 und 2.	113
8.6	Auf den 10% Umsatzpunkt konditionierte Mittelwerte der Flammenfläche und des Rotanteils für Timing A in Geometrie 2.	115

Tabellenverzeichnis

4.1	Geometrische Daten des untersuchten Motors.	35
4.2	Parameter des Motorbetriebs.	38
4.3	Übersicht über die verwendeten Einspritztimings.	40
4.4	Übersicht der eingespritzten Kraftstoffmasse für die verwendeten Ansteuer- dauern.	41
4.5	Übersicht der durchgeführten Messungen.	45
8.1	Daten der Motorindizierung für beide Geometrien und ausgesuchte Timings.	108

1 Einleitung

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der experimentellen Untersuchung der Prozesse in einem Ottomotor mit Direkteinspritzung. Ihr Ziel ist das bessere Verständnis der einzelnen Teilaspekte sowie ihrer Interaktion, um einen Beitrag zur Weiterentwicklung dieser Technologie zu leisten. Im Folgenden wird zunächst die Motivation für die Arbeit beschrieben. Anschließend erfolgt ein Überblick über den aktuellen Stand der Technik. Die Zielsetzung sowie eine Beschreibung des Aufbaus der Arbeit schließen das Kapitel ab.

1.1 Motivation

Das Automobil stellt einen grundlegenden Bestandteil unseres Verkehrswesens dar. Mehr als 80% des Personenverkehrs innerhalb der Europäischen Union gehen darauf zurück [42]. Der Verbrennungsmotor ist dabei die mit Abstand am häufigsten genutzte Antriebsquelle. In den letzten Jahren sind verstärkt alternative Konzepte, wie der Elektroantrieb erforscht und erprobt worden. Für die kommenden Jahre ist mit einer Diversifizierung der Konzepte und einer wachsenden Zahl an elektrischen Antrieben zu rechnen. Der Anteil der reinen Elektrofahrzeuge an den Neuzulassungen wird für das Jahr 2020 weltweit mit 2% prognostiziert [63]. Die Europäische Union liegt dabei mit 9% für 2020 und 16% im Jahr 2025 deutlich über dem weltweiten Durchschnitt [11]. Ein größerer Erfolg wird hybriden Antriebssystemen prognostiziert. Sie kombinieren auf verschiedene Weisen einen Verbrennungsmotor mit einem elektrischen Antrieb. Bis zum Jahr 2025 wird ihr Anteil an den Neuzulassungen auf über 40% ansteigen [11]. Auch wenn die exakten Zahlen solcher Prognosen von vielen Unvorhersehbarkeiten abhängen, ist damit zu rechnen, dass der Großteil der Automobile in den nächsten 10 bis 20 Jahren mit einem Verbrennungsmotor ausgestattet sein wird. Daher stellt eine Weiterentwicklung der bestehenden Technologie ein wichtiges Forschungsfeld dar. Ein grundlegendes Entwicklungsziel ist dabei die Steigerung der Effizienz. Dies ist durch verringerte Kraftstoffkosten nicht nur ein Verkaufsargument gegenüber dem Kunden, sondern vermehrt auch vom Gesetzgeber gefordert. So wird neben den Schadstoffemissionen wie Stickoxiden, Rußpartikel und unverbrannten Kohlenwasserstoffen auch der Ausstoß von CO_2 reguliert [32]. Dieser ist über die chemische Zusammensetzung direkt an den Kraftstoffverbrauch gekoppelt. Die Entwicklung effizienterer Motoren stellt daher eine Möglichkeit zur Reduzierung des CO_2 Ausstoßes dar.

Im Bereich der Ottomotoren bietet die Beizindirekteinspritzung dafür besonderes Potential [122]. Dabei wird das Kraftstoff-Luft-Gemisch direkt im Brennraum erzeugt. Auf diese Weise kann es an den jeweiligen Betriebspunkt angepasst werden. Eine Möglichkeit für die Teillast ist der *Schichtbetrieb* [8]. Bei diesem Brennverfahren wird der Motor entdrosselt betrieben, wodurch Ladungswechselverluste reduziert werden. Die Effizienz des Motors kann durch diese Maßnahme um bis zu 20% im Vergleich zur Saugrohreinspritzung gesteigert werden [36]. Die Steuerung der Last geschieht über die eingespritzte Kraftstoffmenge. Bei einer homogenen Mischung mit der gesamten Luft entstünde dabei ein Gemisch, das durch eine konventionelle Zündanlage nicht mehr entzündet werden könnte. Daher erfolgt die Einspritzung in der Kompression, unmittelbar vor der Zündung. Durch den späten Einspritzzeitpunkt vermischt sich der Kraftstoff nur mit einem Teil der Luft und es entsteht ein heterogenes oder *geschichtetes* Kraftstoff-Luft-Gemisch. Das Ziel ist die Bereitstellung eines zündfähigen Gemisches zum Zündzeitpunkt an der Zündkerze. Fluktuationen in der Gemischzusammensetzung können dabei zu verschleppter Verbrennung oder Verbrennungsaussetzern führen [13]. Der Einsatz dieses Brennverfahrens wird daher vor allem durch die Stabilität der Verbrennung begrenzt.

Ein wichtiger Begriff in diesem Zusammenhang sind *Zyklus-zu-Zyklus Schwankungen*¹. Sie beschreiben allgemein die Schwankungen einer motorischer Größe während des stationären Betriebs². Der Begriff kann dabei sowohl für die Strömung, Gemischbildung, Verbrennung oder andere Prozesse im Motor verwendet werden. Aufgrund der stochastischen Natur vieler innermotorischer Vorgänge ist, abhängig von der betrachteten Größe, ein bestimmtes Maß an Fluktuationen zu erwarten. Diese stellen häufig keine Beeinträchtigung des Betriebs dar. Mit dem Begriff der Zyklus-zu-Zyklus Schwankungen werden dagegen im Allgemeinen unerwünschte, selten auftretende Phänomene bezeichnet. Beispiele dafür sind Verbrennungsaussetzer oder Vorentflammung an der Vollast. Um solche Phänomene auszuschließen, kann bei der Auslegung und Applikation von Motoren häufig nicht das gesamte Potential ausgenutzt werden [96]. Während die Detektion von Zyklus-zu-Zyklus Schwankungen der Verbrennung verhältnismäßig einfach ist, kann ihre Entstehung häufig nicht eindeutig beschrieben werden. Daher beschäftigen sich viele Untersuchungen mit diesem Thema. Einen Überblick darüber geben Ozdor u. a. [96] und Sick u. a. [126].

1.2 Stand der Forschung

Eine der am häufigsten angewendeten Messtechniken am Motor ist die Erfassung des Brennraumdruckes. Sie geschieht an modernen Prüfständen zeitlich aufgelöst, so dass der Druckverlauf innerhalb einzelner Zyklen erfasst wird. Dies ermöglicht die thermodynamische Analyse der motorischen Prozesse. Szekely und Alkidas [138] zeigen auf diesem Weg den Einfluss von Zündzeitpunkt, Einspritzzeitpunkten und Einspritzmengen auf den indizierten Mitteldruck im Schichtbetrieb. Ein wichtiger Aspekt in diesem Zusammenhang sind Verbrennungsaussetzer und Fluktuationen der abgegebenen Leis-

¹ Im Englischen häufig als *CCV* abgekürzt für *cycle-to-cycle variation*.

² Einige Autoren verwenden die kürzere Formulierung *zyklische Schwankungen*. Diese kann jedoch so interpretiert werden, dass die Schwankungen zyklisch, und damit regelmäßig wiederkehrend auftreten. Da dies nicht der Fall sein muss, wird im Rahmen dieser Arbeit diese Formulierung nicht verwendet.

tung, wie sie Litak u. a. [77] beobachten. Um deren Ursachen identifizieren zu können und weitere Informationen, insbesondere räumlich aufgelöste Daten, zu erhalten, werden optische Zugänge zum Brennraum verwendet. Dies kann über großflächige Glasteile oder Endoskope geschehen. Der optische Zugang erlaubt den Einsatz von Laserdiagnostik. Die folgenden Abschnitte geben eine Übersicht über die dabei verwendeten Methoden für die Geschwindigkeitsmessung, die Charakterisierung des Sprühstrahls und der Verbrennung. Darüber hinaus existieren weitere Verfahren zur Bestimmung der Temperatur oder der Rußkonzentration, auf die im Rahmen dieser Arbeit jedoch nicht eingegangen wird.

Geschwindigkeitsmessung

Eine häufig eingesetzte Strömungsmesstechnik ist die *Particle Image Velocimetry (PIV)* [37, 66, 113]. Sie basiert auf der Erfassung der Bewegung kleiner Partikel, die der Luft zugegeben werden. Bei der Verwendung einer Kamera ist es möglich, 2 Komponenten der Geschwindigkeit in einer Ebene zu bestimmen. Durch Messungen in mehreren Ebenen zeigen Voisine u. a. [144] sowie Bücken u. a. [24] die Dreidimensionalität der gemittelten Strömung in der Kompression. In den letzten Jahren haben die Weiterentwicklung von Kamera- und Lasersystemen es ermöglicht, Wiederholraten im kHz-Bereich zu erreichen. Dadurch ist es möglich, die zeitliche Entwicklung der Strömung zu erfassen und zu analysieren [45, 87, 102].

Neben der planaren Messung ist es durch den Einsatz mehrerer Kameras möglich, weitere Informationen zu erhalten. Beim sogenannten *Stereo-PIV* wird eine zweite Kamera eingesetzt, um die dritte Geschwindigkeitskomponente zu bestimmen [26]. Auch für diese Methode sind Aufnahmeraten im kHz Bereich möglich [125]. Durch den simultanen Einsatz von vier Kameras wird die Geschwindigkeit beim *tomographischen PIV* volumetrisch gemessen. Diese Messtechnik ist jedoch bislang auf eine Aufnahme pro Zyklus beschränkt [14]. Eine weitere Möglichkeit, dreidimensionale Daten zu erfassen, sind sogenannte *Scanning* Verfahren [23]. Bei diesen wird die Messebene in schneller Abfolge durch den Brennraum bewegt, wodurch im Anschluss das dreidimensionale Strömungsfeld rekonstruiert werden kann.

Charakterisierung der Einspritzung und Gemischbildung

Die detaillierte Untersuchung von Sprühstrahlen findet häufig in Druckkammern statt. Dadurch kann die Gasdichte im Motor unter kontrollierten Bedingungen nachgestellt werden. Durch Visualisierung können die Struktur [79, 155], Eindringtiefe [81] und Reproduzierbarkeit [146] untersucht werden. Die Verwendung eines Fernfeldmikroskops erlaubt, einzelne Tropfen und Ligamente zu beobachten [111]. Beheizte Kammern bieten darüber hinaus die Möglichkeit, auch die Bedingungen der Verdunstung nachzustellen [80]. Neben der Visualisierung des Sprühstrahls, werden auch die Tropfengröße und -geschwindigkeit gemessen. Zwei übliche Verfahren dazu sind die *Laser Doppler Anemometrie (LDA)* und die *Phasen Doppler Anemometrie (PDA)* [64, 71, 89]. Sie nutzen die Streuung und Interferenz von kohärentem Laserlicht an sphärischen Partikeln zur zeitaufgelösten Messung an einem Punkt im Sprühstrahl. Für eine Charakterisierung des gesamten Sprühstrahls muss daher das Messvolumen verschoben, und der Einspritzvorgang

wiederholt werden. Eine Alternative dazu bietet die simultane, planare Messung des Streulichts und der angeregten Fluoreszenz. Aus dem Verhältnis der beiden Intensitäten kann der Tropfendurchmesser bestimmt werden [49, 128]. Aufgrund der geringeren Komplexität wird bei der Untersuchung im Motor häufig die Form des Sprühstrahls durch Streulicht visualisiert [34, 79, 123].

Die Einspritzung dient im motorischen Kontext der Bereitstellung eines Gemisches aus Kraftstoffdampf und Luft. Um die Kraftstoffkonzentration zu messen, wird häufig die *Laser induzierte Fluoreszenz (LIF)* angewendet [9, 46]. Dazu wird ein Tracer durch Laserlicht zur Fluoreszenz angeregt und diese mit einer Kamera aufgezeichnet. Die Kraftstoffkonzentration kann anschließend aus der Fluoreszenzintensität unter Kenntnis der Laserenergie und das Verhaltens des Tracers in den vorliegenden Umgebungsbedingungen bestimmt werden. Für eine quantitative Messung ist daher ein erheblicher Kalibrations- und Messaufwand notwendig. Eine Alternative ist die rein qualitative Analyse der Fluoreszenz [110]. Sie gibt Auskunft über die räumliche Verteilung des Kraftstoffdampfes, ohne Informationen über die Konzentration.

Verbrennung

Bei der Verbrennungsdiagnostik in Motoren wird häufig die Position und Ausdehnung der Flamme bestimmt. Die einfachste Art, dies zu erreichen ist die Detektion des Flammeneigenleuchtens mit einer Kamera [4, 25, 43]. Diese Methode gibt sehr gut die Topographie der Flamme wieder. Dabei ist zu beachten, dass die Informationen entlang der Sichtachse integriert werden und somit aus unterschiedlichen Ebenen stammen können. Unter der Annahme einer sphärischen Flamme lässt sich dennoch ihre Größe bestimmen [68]. Um die Flammenausbreitung zu untersuchen, kann das OH^* -Radikal als Marker der Flammenfront verwendet werden. Sein Vorkommen wird über Laser induzierte Fluoreszenz planar detektiert. Dies ermöglicht die Lokalisierung der Flammenfront in einer Ebene [5, 18, 86].

1.3 Kontext und Ziel der Arbeit

Die beschriebenen Messtechniken sind in der Lage, die innermotorischen Prozesse sehr gut zu beschreiben. Um ihre Interaktion zu verstehen sind besonders Experimente geeignet, in denen mehrere Techniken simultan eingesetzt werden. Peterson u. a. [103] zeigen in ihrer Arbeit das Potential dieser Multiparameter-Experimente. Durch die simultane Messung von Strömung, Kraftstoffkonzentration und Flammenposition sind sie in der Lage, Ursachen für das unterschiedliche Flammenwachstum zu Beginn der Verbrennung zu identifizieren. Wieske u. a. [152] kommen bei einem ähnlichen Experiment zu dem Ergebnis, dass Zyklus-zu-Zyklus Schwankungen der Verbrennung auf die innermotorische Strömung zurückzuführen sind. Buschbeck u. a. [25] beobachten bei der simultanen Messung von Geschwindigkeit und Flammenposition eine Konvektion der Flamme durch die Motorströmung. Bei simultanen Messungen der Gasgeschwindigkeit und der Strahlausbreitung [118] bzw. der Geschwindigkeit der Kraftstofftropfen [116] wird in Druckkammern ein von der Einspritzung induziertes Strömungsfeld beobachtet.

Experimente mit HS-PIV zeigen diese Interaktion auch zeitaufgelöst in Motoren [34, 135].

Wie in Kapitel 1.1 beschrieben wird, stellen Zyklus-zu-Zyklus Schwankungen der Verbrennung eine große Herausforderung bei der Weiterentwicklung des Schichtbrennverfahrens dar. Ein wichtiger Schritt auf dem Weg zur Reduzierung dieser Schwankungen ist die Identifikation ihrer Ursachen. In vielen Untersuchungen wurden Fluktuationen der innermotorischen Strömung beobachtet [12, 48, 86, 140]. Analysen der Einspritzung in Druckkammern zeigen einen sehr reproduzierbaren Sprühstrahl [80, 89, 118]. Bei innermotorischen Untersuchungen hingegen werden häufig Fluktuationen seiner Form beobachtet [34, 79]. Eine mögliche Ursache von Zyklus-zu-Zyklus Schwankungen des Sprühstrahls ist daher die Interaktion zwischen Einspritzung und innermotorischer Strömung.

Das Ziel dieser Arbeit ist die Untersuchung der innermotorischen Prozesse beim Schichtbrennverfahren. Der Fokus liegt dabei auf der Identifikation möglicher Ursachen von Zyklus-zu-Zyklus Schwankungen der gemessenen Größen. Dazu wird die Strömung mittels planarer HS-PIV gemessen. Das Eindringen des Einspritzstrahls wird simultan durch Streulicht visualisiert. Zusätzlich wird das Flammeneigenleuchten über eine weitere Kamera aufgenommen. Die simultane Verwendung zeitauflösender Messtechnik erlaubt eine Untersuchung der zeitlichen Entwicklung der einzelnen Phänomene sowie die Analyse möglicher Interaktionen. Im Vordergrund steht dabei nicht die Entwicklung neuer Messtechnik, sondern ihre Anwendung zum besseren Verständnis der innermotorischen Prozesse.