

Zeitaufgelöste Verbrennungsdiagnostik zur Untersuchung der Bewegung von Flammen in turbulenten Strömungsfeldern

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. Philipp Johann Trunk

aus Collenberg am Main

Berichterstatter:	Prof. Dr. rer. nat. Andreas Dreizler
Mitberichterstatter:	Prof. Dr. Clemens F. Kaminski
Tag der Einreichung:	04. Februar 2013
Tag der mündlichen Prüfung:	16. April 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.

Trunk, Philipp Johann:

Zeitaufgelöste Verbrennungsdiagnostik zur Untersuchung der Bewegung von Flammen in turbulenten Strömungsfeldern

ISBN 978-3-86376-069-4

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

Die nachfolgende Arbeit entstand aus Forschungsaktivitäten zwischen August 2009 und April 2013 während meiner Zeit am Institut für Reaktive Strömungen und Messtechnik der Technischen Universität Darmstadt. Mein Dank gilt Prof. Dr. rer. nat. Andreas Dreizler für die Möglichkeit zur Promotion in seiner Gruppe. Sein kontinuierliches Interesse in meine Person und meine Arbeit hat wesentlich zu ihrem Gelingen beigetragen. Prof. Dr. Clemens F. Kaminski (Cambridge University) danke ich für die Übernahme des Koreferates verbunden mit seinem großes Interesse in die unterschiedlichen Themengebiete dieser Arbeit.

Eine Bereicherung waren zudem die Kooperation mit internationale Projektpartner während ihrer Besuche im Darmstädter Labor. In zeitlicher Reihenfolge hatte ich das Vergnügen mit Prof. Dr. Volker Sick, Dr. Michael Cundy (Michigan University), Dr. Philippe Scouflaire (EM2C Paris), Dr. Issac Boxx (DLR Stuttgart) und Dr. Jonathan H. Frank (Sandia National Laboratories) zusammenzuarbeiten zu dürfen. Insbesondere Isaac und Dr. Wolfgang Meier danke ich für die lange und fruchtbare Kooperation im Rahmen des Mehrebenexperiments.

Mein Dank gilt weiterhin Dr. Matthew J. Dunn (Sydney University) für die gemeinsame Arbeit am Wavelet-Thresholding, ihm, Prof. Dr. Assaad R. Masri sowie Dr. Nakul Prasad und Dr. Agissilaos Kourmatzis für ihre Gastfreundschaft und die freundliche Aufnahme in der Verbrennungsgruppe in Sydney.

Ein herzliches „vergelt's Gott“ gilt Roland Berntheisel und seinem Team in der Werkstatt für Unterstützung und fachlichen Rat bei der Umsetzung von Prüfständen und Laboraufbauten, Dr. Benjamin Böhm, Dr. Guido Künne für Diskussion zu flamentheoretischen Themen sowie meinem Bruder Christof für Korrekturlesen des Manuskriptes. Meinen direkten Kollegen Dr. Christof Heeger und Johannes Weinkauff sei für die vielen gemeinsamen Stunden im Labor herzlich gedankt. Jens Hermann und Markus Mann, mit denen ich jeweils ein Büro teilen durfte, sowie Elias Baum und Felix Eitel danke ich für ihre Beiträge zu dieser Arbeit durch ihre fachliche Interaktion und dafür, dass sie durch ihre Gesellschaft und Freundschaft meine Zeit am Fachgebiet befruchtet und bereichert haben. In wechselnder Besetzung waren Konferenzreisen in die japanische Südsee, an die amerikanische Ostküste, nach Warschau, London und Paris sowie ein sensationeller privater Tauchurlaub in Indien berufliche wie private Highlights der letzten Jahre. Ich werde die vielen schönen Bilder sicher mein ganzes Leben in wertvoller Erinnerung behalten und hoffe, dass diese Aktivitäten trotz unserer verschiedenen zukünftigen Wege nicht unsere letzten gemeinsamen Unternehmungen gewesen sind.

Großes Glück hatte ich allseits mit dem privaten Rückhalt meiner Familie, meinen Eltern und meinen Geschwister Christof und Bettina, sowie meinen Freunden, MitbewohnerInnen in der WG und MusikerkollegInnen in der TU Big Band für den ich euch allen sehr herzlich danke.

Mein ganz besonderer Dank gilt abschließend meiner Freundin Christina Kallendorf für Ermutigung und Inspiration, insbesondere während der mühsamen Zeit der Manuskripterstellung, darüber hinaus für blindes Verständnis, Vertrauen und Lebensfreude, die ich auch in Zukunft nie mehr missen möchte.

Darmstadt, im Juni 2013

Philipp Trunk

„Wissenschaft ist wie Sex. Manchmal kommt etwas Sinnvolles dabei heraus, das ist aber nicht der Grund, warum wir es tun.“

Richard P. Feynman

Amerikanischer Physiker und Nobelpreisträger (1965), Begründer der Quantenelektrodynamik, * 11. Mai 1918 in Queens, † 15. Februar 1988 in Los Angeles

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Grundlagen	5
2.1	Turbulente Verbrennung	5
2.1.1	Turbulente Strömung	5
2.1.2	Verbrennung	11
2.2	Modellierungsansätze	18
2.2.1	Konzeption der Modellierung	18
2.2.2	Modellierung der turbulenten Strömung	18
2.2.3	Modellierung der chemischen Kinetik	19
2.2.4	Flammenmodelle für Large Eddy Simulation	20
2.3	Laserbasierte Verbrennungsdiagnostik	22
2.3.1	Überblick über experimentelle Verfahren in Flammen	22
2.3.2	Stereoskopische Particle Image Velocimetry (SPIV)	23
2.3.3	Flammeneigenleuchten und Chemilumineszenz	30
2.3.4	Planare laserinduzierte Fluoreszenz	30
2.3.5	Tracerbasierte Fluoreszenzverfahren (Tracer PLIF)	34
2.3.6	Kombinative Verfahren	35
3	Zeitaufgelöste bildgebende Verbrennungsdiagnostik	39
3.1	Zielstellungen von zeitaufgelösten Messmethoden	39
3.2	Historische Entwicklungen	40
3.2.1	Vorläufer in der Fotografie	40
3.2.2	Miestreuung und PIV	40
3.2.3	Flammenlumineszenz und Chemilumineszenz	42
3.2.4	Semiquantitativ und Kombinativ	42
3.3	Aktuelle Trends	42
3.3.1	Kombination von Einzelmessstechniken	44
3.3.2	Quantitative skalare Verfahren	44
3.3.3	Dreidimensionale Datenaufnahme	45
3.4	Möglichkeiten und Limitierungen durch Hardware	46
3.4.1	Laser	46
3.4.2	Kamerasysteme	47
3.4.3	Linse und Abbildungsoptik	47
3.4.4	Zeitliche Synchronisation und Steuerung	48
3.5	Kopplung von zeitlicher und räumlicher Aufnahmedynamik	48
3.6	Möglichkeiten für die Datenanalyse	50
3.6.1	Statistik über Raum-Zeit-Dynamik	50
3.6.2	Zeit- und Raumkorrelationen	51
3.6.3	Taylor Volumenrekonstruktion	51

3.7	Verhältnis zu zeitaufgelösten numerischen Untersuchungen	52
3.7.1	Prinzipielle Schwierigkeiten beim Vergleich von Experiment und Simulation .	52
3.7.2	Möglichkeiten zur Validierung von Simulationsergebnissen	53
3.7.3	Interaktion zwischen Numerik und Experiment	53
4	Strategien zur Rauschminderung und quantitative zeitaufgelöste Methoden	55
4.1	Herausforderungen bei quantitativer zeitaufgelöster Diagnostik	55
4.2	Charakteristika von CMOS-Detektoren	57
4.2.1	CMOS-Bildsensoren	57
4.2.2	Bildverstärker	61
4.3	Nichtlineare Diffusionsfilterung zur robusten Gradientendetektion	64
4.3.1	Grundlagen der anisotropen nichtlinearen Diffusionsfilterung	64
4.3.2	Robuste Erkennung von Flammenfrontpositionen aus OH-PLIF-Daten	67
4.4	Wavelet Adaptive Thresholding zur Reduktion des Detektorrauschens	69
4.4.1	Grundlagen der Wavelettransformation und des waveletbasierten Entrauschens	69
4.4.2	Anwendung auf eindimensionale Signale (WAT-1d)	71
4.4.3	Anwendung auf zweidimensionale Signale (WAT-2d)	73
4.5	Quantitative zeitaufgelöste Verfahren	78
4.5.1	Übersicht von Methoden zum Messen des Mischungsbruchs	78
4.5.2	Methode zum quantitativen zeitaufgelösten Messen des Mischungsbruchs . . .	80
4.5.3	Schritte zur Quantifizierung der Skalarinformation	83
4.5.4	Mischung im isothermen Feld vor einer propagierenden Freistrahlf Flamme . . .	91
4.5.5	Potential und Grenzen der Methode	91
5	Experimentelle Untersuchung vorgemischter Flammenpropagation	95
5.1	Zurückliegende experimentelle Untersuchungen von Vormischverbrennung	95
5.2	Fragestellungen und Ziele	97
5.3	Experimentelle Methode mit transienter Flammenkonfiguration	98
5.4	Aufbau und messtechnische Realisierung	100
6	Methoden der Datenauswertung und Analyse	105
6.1	Dreikomponenten Geschwindigkeitsfelder aus SPIV Sequenzen	105
6.2	Flammenfrontpositionen und -normale Richtung aus Zweiebenen-OH-PLIF	107
6.3	Bestimmung der lokalen Eigengeschwindigkeit	107
6.4	Fehlerbetrachtungen	111
6.5	Beschreibung der Geometrie von Flammenfrontkonturen	113
7	Ergebnisse und Diskussion	117
7.1	Charakteristik der isotherme Strömung	117
7.2	Statistische Analyse	118
7.3	Analyse auf Einzelschussbasis	122
7.4	Sequenzanalyse	125
7.5	Potential der Methode	128
8	Zusammenfassung und Ausblick	133

Nomenklatur

Große lateinische Buchstaben		Einheit
A	Fläche	m^2
A_{21}	Einsteinkoeffizienten für die spontane Emission	$1/\text{s}$
B_{12}	Einsteinkoeffizienten für die stimulierte Absorption	m^2/Js
B_{21}	Einsteinkoeffizienten für die stimulierte Emission	m^2/Js
CDF	kumulative Verteilungsfunktion	—
Da	Damköhler-Zahl	—
E	Strahlungsflussdichte	W/m^2
E	Einheitsmatrix	—
E	Energie	J
E^*	Energie des angeregten Zustands *	J
F_{Fl}	spektraler Überlapp der Fluoreszenz	—
G	Verstärkungsfaktor (Gain)	—
Ka	Karlowitz-Zahl	—
Ka_δ	Karlowitz-Zahl (gebildet mit der thermischer Flammendicke)	—
L	Strahlungsdichte	$\text{W}/\text{m}^2\text{sr}$
L_{max}	maximale Kantenlänge des erweiterten Bildes	Pixel
Le	Lewis-Zahl	—
M	Abbildungsmaßstab	—
M	molare Masse	kg/mol
N	Anzahl	—
N_x, N_y	Größe des Bildes in x- bzw. y-Richtung	Pixel
N_{ext}	Größe des erweiterten Bildes	Pixel
N_a	maximal auslesbare Pixelanzahl	—
P	Produktionsrate der turbulenten kinetischen Energie	W
P_k	Predissoziationsrate	$1/\text{s}$
PDF	Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion	—
Q_k	Quenchrate	$1/\text{s}$
Pr	Prandtl-Zahl	—
R_{ij}	Korrelationstensor	—
R_{pix}	Pixelrate	$1/\text{s}$
Re	Reynoldszahl	—
Re_t	turbulente Reynoldszahl	—
Re_η	Reynoldszahl der Kolmorovskalen	—
RN	Ausleserauschen (Readout Noise)	counts
S_{ij}	Deformationsgeschwindigkeitstensor	m
S	Signal	—
Sc	Schmidt-Zahl	—
S_C	Signal in counts	counts
S_{ph}	Signal in Photoelektronen	—
T	Temperatur	K
T	Schwellwert	—
Tu	Turbulenzgrad	—

Nomenklatur

SDR	Dynamischer Bereich der räumlichen Skalen (spatial dynamic range)	—
VDR	Dynamischer Bereich der Geschwindigkeit (velocity dynamic range)	—
X	Zufallsvariable	—
$\bar{X}$	Mittelwert der Zufallsvariablen X	—
X_k	Molenbruch des Stoffes k	—
Y_k	Massenbruch des Stoffes k	—
Z	erhaltene skalare Größe	—
Z	Zufallsraum	—

Kleine lateinische Buchstaben

Einheit

a, b	Rotation bzw Skalierungsparameter der Wavelettransformation	—
c	Lichtgeschwindigkeit	m/s
c	Fortschrittsvariable	—
d	Durchmesser	m
d, D	Diffusionskonstante bzw. Diffusionstensor	—
f	Massenbruch	—
f	Frequenz	Hz
f	Brennweite	m
f_B	Boltzmann Fraktion	—
f_N	Mindestaufnahmefrequenz nach Nyquist	Hz
f_P	Grenzfrequenz desd Partikels	Hz
f_S	Datenaufnahmerate (Samplingfrequenz)	Hz
g	Gravitationskonstante	m/s ²
h	Plancksches Wirkungsquantum	Js
h	spezifische Enthalpie	J
i, j, k	Indexwerte (ganzzahlig)	—
k	Krümmung	1/mm
k	turbulente kinetische Energie	m ² /s ²
l	Länge	m
l_η	Kolmogorov Längenskala	m
l_0	integrale Längenskala	m
l_{abs}	Länge des Absorptionsweges	m
l_{Chip}	Sensorgröße	m
l_f	thermische Flammendicke	m
l_{FOV}	Größe des Bildbereichs	m
l_{pix}	Pixelgröße	m
l_{limit}	kleinste Strukturgröße	m
p	Druck	N/m ²
$\dot{q}$	Wärmestromdichte	W/m ²
r	Radius	m
s	Schlupf	—
s_a	Absolutgeschwindigkeit der Flamme	m/s
s_c	Verbrauchsgeschwindigkeit der Flamme	m/s
s_d	Eigengeschwindigkeit der Flamme	m/s
s_l	laminare Flammengeschwindigkeit	m/s
s_t	turbulente Flammengeschwindigkeit	m/s
t	Zeit	s
t_L	Pulsdauer des Lasers	s
u, v, w	Geschwindigkeitskomponenten	m/s
$\bar{u}, \bar{v}, \bar{w}$	mittlere Geschwindigkeitskomponenten	m/s
u', v', w'	Fluktuationen der Geschwindigkeitskomponenten	m/s
u_g	Induzierte Geschwindigkeit durch Gravitation	m/s
u_T	Induzierte geschwindigkeit durch Thermophorese	m/s

u_η	Kolmogorov Geschwindigkeit	m/s
u_{limit}	kleinste beobachtete Geschwindigkeit	m/s
x, y, z	Kartesische Koordinaten	m

Große griechische Buchstaben	Einheit
------------------------------	---------

Φ	Wavelet Skalierungsfunktion "Vater-Wavelet"	—
Φ	Quanteneffizienz der Fluoreszenz	—
Φ	Äquivalenzverhältnis	—
$\Gamma_{12,L}$	Integral der Absorptionsbandbreite des Lasers	—
Θ	Reaktionsfortschritt (dimensionslose Temperatur)	—
Ω_{ij}	Drehgeschwindigkeitstensor	1/s

Kleine griechische Buchstaben	Einheit
-------------------------------	---------

α, β, γ	Winkel	°
η	dynamische Viskosität	Ns/m ²
ϵ	turbulente Dissipationsrate	W
κ	Streckung	1/s
λ	Wellenlänge	m
λ	Kontrastparameter	—
ν	kinematische Viskosität	m ² /s
ξ	Mischungsbruch	—
ξ	Wirbelvektor	1/s
ρ	Dichte	kg/m ³
σ^2	Varianz	—
τ_0	integrale Zeitskala	s
τ_c	chemische Zeitskala	s
τ_η	Kolmogorov Zeitskala	s
τ_{limit}	kleinste beobachtete Zeitskala	s
χ	skalare Dissipationsrate	1/s
ψ	Mutter-Waveletfunktion	—
ω	Winkelgeschwindigkeit	sr/s

Abkürzungen

CARS	Coherent Anti-Stokes Raman Spectroscopy (Kohärente Anti-Stokes Raman-Spektroskopie)
CCD	Charged-Coupled Device (Ladungsgekoppelter Baustein)
CDF	Cumulative Distribution Function
CFD	Computational Fluid Dynamics
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor (Komplementärer Metalloxid-Halbleiter)
DNS	Direct Numerical Simulation (Direkte numerischer Simulation)
DEHS	Di-ethyl-hexyl-sebacat
DWT	Digital Wavelet Transformation
FFT	Fast Fourier Transformation
HS	High-Speed
IRO	Intensified Rayleigh Optics
LES	Large Eddy Simulation (Grobstruktursimulation)
LIF	Laser-induzierte Fluoreszenz
MODWT	Maximum Overlap Digital Wavelet Transformation
PDF	Probability Density Function
PDV	Phase Doppler Velocimetry
POD	Proper Orthogonal Decomposition
PTV	Particle Tracking Velocimetry
PVC	Processing Vortex Core

RANS	Reynolds Averaged Navier-Stokes (Reynolds gemittelte Navier-Stokes)
RET	Rotational Energy Transfer
RMS	Root Mean Square
SPIV	Stereoskopische Particle Image Velocimetry
SNR	Signal-to-Noise-Ratio
SWT	Stationary Wavelet Transformation
UV	Ultraviolett
VET	Vibrational Energy Transfer
YAG	Yttrium-Aluminium-Granat