

Laserbasierte Untersuchung innermotorischer Prozesse

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

Elias Baum, M.Sc.

aus Arlesheim

Berichterstatter:	Prof. Dr. rer. nat. A. Dreizler
Mitberichterstatter:	Prof. Dr. rer. nat. V. Sick
Tag der Einreichung:	22. August 2013
Tag der mündlichen Prüfung:	05. November 2013

Darmstadt 2013

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.

Baum, Elias:

Laserbasierte Untersuchung innermotorischer Prozesse

ISBN 978-3-86376-068-7

Alle Rechte vorbehalten

1. Auflage 2013

© Optimus Verlag, Göttingen

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 im Rahmen meiner fünfjährigen Tätigkeit als Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Reaktive Strömungen und Messtechnik an der Technischen Universität Darmstadt.

Mein besonderer Dank gilt dem Fachgebietsleiter Herrn Prof. Dr. rer. nat. Andreas Dreizler für die Möglichkeit zur Promotion und das mir entgegengebrachte Vertrauen in den letzten Jahren. Neben den ausgezeichneten Rahmenbedingungen waren auch die zahlreichen Diskussionen, Ideen und Vorschläge immer eine Bereicherung. Letztendlich trug die uneingeschränkte Unterstützung in all den Jahren nicht unwesentlich zu dem Gelingen der Arbeit bei.

Weiterhin gilt mein aufrichtiger Dank Prof. Dr. rer. nat. Volker Sick von der University of Michigan für die Übernahme des Koreferats und das damit zum Ausdruck gebrachte Interesse an meiner Arbeit. Nicht oft ergibt sich die Möglichkeit, dass man über die gesamte Zeit der Arbeit in so engem Kontakt steht. Dies war eine Bereicherung.

Bei Herrn Dr. Christof Surrman und Herrn Dr. Dirk Michaelis von der LaVision GmbH möchte ich mich für die gemeinsame Arbeit bedanken. Manchmal sind es glückliche Fügungen, dass die richtigen Personen zur richtigen Zeit zusammenkommen. Die daraus entstandenen Weiterentwicklungen haben großes Potential für ein weiteres Verständnis der innermotorischen Prozesse. Gleiches gilt für Dr. Sven Grundmann (DDC, TU Darmstadt). Manchmal macht ein kurzer Nebensatz bei einem Bier den Unterschied.

Meinen Kollegen am Fachgebiet, genauer gesagt an den Fachgebieten RSM und EKT, möchte ich für die großartige Arbeitsatmosphäre danken. Neben meinen unzähligen Bürokollegen: Desislava Dimitrova, Frederik Fuest, Thilo Kissel, Norman Fuhrmann, Kai Aschmoneit und Werner Gumprich und den Kollegen aus erster Stunde Anja Ketelheun und Thomas Breitenberger möchte ich vor allem Philipp Trunk, Markus Mann und Jens Hermann danken, mit welchen ich auf dienstlichen und privaten Reisen viele tolle Erlebnisse verbinde. Andreas Ludwig und Simone Schönfelder danke ich für die Unterstützung im Labor. Stellvertretend für die Werkstatt danke ich Roland Berntheisel für die tolle Zeit, die Diskussionen und Reibereien, welche letztendlich nicht unwesentlich für den erfolgreichen und zügigen Aufbau des Prüfstands verantwortliche waren.

Ein besonderer Dank gilt Brian Peterson. Diese Arbeit ist in großen Stücken durch unseren gegenseitiges Streben nach einem Verständnis der innermotorischen Prozesse inspiriert. Ich hätte mir keinen besseren Weggefährten für diese Zeit, sowohl im Labor wie auch Privat, vorstellen können. Auch Guido Künne möchte ich als langjähriger Bürokollegen an dieser Stelle gesondert herausstellen. In beiden sehe ich nach der gemeinsam verbrachte Zeit mehr Freunde wie Kollegen.

Aus tiefstem Herzen danke ich meiner Familie und besonders meiner Mutter Sandra Baum-Meyer für die uneingeschränkte Unterstützung während meiner Schul- und Studienzeit und das mir entgegengebrachte Vertrauen in all den Jahren. Ohne sie wäre mir dieser Weg verwehrt geblieben.

Zum Abschluss gebührt der Dank meiner Freundin Sonja Morat, die in den letzten Jahren viele Entbehrungen still ertragen hat und während meiner Promotion eine unersätzbliche Stütze war.

Darmstadt, im August 2013

Elias Baum

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	1
1.2	Stand der Forschung	3
1.2.1	Geschwindigkeitsmessung	3
1.2.2	Innermotorische Verbrennung	5
1.3	Zielsetzung und Struktur der Arbeit	6
2	Grundlagen	8
2.1	Grundlagen des Verbrennungsmotors	8
2.1.1	Hubkolbenmotor mit Fremdzündung	9
2.1.2	Geometrische Eigenschaften	11
2.1.3	Thermodynamik der innermotorischen Verbrennung	12
2.2	Beschreibung turbulenter Strömungen	14
2.2.1	Erhaltungsgleichungen	14
2.2.2	Eigenschaften der Turbulenz	15
2.3	Grundlagen turbulenter Verbrennung	19
2.3.1	Reaktionskinetik	19
2.3.2	Beschreibung laminarer Vormischflammen	21
2.3.3	Struktur turbulenter Vormischflammen	23
2.3.4	Propagation von Vormischflammen	26
3	Motorprüfstand	28
3.1	Prüfstand	28
3.1.1	Antrieb	28
3.1.2	Massenausgleich	29
3.1.3	Zündung	31
3.2	Medienversorgung	31
3.2.1	Ansaugluftkonditionierung	31
3.2.2	Kraftstoffversorgung	32
3.2.3	Synthetische Abgasrückführung	33
3.3	Instrumentierung	35
3.4	Zylinderkopf	37
3.5	Betriebspunkte	38
4	Messmethoden	39
4.1	Particle Image Velocimetry	39
4.1.1	Partikel	40
4.1.2	Abbildung	42

4.1.3	Stereoskopisches PIV	43
4.1.4	Tomographisches PIV	45
4.1.5	Gradientenbestimmung	48
4.1.6	Identifikation von Strukturen	50
4.2	Chemilumineszenz	53
4.3	Laserinduzierte Fluoreszenz	54
4.3.1	Grundlagen	55
4.3.2	Anwendung unter motorischen Bedingungen	56
5	Strömungsfeldmessungen im Verbrennungsmotor	59
5.1	Experimentelle Aufbauten und Versuchsdurchführung	60
5.1.1	Allgemein	60
5.1.2	Betriebspunkte	61
5.1.3	Particle Image Velocimetry	63
5.1.4	Stereoskopisches PIV	66
5.1.5	Volumetrisches PIV	67
5.1.6	Vektorberechnung	68
5.1.7	Synchronisation und variables Δt	70
5.2	Verifikation der Ergebnisse	72
5.2.1	Allgemeine Fehlerabschätzung	72
5.2.2	Fehlerabschätzung Tomo-PIV	74
5.2.3	Standardabweichung der Mittelwertschätzung	80
5.2.4	Vergleichbarkeit der Geschwindigkeitsmessungen	85
5.2.5	Gleichlaufschwankungen und zeitaufgelöstes PIV	90
5.3	Ergebnisse und Diskussion	91
5.3.1	Mittleres Strömungsfeld	92
5.3.2	Fluktuationen der Brennraumströmung	97
5.3.3	Einfluss der Drehzahl	102
5.3.4	Kurbelwinkel-aufgelöstes Geschwindigkeitsfeld	107
5.3.5	Struktur der instantanen Brennraumströmung	113
6	Untersuchung der innermotorischen Flammenausbreitung	124
6.1	Experimenteller Aufbau und Versuchsdurchführung	125
6.1.1	Zeitaufgelöstes stereoskopisches PIV	125
6.1.2	Zeitaufgelöste Zwei-Ebenen-OH-PLIF	127
6.1.3	Zeitaufgelöstes Flammeneigenleuten	130
6.1.4	Versuchsdurchführung	130
6.1.5	Betriebspunkt	132
6.2	Datenauswertung und Bestimmung der Flammenausbreitung	134
6.2.1	Konvektionsgeschwindigkeit	135
6.2.2	Datenaufbereitung der OH-PLIF-Aufnahmen	135
6.2.3	Oberflächenrekonstruktion und Bestimmung des lokalen Normalen- vektors	138
6.2.4	Ermittlung der Eigengeschwindigkeit im Raum	138
6.2.5	Bestimmung der integralen Eigengeschwindigkeit	140
6.3	Verifikation der Ergebnisse	142

6.3.1	Verifikation des konvektiven Transports	142
6.3.2	Einfluss der Detektion auf die Reaktionszone	147
6.3.3	Einfluss der Krümmung	150
6.3.4	Fehlerabschätzung der Eigengeschwindigkeit	151
6.4	Ergebnisse und Diskussion	152
6.4.1	Mittlere Strömungsgeschwindigkeit	153
6.4.2	Mittlere Flammenposition	154
6.4.3	Integrale Eigengeschwindigkeit	154
6.4.4	Lokale Eigengeschwindigkeit	157
6.5	Bewertung und Ausblick	165
7	Zusammenfassung und Ausblick	167
	Literaturverzeichnis	170

Nomenklatur

Große lateinische Buchstaben		Einheit
A	Fläche	m^2
	Präexponentieller Faktor des Arrhenius-Ansatzes	spezifisch
\mathcal{A}	Anregung allg.	–
A_{ki}	Einstein-Koeffizient für die spontane Emission	$\text{m}^2 \text{J}^{-1} \text{s}^{-2}$
A_T	Turbulente Flammenoberfläche	m^2
B_{ik}	Einstein-Koeffizient für die stimulierte Absorption	$\text{m}^2 \text{J}^{-1} \text{s}^{-2}$
C_k	Molare Konzentration der Spezies k	mol m^{-3}
D	Diffusionskoeffizient	$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$
	Durchmesser	m
\mathcal{D}	Detektion allg.	–
E	Energetischer Zustand	J
	Räumliche Intensitätsverteilung	–
\mathcal{E}	Emission allg.	–
E_A	Aktivierungsenergie	$\text{J mol}^{-1} \text{K}^{-1}$
F	Akkumulierte Verteilungsfunktion	–
F_f	Detektierter Anteil der Fluoreszenz	–
G	Wahrscheinlichkeit	–
G_σ	Gaußscher Kernel	–
H	Enthalpie	J
H_U	Unterer Heizwert	J
I	Strom	A
	Intensität	–
L	Massenverhältnis	–
\mathcal{L}	Charakteristische Längenskala	m
M	Mittlere molare Masse	kg mol^{-1}
M_k	Molare Masse der Spezies k	kg mol^{-1}
M_0	Abbildungsmaßstab	–
N	Anzahl der Zyklen	–
	Anzahl der Kameras	–
	Anzahl der Teilchen	–
N_g	Anzahl der Geisterpartikel	–
N_{ppp}	Anzahl der Partikel pro Pixel	–
N_R	Anzahl der Elementarreaktionen	–
N_p	Anzahl der Partikel	–
N_S	Anzahl der Spezies	–
P	Leistung	W
	Druckterm	s^{-1}

\mathcal{P}	Produktionsterm allg.	spezifisch
P_k	Dissoziationskonstante der Spezies k	s^{-1}
Q	Wirbelkriterium (Q -Kriterium)	s^{-2}
\dot{Q}	Brennverlauf	$J \text{ rad}^{-1}$
Q_k	Quenching-Konstante der Spezies k	s^{-1}
R	Spezifische Gaskonstante	$J \text{ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$
\mathcal{R}	Universelle Gaskonstante	$J \text{ mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$
R_{ij}	Autokovarianz	–
T	Temperatur	K
\mathcal{T}	Transportterm allg.	spezifisch
S_{ij}	Deformationsgeschwindigkeitstensors	s^{-1}
U	Innere Energie	J
	Spannung	V
\mathcal{U}	Charakteristische Geschwindigkeit	m s^{-1}
V	Volumen	m^3
$ V $	Geschwindigkeitsmagnitude	m s^{-1}
$V_{k,i}$	Diffusionsgeschwindigkeit der Spezies k in die Richtung i	m s^{-1}
W	Arbeit	W
X_k	Stoffmengenanteil der Spezies k	–
Y_k	Massenanteil der Spezies k	–

Kleine lateinische Buchstaben

Einheit

b	Bohrung	m
\bar{c}	Mittlere Kolbengeschwindigkeit	m s^{-1}
c_v	Spezifische Wärmekapazität bei konstantem Volumen	$J \text{ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$
c_p	Spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck	$J \text{ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$
d_i	Disparität in die Raumrichtung i	m
f	Brennweite	m
f_B	Boltzmann-Fraktion	–
f_0	Grenzfrequenz	s^{-1}
$f_{\#}$	Blendenzahl	–
g_i	Gravitation in die Richtung i	m s^{-2}
h	Hub	m
	Plancksches Wirkungsquantum	J s
h_U	Spezifischer Heizwert	$J \text{ kg}^{-1}$
k	Turbulente kinetische Energie	$\text{m}^2 \text{ s}^{-2}$
	Geschwindigkeitskoeffizient des Arrhenius-Ansatzes	–
	Krümmung	m
l	Pleuellänge	m
l_{η}	Kolmogorov-Länge	m
l_0	Integrale Länge	m
m	Masse	kg
\dot{m}	Massenstrom	kg s^{-1}
n	Drehzahl	s^{-1}
	Polytropenexponent	–
n_i	Anteil des Normalenvektors in die Richtung i	–

Nomenklatur

p	Druck	bar
$p(\varphi)$	Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der Größe φ	inverse Einheit
p_i	Indizierter Mitteldruck	bar
r	Radius	m
	Pleuelradius	m
r_j	Reaktionsrate einer Elementarreaktion j	$\text{mol m}^{-3} \text{s}^{-1}$
s	Kolbenweg	m
\dot{s}	Kolbengeschwindigkeit	m s^{-1}
s_a	Absolute Flammengeschwindigkeit	m s^{-1}
s_c	Umsatzgeschwindigkeit	m s^{-1}
s_d	Versatzgeschwindigkeit	m s^{-1}
s_{ij}	Fluktuierender Anteil des Deformationsgeschwindigkeitstensors	s^{-1}
s_L	Laminare Flammengeschwindigkeit	m s^{-1}
s_T	Turbulente Flammengeschwindigkeit	m s^{-1}
t	Zeit	s
u	Spezifische innere Energie	J kg^{-1}
u_i	Geschwindigkeit (in Richtung i)	m s^{-1}
w_i	Geschwindigkeit eines Punktes an der Flammenoberfläche Θ	m s^{-1}
w_{ij}	Wichtungsfunktion	–
x	Umgesetzter Massenanteil	–
x_i	Kartesische Koordinaten (x, y, z)	m

Große griechische Buchstaben

Einheit

Γ	Spektrales Überlappungsintegral	–
Γ_1	Rotationskriterium	–
Δ_{diff}	Abstand zwischen zwei Konturen in Normalenrichtung	m
Δh_m	Spezifische Reaktionswärme	J kg^{-1}
$\Delta \dot{m}$	Massendifferenz Kolben (Blow-By)	kg s^{-1}
Δ_n	Abstand in Normalenrichtung	m
Δp	Druckdifferenz	bar
Δt	Zeitlicher Abstand	s
Δu_i	Geschwindigkeitsdifferenz in die Richtung i	m s^{-1}
ΔU	Betrag der Geschwindigkeitsdifferenz	m s^{-1}
Δx	Abstand in eine Raumrichtung	m
Δz	Lichtschnittdicke	m
	Differenz in z -Richtung	m
Θ	Flammenoberfläche	m^2
Ω	Raumwinkel	°
Ω_{ij}	Rotationstensor	s^{-1}
Ψ	Wellenfunktion	–

Kleine griechische Buchstaben

Einheit

α	Winkel	°
α_p	Koeffizient der Druckabhängigkeit von s_L	–
α_T	Koeffizient der Temperaturabhängigkeit von s_L	–
β	Winkel	°

δ	Flammendicke	m
δ_{ij}	Kronecker-Symbol	—
$\delta(z)$	Schärfentiefe	m
γ	Winkel	°
η	Umwandlungseffizienz	—
ϵ	Kompressionsverhältnis	—
	Transmissionseffizienz	—
ε	Dissipation	W
ε_{ijk}	Alternierender Operator	—
γ	Verhältnis der spezifischen Wärme	—
κ	Isentropenexponent	—
λ	Brennstoff-Luft-Verhältnis	—
	Wärmeleitfähigkeit	W m ⁻¹ K ⁻¹
	Wellenlänge	nm
	Kontrastparameter	—
μ	Dynamische Viskosität	kg s ⁻¹ m ⁻¹
	Relaxationsparameter	—
	Reduzierte Masse	—
ν	Kinematische Viskosität	m ² s ⁻¹
ν'_k	Stöchiometrischer Koeffizient der Eduktspezies k	—
ν''_k	Stöchiometrischer Koeffizient der Produktspezies k	—
σ	Standardabweichung	spezifisch
σ_{km}	Stoßquerschnitt	m ²
θ	Kurbelwinkel	°
ρ	Dichte	kg m ⁻³
τ	Zeitspanne	s
	Rotationsdauer	s
τ_η	Rotationsdauer der Kolmogorov-Skalen	s
τ_{ij}	Stress-Tensor	kg s ⁻¹ m ⁻¹
τ_0	Zeitkonstante	s
ω	Winkelgeschwindigkeit	rad s ⁻¹
ω_i	Wirbelstärke um die Achse i	s ⁻¹
$\dot{\omega}_k$	Chemischer Quellterm einer Spezies k	kg m ⁻³ s ⁻¹
φ	Beliebige Größe	spezifisch

Tiefgestellte Indizes

A	Flächenbezogen
B	Brennstoff
b	Rückwärtsreaktion
C	Chemisch
c	Kompression
cr	Feuersteg
cyl	Brennraum
e	Elektronischer Zustand
eq	Gleichgewichtszustand
F	Flamme

f	Gefuerter Motorbetrieb
	Kontinuierliche Phase
f	Vorwärtsreaktion
<i>h</i>	Hub
ign	Zündung
in	Einlassseite
interp	Interpoliert
L	Luft
	Laminar
m	Geschleppter Motorbetrieb
max	Maximum
min	Minimum
norm	Normiert
out	Auslassseite
p	Disperse Phase
<i>r</i>	Rotatorischer Zustand
rel	Relativ
st	Stöchiometrie
T	Turbulent
th	Thermisch
<i>V</i>	Verlust
<i>v</i>	Vibronischer Zustand
zu	Zugeführt
0	Ausgangszustand
∞	Umgebung

Hochgestellte Indizes

b	Verbrannt
u	Unverbrannt
'	Ausgangszustand
	Ableitung
	Fluktuation
"	Endzustand

Operatoren und Symbole

\hat{H}	Hamiltonoperator
$\hat{\cdot}$	Oberflächengemittelt
$\overline{\cdot}$	Zeitgemittelt
$\langle \cdot \rangle$	Phasengemittelt
$(\cdot)^*$	Übergangskomplex
$\tilde{\cdot}$	Approximiert
	Räumlich gefiltert
$ \cdot $	Betrag
$\ \cdot\ $	Frobeniusnorm

Dimensionslose Kennzahlen

<i>Da</i>	Damköhler-Zahl
<i>Ka</i>	Karlovitz-Zahl
<i>Le</i>	Lewis-Zahl
<i>Ma</i>	Mach-Zahl
<i>Re</i>	Reynolds-Zahl

Abkürzungen

AGR	Abgasrückführung
AÖ	Auslass öffnet
AS	Auslass schließt
CAD	Computer-Aided Design
CL	Chemilumineszenz
CMOS	Complementary Metal–Oxide–Semiconductor
CNG	Compressed Natural Gas
DNS	Direkte Numerische Simulation
DZ	Diffusionszone
EÖ	Einlass öffnet
ES	Einlass schließt
ETU	Engine Timing Unit, Motorsteuergerät
FPGA	Field Programmable Gate Array
IRO	Intensified Relay Optic, dt.: Linsengekoppelter Bildverstärker
KV	Kontrollvolumen
KW	Kurbelwinkel
LIF	Laserinduzierte Fluoreszenz
LDA	Laser-Doppler-Anemometrie
LES	Large Eddy Simulation
HR-PIV	Hochauflösendes PIV
HS-PIV	Zeitaufgelöstes PIV
nZOT	Nach Zünd-OT
NURBS	Non-Uniform Rational B-Spline
OT	Oberer Totpunkt
OZ	Oxidationszone
PIV	Particle Image Velocimetry
PLIF	Planare Laserinduzierte Fluoreszenz
RANS	Reynolds Averaged Navier Stokes
RZ	Reaktionszone
Stereo-PIV	Stereoskopisches PIV
Tomo-PIV	Tomographisches PIV
UT	Unterer Totpunkt
UV	Ultraviolett
vZOT	Vor Zünd-OT
ZZP	Zündzeitpunkt

Kapitel 1

Einleitung

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der laserbasierten Untersuchung von innermotorischen Prozessen, um ein detailliertes Verständnis der Wechselwirkungen unterschiedlicher Teilaspekte des ottomotorischen Verbrennungsprozesses zu erlangen. Im ersten Abschnitt wird die Motivation der Arbeit dargelegt. Eine Einordnung erfolgt im zweiten Abschnitt anhand eines Überblicks über den Stand der Forschung in diesem Teilgebiet. Der letzte Abschnitt stellt die Struktur der weiteren Arbeit vor.

1.1 Motivation

Die effiziente Umwandlung von chemisch gebundener Energie in mechanisch nutzbare ist ein Grundbaustein der heutigen Zivilisation. Hierbei spielt die Energiewandlung in Hubkolbenmotoren eine bedeutende Rolle sowohl für den Warenfluss wie auch für den individuellen Transport. Unter dem Gesichtspunkt der Rohstoffverknappung und dem stetigen Bevölkerungswachstum ist ein detailliertes Verständnis der physikalischen Zusammenhänge notwendig, um diesen Wandlungsprozess mit optimalem Wirkungsgrad und somit effizienter Ressourcennutzung durchführen zu können.

Die Entwicklung des Hubkolbenmotors begann im Jahre 1876 mit dem ersten Versuchsmotor von Nicolaus A. Otto. Ab diesem Zeitpunkt kann durch eine kontinuierliche Erforschung und Entwicklung dieses Energienutzungskonzepts von einer signifikanten Effizienzsteigerung im Individualverkehr gesprochen werden mit der Folge, dass die Möglichkeiten wie auch der Bedarf, sich individuell zu bewegen, zu einer Verschiebung der Gewohnheiten eines großen Teiles der Weltbevölkerung geführt hat. Zudem erfolgte neben einer Änderung der Bewegungsgewohnheiten der Bevölkerung eine Verlagerung der kontinentalen Warenströme von den Wasserwegen und dem Schienenverkehr hin zur Straße. Heutzutage erfolgt beispielsweise der Personenverkehr in Europa mehrheitlich (84 %) mit Kraftfahrzeugen [185].

Unter Berücksichtigung des anthropogenen Klimawandels bei weltweit stetigem Bevölkerungswachstum und einer zunehmenden Rohstoffverknappung sehen sich die Industrieländer verpflichtet, durch schärfere Richtlinien für Neufahrzeuge die Hersteller zur einer Steigerung der Effizienz neuer Fahrzeuge zu zwingen¹. Allein im Transportsektor entstehen heutzutage 22 % der weltweiten CO₂-Emissionen, wovon 75 % auf den

¹ z.B. EU-Verordnung (EG) Nr. 715/2007 zur Reglementierung des Flottenverbrauchs von Neuwagen der Automobilhersteller auf 95 g CO₂/km bis zum Jahr 2020.

Straßenverkehr zurückzuführen sind [179]. Die Hersteller ihrerseits antworten auf den gesetzlichen Druck durch weiterentwickelte Antriebskonzepte wie eine *Hybridisierung* oder *Downsizing*. Diese ermöglichen durch eine Erhöhung des Komplexitätsgrades des Antriebskonzeptes *Verbrennungsmotor* sowie seiner Peripherie Effizienzsteigerungen im Bereich von 20% [106]. Zudem rücken komplexe Brennverfahren, wie z.B. die Ladungsschichtung im Teillastbetrieb von Ottomotoren, trotz ihres hohen Applikationsaufwands in den Fokus der Entwickler. In Summe steigen die Anforderungen an die Effizienz des Verbrennungsmotors stetig, was direkt an ein detaillierteres Verständnis der innermotorischen Prozesse geknüpft ist, um sein Potential voll ausschöpfen zu können. In diesem Spannungsfeld darf gleichzeitig die Wettbewerbsfähigkeit und somit der Kostenaspekt nicht vernachlässigt werden.

Ein großes Potential in der Verringerung des Kraftstoffverbrauchs von Ottomotoren liegt in der Verwendung der Direkteinspritzung [196]. Um dieses voll ausschöpfen zu können, muss bei dynamischen Leistungsanforderungen ein stabiler Motorbetrieb gewährleistet sein. Hierbei ist die Verbrennungsstabilität bei direkteinspritzenden Ottomotoren an die Zyklus-zu-Zyklus-Variationen der innermotorischen Prozesse gekoppelt [80]. Aufgrund von stochastischen Veränderungen einer Vielzahl von beeinflussenden Faktoren (z.B. Strömungsfeld oder Einspritzung) ist die sichere Leistungsabgabe an den Betriebsgrenzen (z.B. Klopfgefahr bei Vollast) nur eingeschränkt möglich. Es müssen somit ausreichende Sicherheitsfaktoren innerhalb der Motorsteuerung für einen stabilen Betrieb berücksichtigt werden. Diese wirken sich direkt als Limitierung hinsichtlich des erzielten Wirkungsgrades aus. Betrachtet man den extremsten Fall der Direkteinspritzung, die Ladungsschichtung gegen Ende der Kompression, können diese stochastischen Variationen zu Verbrennungsaussetzern führen [134] und somit eine deutliche Erhöhung der Schadstoffemissionen bei verringerter Leistungsabgabe zur Folge haben. Dieser Umstand führt zu einem geringen Marktanteil der Direkteinspritzung mit Ladungsschichtung trotz eines hohen Einsparpotentials im Teillastbereich [12]. Für eine breitere Anwendung des Konzepts der Schichtladung bedarf es eines tieferen Verständnisses der turbulenten Brennraumströmung und seiner Rolle bei der Beeinflussung der Einzelprozesse der motorischen Verbrennung: Einspritzung, Verdampfung, Gemischbildung (homogen und geschichtet), Zündung, Flammenausbreitung sowie Schadstoffbildung [47]. Bei der Optimierung heutiger Motoren ist eine Verringerung der Zyklus-zu-Zyklus-Variationen ein Angriffspunkt mit dem Ziel, die Betriebsgrenzen so zu erweitern, dass der maximale Wirkungsgrad im Verbrennungsprozess erreicht werden kann. Für einen ausführlichen Überblick über die Zyklus-zu-Zyklus-Variationen von fremdgezündeten Verbrennungsmotoren ist auf Ozdor et al. [129] zu verweisen.

Neben einer Verbesserung des Gesamtsystems *Verbrennungsmotor* in der Applikation gewinnt mit zunehmender Rechenleistung die numerische Simulation im Entwicklungsprozess an Bedeutung [45]. Eine effiziente Berechnung ist trotz der massiven Rechenleistung an Modelle für eine vollständige Abbildung aller innermotorischen Prozesse gekoppelt. Um die Vorhersagefähigkeit dieser Modelle zu überprüfen, sind die Entwickler der Berechnungsprogramme auf entsprechende Experimente der Teilprozesse Brennraumströmung, Mischung, Zündung, Verbrennung und Schadstoffbildung angewiesen. Dieser Umstand

schaft einen Bedarf für Experimente von Teilaspekten des innermotorischen Verbrennungsprozesses mit dem Ziel, explizit die Vorhersagefähigkeit einzelner Modelle zu validieren. Dies soll zukünftig eine zielgerichtete computergestützte Brennverfahrensentwicklung ermöglichen und schafft den Bedarf nach Validierungsdaten für eine Abschätzung der Präzision der berechneten Ergebnisse [48], wobei Experimente für die Validierung von Simulationen „... abgeschlossener und oft quantitativer sein müssen als andere Arten von Untersuchungen turbulenter Verbrennungsprozesse ...“² [11].

1.2 Stand der Forschung

1.2.1 Geschwindigkeitsmessung

Die Untersuchung von innermotorischen Prozessen mittels bildgebender Verfahren hat eine lange Historie. Der Beginn liegt im Jahre 1936 durch Withrow und Rassweiler [190]. Sie Visualisierten erstmals die Verbrennung innerhalb eines optisch zugängliche Ottomotors. Erste laserbasierten Untersuchungen der Brennraumströmung sind auf Anfang der 1980er-Jahre zurückzuführen. Sung und Patter [172] gelang die nulldimensionale Messung der Brennraumströmung mittels Laser-Doppler-Anemometrie (LDA). Gegen Ende des Jahrzehnts wurden von Reuss et al. [144] erste zweidimensionale Messungen von zwei Komponenten des Geschwindigkeitsvektors mittels Particle Image Velocimetry (PIV) durchgeführt.

Seit diesen Anfängen hat sich PIV zu einem Standardwerkzeug für die Charakterisierung des innermotorischen Strömungsfeldes entwickelt. Dies ist nicht unwesentlich durch die stete Weiterentwicklung von Laser und Kamera vorangetrieben worden. Heutzutage reicht die Spanne der publizierten Untersuchungen von den Eigenschaften der innermotorischen Strömung [58, 63, 143], der Analyse von Strömungsstrukturen [180], der Zyklus-zu-Zyklus-Variationen der großen Strömungsstrukturen [51, 124] bis hin zu den Strömungsprozessen während der Einspritzung und Zündung [135, 170]. Zudem werden zunehmend komplexere Methoden mit mehreren Kameras verwendet, um mehr als zwei Komponenten des Geschwindigkeitsvektors in einer Ebene phasenfest [32, 30] wie auch zeitaufgelöst [123, 156] im geschleppten Motorbetrieb erfassen zu können. In dem letzten Jahrzehnt ist ein Trend der PIV-Methoden hin zu einer Erweiterung der Messungen um eine Dimension, sei es die Zeit oder die dritte Raumrichtung, festzustellen.

Die Entwicklungen in der Lasertechnologie (diodengepumpte Festkörperlaser) und im Bereich der digitalen Hochgeschwindigkeitskameras machte eine Erweiterung der PIV-Methoden in der Dimension Zeit möglich. Somit können Prozesse in den Zeitskalen ($\approx 1^\circ\text{KW}$) visualisiert werden, in welchen sie innermotorisch ablaufen. Neben der zeitaufgelösten Analyse der Brennraumströmung über Teilbereiche des Motorzyklus (z.B. Kompression) [31, 51, 125, 176] wurde es möglich, die Interaktion zwischen den Strömungsstrukturen und anderen innermotorischen Prozessen, z.B. Einspritzung, zu visualisieren [170]. Peterson et al. [134] geht einen Schritt weiter und untersuchte durch die Kopplung von zeitaufgelösten Geschwindigkeitsmessungen mit Konzentrationen

² Frei übersetzt aus dem Englischen durch den Autor.

die Kausalkette von Zündaussetzern bei Ladungsschichtung in Ottomotoren mit Direkteinspritzung. Zudem ermöglichen die zeitauflösten Messungen eine Betrachtung der Entwicklung der instationären Grenzschichten im Motorbetrieb [4, 87].

Zusätzlich zu der Dimension „Zeit“ lassen sich PIV-Methoden auch um eine räumliche Dimension erweitern. Um einen Einblick in die Struktur des innermotorischen Strömungsfeldes im Volumen zu bekommen, führte Vosine et al. [180] sequenziell planare PIV-Messungen in zwei gekreuzten Ebenen im Brennraum durch. Diese ermöglichten eine grobe Approximation der mittleren Strömungstopologie. Dannemann et al. [30, 40] erweitert diesen Ansatz auf acht Ebenen und konnte somit Verbindungen zwischen den mittleren Strömungsstrukturen in der Einlassphase sichtbar machen. Trotz dieser Erfolge ist es für ein detaillierteres Verständnis der Turbulenzcharakteristik der innermotorischen Strömung notwendig, die dreidimensionale instantane Geschwindigkeit im Volumen zu kennen. Für die Realisierung dieser Anforderung gibt es eine Reihe von volumetrischen PIV-Methoden, welche sich mehr oder weniger für eine Messung von dreidimensionalen Geschwindigkeiten eignen. Ein ausführlichen Überblick über diese volumetrischen Geschwindigkeitsmessmethoden gibt Kitzhofer et al. [98].

Die erste Methode, als Scanning-PIV bezeichnet, verwendet einen rotierenden Polygonspiegel für eine Verschiebung eines planaren Lichtschnitts im Messvolumen. Somit kann über mehrere quasi zeitgleich aufgenommenen Messebenen die Volumeninformation unter der Annahme von eingefrorenen Strukturen rekonstruiert werden [29]. Bedingt durch die geringen Scangeschwindigkeiten ($\approx 1 - 10$ kHz) ist dieses Verfahren ungeeignet für die Erfassung des innermotorischen Strömungsfeldes. Eine weitere Methode basiert auf der holographischen Aufzeichnung der Partikelverteilung im Raum (Holographisches PIV). Bei einer Rückprojektion in das Messvolumen lässt sich über eine traversierte Kamera die Position der Partikel im Raum für einen Zeitpunkt detektieren [101]. Bei dieser Methode muss man die geringe Wiederholrate und den kritischen Schritt der Entwicklung der holographischen Platten in Betracht ziehen. Trotz dieser Unwägbarkeiten zeigte van Overbruggen et al. [128], dass die dreidimensionale Bestimmung instantaner Geschwindigkeiten innerhalb eines Motors mit diesem Ansatz möglich ist, wenn auch nur mit geringer Statistik. Unter Verwendung von mehreren Kameras lässt sich anhand der Sichtlinienverbindungen die dreidimensionale Position von Partikeln in einem beleuchteten Volumen rekonstruieren. Verfolgt man die Trajektorie jedes Partikels, ist es möglich, die instantanen dreidimensionalen Geschwindigkeitsfelder zu rekonstruieren [112]. Diese Methode wird als Particle Tracking Velocimetry (PTV) bezeichnet und zeichnet sich durch eine sehr geringe räumliche Auflösung aus. Die letzte Methode, Tomographisches PIV, basiert auf einem ähnlichen Konzept nur unter Verwendung einer höheren Partikeldichte. Die Positionsbestimmung erfolgt anhand tomographischer Rekonstruktionsalgorithmen, die Geschwindigkeiten werden über eine Ensemblekorrelation berechnet, was eine exakte Zuordnung der jeweiligen Partikeltrajektorie nicht notwendig macht [56]. Es handelt sich hierbei um einen vielversprechenden Ansatz für die Vermessung instantaner Geschwindigkeiten und wurde bis jetzt für generische Probleme [56, 95, 153, 191], Überschallströmungen [84], eingeschlossenen Phänomene in Wasser [72, 192] und zeitaufgelöst [121] eingesetzt.

1.2.2 Innermotorische Verbrennung

Bisherige Untersuchungen des Phänomens der vorgemischten Flammenausbreitung basierten auf der Visualisierung der Grenze der Reaktionszone einer sich sphärisch ausbreitenden Flamme innerhalb von Druckkammern [19, 26, 119, 49, 59, 64, 90, 173] oder in Verbrennungsmotoren [3, 17, 49, 65, 81, 124, 134]. Für diese Studien wurden Flammvisualisierungen wie Chemilumineszenz, Schlieren-Photographie, Mie-Streuung und Laserinduzierte Fluoreszenz des Hydroxyl-Radikals (OH) verwendet. Anhand der Daten von z.B. Bradley et al. [26] wurden unter der Annahme einer sphärischen Flamme laminare Ausbreitungsgeschwindigkeiten bestimmt. Diese dienen heutzutage als Basis für die Validierung von Verbrennungsmodellen zur Beschreibung des innermotorischen Prozesse [19, 27, 93, 119]. Für die turbulente Flammenausbreitung weicht diese stark von der Annahme einer sphärischen Flamme ab. Somit werden Modellparameter benötigt, um die globale turbulente Flammengeschwindigkeit zu approximieren [93].

Betrachtet man die Visualisierungen der Frühphase der Verbrennung, zeigt sich, dass der initiale Flammenkern durch das turbulente Strömungsfeld stark verwinkelt ist [25, 46]. Eine reine Visualisierung der lokalen Flammenstruktur [17, 64, 89, 90, 169] ist für eine Ableitung der erforderlichen Größen nicht ausreichend. Ein detailliertes Verständnis der Ausbreitung einer verwinkelten Flammenfront innerhalb eines turbulenten Strömungsfeldes muss anhand der Bestimmung der lokalen Eigengeschwindigkeit in Kombination mit den beeinflussenden Parametern Strömung und Mischung (im Falle einer Direkteinspritzung) entlang der dreidimensionalen Reaktionszone erfolgen, speziell unter den Gesichtspunkten wie z.B. dem strömungsinduzierten Verlöschen von vorgemischten und partiell vorgemischten Flammen [20, 24, 82, 97, 120, 134, 142, 167, 173]. Für ein umfassendes Verständnis der lokalen Flammenausbreitung müssen somit mindestens zwei Parameter simultan und dreidimensional erfasst werden. Eine Vielzahl von Gruppen realisierte Techniken zur Visualisierung der Flammenoberfläche mittels Laserinduzierter Fluoreszenz (OH oder CH) oder Mie-Streuung an verdampfenden Tropfen [62, 82, 89, 120, 142], teilweise in Kombination mit PIV-Methoden für eine gleichzeitige Bestimmung des Strömungsfeldes um die Flamme [20, 24, 97, 168]. Ein erster Versuch, lokale Flammengeschwindigkeiten innerhalb eines optisch zugänglichen Verbrennungsmotors zu erfassen, wurde von Mounaïm-Rosselle et al. [122] durch die Kopplung von planaren PIV-Messungen und der Mie-Streuung von verdampfenden Partikeln unternommen. Unter der Annahme einer zweidimensionalen Flammenausbreitung in Normalenrichtung war es möglich, näherungsweise lokale Eigengeschwindigkeiten in einem Motor zu bestimmen. Trotz der abgeleiteten Kausalitäten zwischen Mischung, Aufladung und Eigengeschwindigkeit unterliegen die Erkenntnissen bezüglich der lokalen Eigengeschwindigkeit der Annahme einer lokal planaren Flammenausbreitung. Dies betrifft sowohl den lokalen konvektiven Transport wie auch die Umsatzgeschwindigkeit.

Durch die Verwendung von mehreren Ebenen eines Markers der Reaktionsfront (Temperatur, CH oder OH) ist es möglich, die Orientierung der Reaktionszone im Raum zu rekonstruieren. Dunn [52] zeigt, dass über gekreuzte Ebenen des OH-Radikals eine Approximation des Flammenwinkels entlang einer Linie möglich ist. In Kombination mit der Information des Strömungsfeldes um die Reaktionszone zeigt Steinberg et al. [167], dass