Laserbasierte Untersuchung der Flamme-Wand-Interaktion

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. Markus Mann

aus Siegen

Berichterstatter:	Prof. Dr. rer. nat. A. Dreizler
Mitberichterstatter:	Prof. Dr. rer. nat. C. Schulz
Tag der Einreichung:	30. April 2013
Tag der mündlichen Prüfung:	12. Juni 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.

Mann, Markus:

Laserbasierte Untersuchung der Flamme-Wand-Interaktion
ISBN 978-3-86376-048-9

Alle Rechte vorbehalten

1. Auflage 2013, Göttingen

© Optimus Verlag

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 Autors 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 Tätigkeit als Stipendiat und Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Reaktive Strömungen und Messtechnik an der TU Darmstadt in den Jahren 2009 bis 2013. Daher gilt mein besonderer Dank dem Fachgebietsleiter Herrn Prof. Dr. Andreas Dreizler für die Möglichkeit zur Promotion, das entgegengebrachte Vertrauen und Freiheit bei der Gestaltung dieser Arbeit. Die ausgezeichneten Rahmenbedingungen ermöglichten es, die Promotion in der angestrebten Zeit zu vollenden. Zahlreiche fruchtbare Diskussionen zeugten von hohem Interesse an dieser Arbeit und trugen wesentlich zum ihrem Gelingen bei.

Weiterhin gilt mein aufrichtiger Dank Herrn Prof. Dr. Christoph Schulz für die Übernahme des Korreferates und das damit zum Ausdruck gebrachte Interesse an meiner Arbeit. Die eingebrachten Ideen und Impulse haben zur Verbesserung dieser Arbeit beigetragen.

Bei Herrn Dr. Christopher Kliewer möchte ich für die gemeinsam durchgeführte Messkampagne in den Sandia National Laboratories, Livermore, USA, bedanken und die Gastfreundschaft, die ich während dieser Zeit erfahren durfte. Die dort gewonnen Erkenntnisse haben großes Potential für zukünftige Forschungsvorhaben auf dem Gebiet der Flamme-Wand-Interaktion und darüber hinaus.

Meinen Kollegen am Fachgebiet – genauer müsste man sagen: an den Fachgebieten EKT und RSM – danke ich für die großartige Arbeitsatmosphäre und die Unterstützung, die mir wiederfahren ist. Darunter möchte meine Mitstreiter der wandnahen Verbrennung MSc. Elias Baum, Dr.-Ing. Thilo Kissel, MSc. Christopher Jainski und Dr.-Ing. Jan Brübach besonders hervorheben. Ein ganz herzlicher Dank gilt den Weggefährten erster Stunde, Bürokollegen und -Nachbarn Dipl.-Ing. Philipp Trunk und Dipl.-Ing. Jens Herrmann, mit denen ich auf dienstlichen und privat unternommenen Weltreisen viele tolle Erlebnisse verbinde, die mir noch lange in guter Erinnerung bleiben mögen. Herrn Dipl.-Ing. Andreas Ludwig danke ich für seine Unterstützung im Labor und insbesondere für das Korrekturlesen dieser Arbeit. Stellvertretend für das Team der mechanischen Werkstatt danke ich Herrn Roland Berntheisel für die Anregung zu zahlreichen Detailverbesserungen verbunden mit der Fertigung der Prüfstandskomponenten.

Ein besonderer Dank gilt meinen Eltern für die uneingeschränkte Unterstützung während der Schul- und Studienzeit, die mir diesen Weg überhaupt erst möglich gemacht hat. Bei meinen Freunden und den Kameraden des THW OV Wörrstadt bedanke ich mich für die gute Zeit und den erfrischenden Ausgleich zu meiner wissenschaftlichen Tätigkeit.

Aus tiefstem Herzen danke ich meiner Freundin Stefanie Geis, die viele Entbehrungen still ertragen hat und für die liebevolle Unterstützung, die sie mir zu Teil werden ließ.

Mainz, Juni 2013

Markus Mann

Alles Wissen und alles Vermehren unseres Wissens endet nicht mit einem Schlußpunkt, sondern mit einem Fragezeichen.

Hermann Hesse

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Hintergrund und Motivation	1
1.2	Stand der Forschung	3
1.2.1	Flamme-Wand-Interaktion	3
1.2.2	Laserbasierte Verbrennungsdiagnostik	5
1.3	Struktur der Arbeit	8
2	Grundlagen von Verbrennung und Flamme-Wand-Interaktion	9
2.1	Grundlegende Begriffe der Verbrennung	10
2.2	Bilanzgleichungen	11
2.3	Reaktionskinetik und Reaktionsmechanismen	14
2.4	Turbulenz	16
2.5	Grenzschichten	18
2.6	Stationäre eindimensionale Vormischflammen	19
2.6.1	Frei propagierende Vormischflammen	19
2.6.2	Stagnationsflammen	21
2.7	Turbulente Vormischverbrennung	22
2.8	Flamme-Wand-Interaktion	25
2.8.1	Laminare Flamme-Wand-Interaktion	25
2.8.2	Turbulente Flamme-Wand-Interaktion	29
3	Messtechnische Methodik	31
3.1	Grundlagen der Spektroskopie	31
3.1.1	Elektrodynamik	31
3.1.2	Klassische Wellenoptik	32
3.1.3	Quantenmechanik	33
3.2	Kohärente anti-Stokes Raman-Spektroskopie	43
3.2.1	Grundprinzip des CARS-Prozesses	43
3.2.2	Theoretischer Hintergrund	45
3.2.3	Rovibronische CARS-Thermometrie am N ₂ -Molekül	48
3.2.4	Auswertung	51
3.2.5	Charakterisierung des Messsystems und Messungenauigkeiten	53
3.2.6	Ultrakurzpuls-Rotations-CARS	56
3.3	Spektroskopischer Nachweis von Kohlenstoffmonoxid	61
3.3.1	Kohlenstoffmonoxid	61
3.3.2	Laserinduzierte Fluoreszenz	62
3.3.3	Versuchsaufbau	67
3.3.4	Auswertung	69

3.3.5	Charakterisierung des Messsystems	71
3.4	Particle Image Velocimetry	76
3.4.1	Grundlagen	76
3.4.2	Experimenteller Aufbau	79
3.4.3	Auswertung	80
3.4.4	Charakterisierung des Messsystems	82
3.5	Planare Laserinduzierte Fluoreszenz am OH-Radikal	83
3.5.1	Grundlagen der Ein-Photon-LIF	83
3.5.2	Struktur und Nachweis von OH	84
3.5.3	Detektion der chemischen Hauptreaktionszone	84
3.5.4	Versuchsaufbau	85
3.5.5	Charakterisierung des Messsystems	86
3.5.6	Auswertung	87
3.5.7	Flammenpropagation	90
3.6	Bestimmung der Flammengeschwindigkeit	91
4	Messobjekt	93
4.1	Flamme-Wand-Interaktions-Brenner	93
4.2	Stationäre Betriebsweise	94
4.3	Verlöschende Betriebsweise	96
4.3.1	Zündsystem	96
5	Ergebnisse und Diskussion	99
5.1	Stationäre Betriebsweise	99
5.1.1	Temperatur und CO-Konzentration	99
5.1.2	Enthalpie- und Wärmestrom	104
5.1.3	1D-Temperaturprofile	106
5.1.4	Flammenpropagation	107
5.2	Transiente Flamme-Wand-Interaktion	108
5.2.1	Temperatur, Löschabstände, Enthalpieentzug	108
5.2.2	Thermokinetischer Zustand in Wandnähe	114
5.2.3	Flammenpropagation gegen feste Oberflächen	116
6	Zusammenfassung und Ausblick	121

Nomenklatur

Große lateinische Buchstaben		Einheit
A	Fläche	m^2
A_{21}	Einstein Koeffizient für die spontane Emission	1 s^{-1}
B	Magnetische Verschiebung	Vs/m^2
B_{12}	Einstein Koeffizient für die stimulierte Absorption	$1/\text{s}$
B_{21}	Einstein Koeffizient für die stimulierte Emission	$1/\text{s}$
C	Korrelationskoeffizient	—
D	Dielektrische Verschiebung	As/m^2
	Durchmesser	m
	Diffusionskoeffizient	m^2/s
Da	Damköhler-Zahl	—
E	Elektrische Feldstärke	V/m
$\hat{E}$	Amplitude des elektischen Feldes	V/m
	Energie	J
D_k	Diffusionskoeffizient des Stoffes k	m^2/s
F	Flammenoberfläche	m^2
H	Magnetische Feldstärke	A/m
	Abstand	m
I	Intensität	W/m^2
J	Gesamtdrehimpuls	$\text{kg m}^2 \text{ rad}/\text{s}$
	Quantenzahl des Gesamtdrehimpulses	—
	Rotationsquantenzahl	—
Ka	Karlowitz-Zahl	—
L	Bahndrehimpuls	$\text{kg m}^2 \text{ rad}/\text{s}$
	Charakteristische Länge	m
M	Magnetische Polarisierung	Vs/m^2
	Molare Masse des Stoffgemisches	kg/mol
M_k	Molare Masse des Stoffes k	kg/mol
N	Besetzungszahl	—
P	Elektrische Polarisierung	As/m^2
	Leistung	W
Q	Dimensionsloser Wärmestrom	—
	Löschrade	$1/\text{s}$
$\dot{Q}$	Externe Enthalpie Quelle oder Senke	$\text{J m}^{-3} \text{ s}^{-1}$
	Wärmestrom	W
$\mathcal{R}$	Allgemeine Gaskonstante	$\text{J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$
Re	Reynoldszahl	—
S	Spindrehimpuls	$\text{kg m}^2 \text{ rad}/\text{s}$
T	Temperatur	K
Tu	Turbulenzgrad	—

Nomenklatur

V	Potentielle Energie	J
	Volumen	m^3
$V_{k,i}$	Diffusionsgeschwindigkeit des Stoffes k in die i -te Richtung	m/s
W	Übergangswahrscheinlichkeit	$1/\text{s}$
X_k	Molenbruch des Stoffes k	—
Y_k	Massenbruch des Stoffes k	—

Kleine lateinische Buchstaben		Einheit
c	Lichtgeschwindigkeit	m/s
	Übergangsmatrix	
c_k	Molare Konzentration des Stoffes k	mol/m^3
c_p	Spezifische Wärmekapazität	$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$
e	Elementarladung	As
f	Brennweite	m
$f_{k,i}$	Volumenkräfte auf den Stoff k in die i -te Richtung	m/s^2
g	Entartungsfaktor	—
h	Spezifische Enthalpie	J/kg
h_k	Spezifische Enthalpie des Stoffes k	J/kg
h	Plancksches Wirkungsquantum	Js
$\hbar$	Plancksches Wirkungsquantum / 2π	Js
j	Stromdichte	A/m^2
	Gesamtdrehimpuls	$\text{kg m}^2 \text{rad/s}$
	Quantenzahl des Gesamtdrehimpulses	—
	Stromdichte	A/m^2
k	Reaktionskoeffizient	—
	Wellenvektor	$1/\text{m}$
k_B	Boltzmann-Konstante	J/K
l	Bahndrehimpuls	$\text{kg m}^2 \text{rad/s}$
	Drehimpulsquantenzahl	—
l_t	Integrales Längenmaß	m
l_η	Kolmogorov'sches Längenmaß	m
m	Masse	kg
	Magnetische Quantenzahl	—
m_s	magnetische Spinquantenzahl	—
n	Normalenvektor	—
	Hauptquantenzahl	—
n_k	Stoffmenge des Stoffes k	mol
p	Druck	N/m^2
	Impuls	kg m s^{-1}
q_i	Wärmestrom in die i -te Richtung	W/m^2
$\dot{q}$	Wärmestromdichte	W/m^2
r	Polarkoordinate	m
	Radius	m
s	Spindrehimpuls	$\text{kg m}^2 \text{rad/s}$
	Spinquantenzahl	—
s_a	Absolutpropagationsgeschwindigkeit der Flamme	m/s
s_d	Flammenpropagationsgeschwindigkeit	m/s
$s_{F,l}$	Laminare Flammgeschwindigkeit	m/s
$s_{F,t}$	Turbulente Flammgeschwindigkeit	m/s
t	Zeit	s

	Zeitschrittweite	s
t_F	Flammenzeit	s
v	Geschwindigkeit	m/s
	Vibrationsquantenzahl	—
x, y, z	Kartesische Koordinaten	m
u, v, w	Geschwindigkeit entlang der kartesischen Koordinaten	m/s

Große griechische Buchstaben

Einheit

Ψ	Wellenfunktion	—
$\Delta_{H,R}$	Reaktionsenthalpie	J/kg
$\Delta h_{f,H}$	Bildungsenthalpie des Stoffes k	J/kg
Ω	Raumwinkel	sr

Kleine griechische Buchstaben

Einheit

α, β, γ	Winkel	°
ν	Wellenzahl	1/cm
χ	Elektrische Suszeptibilität	—, V/m, V ² /m ² , ...
δ	Grenzschichtdicke	m
$\delta_{F,l}$	Laminare Flammendicke	m
ϵ_0	Dielektrizitätskonstante	AsV ⁻¹ m ⁻¹
η	Dynamische Viskosität	kg m ⁻¹ s ⁻¹
κ	Streckungsrate	1/s
λ	Wärmeleitfähigkeit	W m ⁻¹ K ⁻¹
	Wellenlänge	nm
	Luftzahl	—
μ	Dipoloperator	As m
μ_0	Magnetische Feldkonstante des Vakuums	VsA ⁻¹ m ⁻¹
ν	Frequenz	1/s
	Kinematische Viskosität	m ² /s
ω	Winkelgeschwindigkeit, Kreisfrequenz	rad/s
$\dot{\omega}_k$	Chemischer Quellterm des Stoffes k	kg m ⁻³ s ⁻¹
ϕ	Brennstoffverhältnis	—
	Fluoreszenz-Quanteneffizienz	—
φ	Rotationswinkel	rad
ψ	Wellenfunktion	—
ρ	Dichte	kg/m ³
	Ladungsdichte	As/m ³
σ	Elektrische Leitfähigkeit	Ω^{-1} m ⁻¹
τ	Dimensionslose Zeit	—
τ_{ij}	Spannungstensor	kg m ⁻² m ⁻¹
ζ	Dimensionsloser Wandabstand	—

Tiefgestellte Indizes

ad	Adiabat
e	Elektronisch
F	Flamme
l	Laminar
Q	Verlöschzeitpunkt (Quenching)
r	Rotatorisch

Nomenklatur

t	Turbulent
u	Unverbrannt
v	Vibrionisch

Hochgestellte Indizes

(ν)	Ein-Photon-Prozess
(2ν)	Zwei-Photonen-Prozess
$'$	Oberer Zustand eines Übergangs
$''$	Unterer Zustand eines Übergangs
$*$	Angeregter Zustand
$+$	Symmetrie bezüglich Spiegelung der Kernebene
$*$	Konjugiert komplex
NL	Nichtlinear
sym	Symmetrisch

Operatoren and Symbole

$\hat{H}$	Hamilton-Operator
K	Kreuzkorrelation
∇	Nabla-Operator

Abkürzungen

ASE	Amplified Spontaneous Emission (Verstärkte spontane Emission)
CARS	Coherent Anti-Stokes Raman Spectroscopy (Kohärente Anti-Stokes Raman-Spektroskopie)
CCD	Charged-Coupled Device (Ladungsgekoppelter Baustein)
CFD	Computational Fluid Dynamics
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor (Komplementärer Metalloxid-Halbleiter)
DNS	Direct Numerical Simulation (Direkte numerische Simulation)
DS	Dichroitischer Spiegel
F	Filter
FWI	Flamme-Wand-Interaktion
HC	Kohlenwasserstoffe
HOQ	Head-On Quenching
HR	Hochreflektierend
HT	Hochtransmittierend
ICCD	Intensified CCD
LDA	Laser-Doppler-Anemometrie
LES	Large Eddy Simulation (Grobstruktursimulation)
LIF	Laser-induzierte Fluoreszenz
NIR	Nahinfrarot
P	Periskop
PIV	Particle Image Velocimetry
PDF	Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion
PLIF	Planare Laser-induzierte Fluoreszenz
PMT	Photomultiplier
RCARS	Rotations-CARS
S	Spiegel Bildsegment

SF	Strahlfalle
SL	Sphärische Linse
SNR	Signal-zu-Rausch-Verhältnis
ST	Strahlteiler
SWQ	Side-Wall Quenching
T	Teleskop
TG	Turbulenzgitter
UHC	Unburned Hydro Carbons (Unverbrannte Kohlenwasserstoffe)
UV	Ultraviolet
YAG	Yttrium-Aluminium-Granat

1 Einleitung

1.1 Hintergrund und Motivation

Die menschliche Entwicklung ist eng mit der gezielten Nutzung des Feuers verzahnt. Erfindungen, welche die in fossilen Energieträgern enthaltene chemische Energie in Wärme und höhere Energieformen wandeln, prägen und veränderten die menschliche Lebensweise seit der Industrialisierung im 18. Jahrhundert maßgeblich. Durch weiter zunehmende Spezialisierung wächst die Weltbevölkerung seitdem rapide und mit ihr auch der weltweite Energiebedarf sowie die Emissionen. Dennoch sind in unserer modernen Welt Errungenschaften, wie Mobilität und Transportwesen, aber auch die Gebäudeheizung und die Nutzung der Elektrizität zu festen Säulen unserer Gesellschaft geworden.

Die von der Politik der Bundesrepublik Deutschland beschlossene Energiewende kommt trotz großer Bemühungen nur langsam in Gang. So stieg der Anteil der regenerativen Energieträger am Primärenergieverbrauch von 2002 bis 2011 von 3.2 auf 11.7 % [34]. In Deutschland und der ganzen Welt dominieren nach wie vor fossile Brennstoffe. Wissenschaftliche Anstrengungen können einen wichtigen Beitrag leisten, die endlichen fossilen Energieträger möglichst effizient und umweltschonend, also mit minimalen Schadstoffemissionen, zu nutzen. Selbst wenn ein Großteil des Energiebedarfs regenerativ abgedeckt werden könnte, so ist die Frage nach der Energiespeicherung der stochastisch produzierten regenerativen Energien weder gelöst noch realisiert. Die extrem hohe Energiedichte chemisch gebundener Energie im Vergleich zu Batterien und die Möglichkeit, Kohlenwasserstoffe regenerativ zu erzeugen, macht die Verbrennungsforschung hinsichtlich Effizienzsteigerung und gleichzeitiger Schadstoffreduzierung nach wie vor zu einem attraktiven Forschungsgebiet.

Es hat eine lange Tradition und ist in der Natur des Menschen tief verankert, Dinge zu verwenden, bevor er sie versteht. So hat sich der Mensch der Steinzeit (Altpaläolithikum) das Feuer schon sehr früh zunutze gemacht, noch ehe die physikalisch-chemischen Zusammenhänge systematisch erforscht waren. Dennoch hat uns dieses Vorgehen nach Lernen durch Erfahrung (engl. trial and error) dahin gebracht, die Verbrennung wissenschaftlich zu untersuchen und zu beschreiben. Nach über 150 Jahren interdisziplinärer Verbrennungsforschung sind wir deutlich weiter als unsere Vorfahren in der Steinzeit, aber dennoch weit davon entfernt, komplexe Verbrennungsprozesse vollständig vorherzusagen zu können [18].

Neben klassischen Optimierungsbemühungen gewinnen numerische Berechnungsverfahren (engl. Computational Fluid Dynamics, CFD) bei der Auslegung und Optimierung von Verbrennungssystemen zunehmend an Bedeutung. Getrieben wird diese Entwicklung auch durch den technischen Fortschritt und die damit verbundene Zunahme der

Rechenkapazität moderner Hochleistungsrechner. Dennoch reichen heutige Rechenkapazitäten noch lange nicht aus, um reale Verbrennungssysteme mittels Direkter Numerischer Simulation (DNS) zu berechnen. Eine weitere Herausforderung bei der DNS stellt die starke Kopplung an die Randbedingungen dar, sodass das Rechengebiet des Verbrennungssystems mit großer Sorgfalt gewählt werden muss. Um Rechenzeiten zu verkürzen, verfolgt man den Ansatz der Grobstruktursimulation (Large Eddy Simulation, LES), wo nicht alle notwendigen Skalen von Strömungsmechanik und Verbrennungschemie im Rechengebiet räumlich komplett aufgelöst werden. Für die nicht aufgelösten Skalen verwendet man Verbrennungs- und Turbulenzmodelle. Für die Entwicklung solcher Modelle sind Validierungsmessungen aus Experimenten mit genau definierten Randbedingungen an zunächst generischen Versuchsbrennern von großer Bedeutung. Insbesondere in Wandnähe versagen aktuelle Modelle und umgehen dies durch einige Kunstgriffe, wie den adiabate Wände und das Verschwinden des chemischen Quellterms an der Wand.

Laseroptische Messverfahren haben sich aufgrund ihres nicht invasiven Charakters und hoher zeitlicher als auch räumlicher Auflösung als mächtiges Werkzeug für die Bestimmung von skalaren und vektoriellen Größen in Verbrennungsumgebungen etabliert. Insbesondere in der Gegenwart von festen Wänden versagen die meisten konventionellen Messtechniken. Aber auch für laserbasierte Messmethoden bestehen Einschränkungen an der Wand, beispielsweise durch reflektiertes oder gestreutes Laserlicht. Daher muss die Messmethodik sorgfältig ausgewählt und charakterisiert sein, was in Kapitel 1.2.2 vorgestellt wird.

Die Verbrennung wird durch Brennraumwände in ihrer Ausbreitung räumlich begrenzt. Dort ist die Strömungsgeschwindigkeit in wandnormaler Richtung null und durch Enthalpieentzug an der Wand kommt es zur Auslöschung von Radikalen und somit zum Erliegen der chemischen Reaktion. Dadurch entstehen durch unvollständige Verbrennung, insbesondere in Wandnähe, Schadstoffe, wie unverbrannte Kohlenwasserstoffe (engl. unburned hydrocarbons UHC) und Kohlenmonoxid. Ein wesentlicher Trend für Effizienzsteigerungen im Automobilssektor stellt das sogenannte Downsizing [71] dar. Dies beruht darauf, Brennräume bei gleichbleibender Leistung zu verkleinern. Somit vergrößert sich das Oberflächen-zu-Volumen-Verhältnis und verstärkt daher den Einfluss der Wände auf den Gesamtprozess. Auch bei Flugtriebwerken ist eine Entwicklung hin zu immer größeren Nebenstromverhältnissen (engl. bypass ratio) zu beobachten, welche deutliche Effizienzsteigerungen und Lärmreduktionen ermöglichen, was im Umkehrschluss jedoch zu kompakteren Brennkammern führt [27]. Hinzu kommt, dass Bauteilversagen mit der maximalen Temperaturbeanspruchung eng gekoppelt ist. Im Gegensatz dazu steigt der thermodynamische Wirkungsgrad mit zunehmender Turbinen-eintrittstemperatur. Um thermisch hoch belastete Bauteile zu kühlen, verwendet man in Flugtriebwerken oder stationären Gasturbinen Zapfluft, die dem Verdichter entnommen zu Wirkungsgradeinbußen führt.

Das Zusammenspiel von numerischen Berechnungsverfahren, Flammentheorie und Experimenten kann also einen wichtigen Beitrag leisten, zukünftige Systeme effizienter und mit kürzerer Entwicklungszeit zu gestalten. Die Untersuchung der Flamme-Wand-Interaktion stellt hierbei einen wichtigen Teilprozess dar, der in kompakteren Verbrennungssystemen an Einfluss gewinnen wird.

Verbrennungssysteme sind durch ihr (turbulentes) Strömungsfeld, Temperatur, Druck und den thermokinetischen Zustand gekennzeichnet. Diese Größen sind grundsätzlich gekoppelt und beeinflussen sich gegenseitig. Bei der Flamme-Wand-Interaktion kommt die Wand als zusätzliche Instanz hinzu. Mit ihr sind Wärmeverluste, Strömungs- und Temperaturgrenzschichten verknüpft. Durch Wärmeverluste kommt es zu einer Änderung oder zum Abbruch chemischer Reaktionen, was sich im Verlöschen der Flamme äußert und zur Bildung von Schadstoffen wie Kohlenstoffmonoxid und unverbrannten Kohlenwasserstoffen führt. Dies beeinflusst zusätzlich zur überlagerten Änderung des Geschwindigkeitsfeldes die Flammenpropagation. Die Flamme-Wand-Interaktion äußert sich zudem im thermokinetischen Zustand, der von einer frei propagierenden Flamme abweicht. Diese Arbeit hat daher zum Ziel, den Einfluss der Brennraumwände auf die Flammenpropagation und die Änderung des thermokinetischen Zustandes experimentell und möglichst auch in seiner Dynamik zu untersuchen. Um die bei der Flamme-Wand-Interaktion auftretenden kleinen Raum- und Zeitskalen abbilden zu können, müssen geeignete Messverfahren identifiziert und auf Eignung für den Einsatz nahe fester Oberflächen geprüft werden. Um die Kopplung zwischen den Phänomenen untersuchen zu können, sollen möglichst viele gekoppelte Größen simultan erfasst werden. Die gewonnenen Daten sollen zudem auch zu Validierungszwecken für numerische Simulationen verwendbar sein, was eine gute Charakterisierung der messtechnischen Methodik erfordert.

1.2 Stand der Forschung

1.2.1 Flamme-Wand-Interaktion

Die Sicherheitsgrubenlampe stellt seit ihrer Erfindung durch Sir Humphrey Davy 1815 die vielleicht erste bekannte Nutzung von Flammenverlöschen an kalten Oberflächen dar. Ein feines Drahtgitter verhinderte die Propagation der Flamme der Grubenlampe nach außen und minimierte so das Risiko von Explosionen der brennbaren Grubengase unter Tage.

Erste systematische Untersuchungen der Flamme-Wand-Interaktion wurden von Friedman und Johnston durchgeführt [65, 66]. Diese bestimmen den Löschabstand von Propan-Luft-Gemischen und komplexeren Brennstoffen zwischen planparallelen Platten in Abhängigkeit von Druck und Brennstoffverhältnis. Für atmosphärische, stöchiometrische Propan-Flammen betragen die Löschabstände ca. 2 mm. Ein Transfer zu komplexerer Geometrie erfolgte durch Daniel, welcher Löschabstände in einem Verbrennungsmotor mittels Aufnahmen des Flammeneigenleuchtens bestimmte [47]. Es zeigte sich, dass sich die Ergebnisse aus Modellflammen vergleichbarer Randbedingungen auf das komplexe System Motor mit guter Übereinstimmung übertragen lassen. Elektrostatische Ionenkonzentrationsmessungen von Goolsby und Haskell [73] ergaben, dass Löschabstände an einer Oberfläche bis zu einer Größenordnung kleiner sein können als bei der Propagation zwischen zwei parallelen Oberflächen (0.1 mm/2 mm). Mehrere experimentelle Vorhaben zeigten, dass Flammenverlöschen mit einem maximalen transienten Wärmestrom an der Wand korreliert ist. Huang et al. [87] bestimmten experimentell

sowie numerisch eine Überhöhung des Wärmestroms um den Faktor $\dot{q}_Q/\dot{q}_F = 3$ in einer näherungsweise eindimensionalen Konfiguration. Eine Erweiterung um die zweite Dimension, bei der eine Flamme parallel zu einer ebenen Wand propagiert - also rechtwinklig orientiert ist - erforschten Lu et al. [109] ebenfalls experimentell und numerisch. Sie erhielten vergleichbare normierte Wärmeströme wie bei senkrechter Propagation. Weitere Studien variierten ebenfalls Wandmaterial und Druck in geschlossener Konfiguration und bestimmten Löschabstände mittels Aufnahmen des Flammeneigenleuchtens [16, 146]. Eine parametrische Variation der Wandtemperatur wurde in [22] durchgeführt, wo sich Löschabstände mit steigender Wandtemperatur verringerten. Boust et al. leiteten ein vereinfachtes thermisches Modell für Verlöschen an einer Oberfläche für normale und senkrechte Flamme-Wand-Interaktion her [24]. Sie setzten den maximalen Wärmestrom ins Verhältnis zum Löschabstand als Funktion von Brennstoffverhältnis und Druck. Mittels Ladungsmessungen konnte die räumliche Auflösung im Wandbereich gesteigert werden [101]. Fuyuto et al. führten spektroskopische Messungen von Temperatur und Flammen-Radikalen wie OH, CH₂O und CO entlang einer Linie durch [67]. Der erreichte geringste Wandabstand liegt mit 200 μm allerdings im Bereich des Löschabstandes einer leicht mageren Methan-Flamme.

Kombinative Messungen von Wandwärmestrom und Geschwindigkeiten wurden von Egolfopoulos et al. [58] mit eindimensionalen Simulationen von Stagnationsflammen verglichen. Experimentelle Untersuchungen in einem Verbrennungsmotor wurden in [23] durchgeführt und ein Zusammenhang zwischen Strömungsfeld und Wärmeströmen gefunden. Untersuchungen der Flammenpropagation gegen Wände wurde hinsichtlich des Einflusses der Streckung (engl. stretch) mittels PIV untersucht [63, 64, 62]. Die Positionsbestimmung der Hauptreaktionszone erfolgte hierbei durch verdampfte Öltröpfchen, was lokal zu einer nicht exakten Flammenposition führen kann.

Eine Vielzahl der oben genannten experimentellen Vorhaben stützt sich bei der Erfassung von Größen in der Flamme auf Verfahren, bei denen die Intensität des Flammeneigenleuchtens als Grundlage verwendet wird. Dies ist jedoch problematisch, da die Intensität des Flammeneigenleuchtens stark von den Eigenschaften der Flamme selbst, wie beispielsweise dem Äquivalenzverhältnis, abhängen. Zusätzlich sind die eingesetzten Methoden nicht unabhängig von der Geometrie (Abschattung, Akkumulation der Flammensignalintensität), des eingesetzten optischen Systems (Schärfentiefe, Belichtungszeit, Signal-zu-Rausch-Verhältnis des Detektors) und somit in Summe unklaren systematischen Fehlern unterworfen. Vielversprechende spektroskopische Methoden sind bisher auf Mittelwertmessungen beschränkt, da niedrige Signallevele im Wandbereich oder Interaktion mit Wänden und Strahlableitung durch die Flamme den Einsatz erschweren. Dies ist insofern problematisch, da das Verlöschen von Flammen an Wänden ein hochgradig transienter Prozess ist. In dieser Arbeit wird daher der Ansatz verfolgt, mittels minimalinvasiver spektroskopischer Methoden wichtige Größen mit hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung in der Flamme auf Einzelschussbasis simultan zu erfassen.

Bereits recht früh entwickelten Lewis und von Elbe eine „Thermische Theorie“, um das Verlöschen von Flammen zu beschreiben [105], welche von Karman durch Erkenntnisse aus der Aerodynamik weiterentwickelte [92]. Starke Zuwächse in Rechenkapazitäten in den letzten beiden Jahrzehnten erlauben zudem auch eine numerische Analyse der Flamme-Wand-Interaktion. Dabei werden sowohl Ansätze mit Direkter Numerischer Si-

mulation (DNS) als auch mit der Grobstruktursimulation (engl. Large-Eddy-Simulation, LES) verfolgt. Hierbei untergliedern sich die Studien nach der Dimension des Rechengebietes (1D, 2D, 3D), der Komplexität der chemischen Reaktionsmechanismen (detaillierte Chemie, reduzierte Chemie, globale Reaktion), der Komplexität der Verbrennung selbst (Turbulenz, Brennstoff) sowie den zugrundeliegenden Randbedingungen an der Wand (isotherm, Enthalpieentzug, inert, katalytisch).

Mehrere Autoren führten eine eindimensionale Simulation kombiniert mit detaillierter Chemie durch [61, 130, 163]. Die in [130] gezeigten Ergebnisse geben experimentelle Werte hinsichtlich des maximalen Wärmestromes bei kalten Wänden ($T_w = 300$ K) gut wieder. Bei höheren Wandtemperaturen ($T_w = 600$ K) zeigt sich jedoch ein zunehmender Einfluss exothermer Radikal-Rekombinationen, wodurch die Wand möglicherweise nicht mehr als chemisch inert betrachtet werden kann und es zu Abweichungen zum Experiment kommt. Weitere Studien befassten sich mit der Verbrennung langkettiger Kohlenwasserstoffe hinsichtlich deren Oxidationskinetik in Wandnähe [172, 83].

Zweidimensionale DNS einer Methan-Flamme mit detaillierter chemischer Reaktionskinetik wurde von Andrae et al. durchgeführt [9]. Jedoch liegen die verwendeten Äquivalenzverhältnisse von ($0.2 < \Phi < 0.4$) nahe der unteren Zündgrenze für atmosphärische Flammen und haben in praktischen Verbrennungssystem kaum Relevanz. Den Einfluss der Turbulenz auf verlöschende Flammen mittels 3D-DNS und einem globalen Ein-Schritt-Reaktionsmechanismus untersuchten Bruneaux et al. [31] und entwickelten ein auf einem Flamelet-Ansatz basierendes Modell [32], welches Ergebnisse der DNS gut wiedergibt.

Dreidimensionale DNS in Verbindung mit detaillierter Chemie ist nach wie vor äußerst rechenintensiv. Daher werden derzeit Ansätze mit reduzierten Reaktionsmechanismen [40] verfolgt, um die Schadstoffproduktion an Spalten in Verbrennungsräumen bei der motorischen Verbrennung zu berechnen. Studien im DNS-Kontext, die auf detaillierten chemischen Reaktionsmechanismen beruhen, beschränken sich bisher auf die Simulation von turbulenten, drahtstabilisierten Wasserstoffflammen [79], deren Brennverhalten deutlich von dem realer Kraftstoffe verschieden ist.

Eine numerische Beschreibung der Flamme-Wand-Interaktion in einer dreidimensionalen Umgebung für komplexe Brennstoffe wurde bisher nicht in der Literatur berichtet, und eine deterministische Vorhersage der Schadstoffproduktion in technischen Systemen ist derzeit nicht möglich. Hinzu kommt, dass eine Vielzahl der Berechnungen aufgrund fehlender Messdaten bisher lediglich an anderen Simulationen validiert werden konnte. Diese Arbeit hat daher zum Ziel, diese Lücke zu schließen und erstmals die Charakteristik von an kalten Wänden verlöschenden Flammen messtechnisch abzubilden. Diagnostik nah an festen Oberflächen stellt eine besondere Herausforderung für die eingesetzte Messtechnik dar, worauf das folgende Unterkapitel kurz eingeht.

1.2.2 Laserbasierte Verbrennungsdiagnostik

Messungen von verbrennungsrelevanten Größen, wie Temperaturen, Stoffkonzentrationen und Geschwindigkeiten, stellen insbesondere nahe fester Oberflächen in vielerlei Hinsicht eine Herausforderung dar. Zum einen sind diese durch den Prozess selbst be-