Flammenstabilisierung in einer Hochdruck- Raketenbrennkammer bei koaxialer Injektion von LOX/Methan

Von der Fakultät für Maschinenwesen der
Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen
zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften
genehmigte Dissertation

vorgelegt von
Johannes Lux
aus Erkelenz

Berichter: Universitätsprofessor Dr.-Ing. W. Koschel
Universitätsprofessor Dr.-Ing. P. Jeschke

Tag der mündlichen Prüfung: 7. November 2008

Berichte aus der Luft- und Raumfahrttechnik

Johannes Lux

**Flammenstabilisierung in einer Hochdruck-
Raketenbrennkammer bei coaxialer Injektion
von LOX/Methan**

D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2008)

Shaker Verlag
Aachen 2008

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

Zugl.: RWTH Aachen University, Diss., 2008

Copyright Shaker Verlag 2008

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-7772-7

ISSN 0945-2214

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Meinen Eltern

„Es ist mein Job, nie zufrieden zu sein.“

(Wernher von Braun)

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Abteilung Technologie am Institut für Raumfahrtantriebe des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR) in Lampoldshausen.

Mein herzlicher Dank gilt Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. W. Koschel für die Möglichkeit zur Durchführung dieser interessanten Arbeit sowie für die Bereitstellung der notwendigen wissenschaftlichen Rahmenbedingungen. Ebenso danke ich Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. P. Jeschke für die Übernahme des Korreferats. Danken möchte ich zudem Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. W. Alles für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission sowie Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. H. Olivier für die Bereitschaft, sich als Beisitzer zur Verfügung zu stellen.

Des Weiteren gebührt mein Dank dem Leiter der Abteilung Technologie, Herrn Dr. O. Haidn, für die zahlreichen wissenschaftlichen Diskussionen und die daraus entstandenen Projekte, die weit über den Rahmen der vorliegenden Arbeit hinausgegangen sind. Herrn Dr.-Ing. D. Suslov danke ich für die Betreuung der experimentellen Untersuchungen und die hilfreichen Anregungen.

Ein besonderer Dank geht an alle Mitarbeiter des DLR-Standortes Lampoldshausen, die zum Gelingen der Arbeit beigetragen haben. Insbesondere möchte ich mich bei Herrn W. Clauß und Herrn V. Schmidt für die Hilfestellung in allen Fragen rund um die optische Diagnostik bedanken. Herrn A. Rohatschek danke ich für die tatkräftige Unterstützung bei der Erstellung der erforderlichen Hardware.

I would like to extend my appreciation to J. Smith, PhD, for introducing me to the field of optical diagnostics in high pressure liquid propellant rocket engine combustion and for sharing his insights with me.

Für das stets motivierende Arbeitsumfeld möchte ich mich ganz besonders bei Herrn D. Greuel und Herrn R. Arnold bedanken. Ebenfalls bedanke ich mich bei allen studentischen Hilfskräften, Studienarbeitern und Diplomanden, die mich während meiner Tätigkeit unterstützt haben. An dieser Stelle sei insbesondere Herrn M. Bechle für seinen ausdauernden Einsatz am Prüfstand gedankt.

Dem gesamten Team des Prüfstandes P8 danke ich für einen unermüdlichen Einsatz während sämtlicher Testkampagnen und die stets angenehme Arbeitsatmosphäre.

Mein ganz besonderer Dank gilt meinen Eltern für ihre Unterstützung meiner gesamten Ausbildung und die fortwährende Motivation während der Erstellung der vorliegenden Arbeit.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Grundlagen	5
2.1	Eigenschaften kryogener Fluide	5
2.1.1	Verhalten am kritischen Punkt	6
2.1.2	Phasengleichgewichte binärer Gemische	8
2.1.3	Grenzflächenspannung im CH_4/O_2 -System	11
2.2	Prinzip der Koaxialinjektion	13
2.2.1	Injektor-Bauweisen	13
2.2.2	Charakterisierende Kennzahlen	16
2.2.3	Flammenankerung am Injektor	18
2.3	Treibstoffkombination Sauerstoff/Methan	19
3	Stand der Forschung	23
3.1	Injektion inerter Fluide	23
3.2	Injektion reaktionsfähiger Fluide	26
3.2.1	Optische Untersuchungen von H_2/O_2 -Flammen	26
3.2.2	Optische Untersuchungen von CH_4/O_2 -Flammen	27
3.2.3	Numerische Simulation	28
3.3	LOX/CH_4 -Raketenbrennkammern	29
3.4	Strömungsverhalten in Raketenbrennkammern	32
4	Versuchsdurchführung	33
4.1	Europäischer Forschungsprüfstand P8	33
4.2	Modellbrennkammer C	34
4.2.1	Optischer Zugang	35
4.2.2	Injektorelement	36
4.3	Konventionelle Messtechnik	37
4.4	Optische Diagnostik	38
4.4.1	Flammvisualisierung	38
4.4.2	Spektroskopie	39
4.4.3	Strömungsvisualisierung	40
4.4.4	Optischer Aufbau	41
4.5	Bildverarbeitung	44
4.6	Optische Geschwindigkeitsbestimmung	50
4.6.1	Grundlagen	50
4.6.2	Anwendung in einer Raketenbrennkammer	53
5	Experimentelle Ergebnisse	55
5.1	Transienter Anfahrvorgang	59
5.2	Stationärer Betrieb	70

5.2.1	Einfluss des Brennkammerdrucks	75
5.2.2	Einfluss des Impulsstromverhältnisses	78
5.2.3	Einfluss der Fensterkühlung	85
5.2.4	Einfluss von Recess	90
5.3	Emissionsspektren	109
5.4	Geschwindigkeitsverteilung	112
6	Zusammenfassung	121
	Literaturverzeichnis	125
	Anhang	147
A	CH₄/O₂-Reaktionsmechanismus	147
B	Ergänzende Diagramme	149
B.1	Stoffeigenschaften	149
B.2	Strahldurchmesser	150
B.3	Radiale OH-Intensitätsverteilung	152
B.4	Leistungsdichtespektren	153
B.5	Radiale Intensitätsverteilung in Schattenaufnahmen	155
B.6	Kalibrierungsdaten der Bildverstärker	156
C	Brennkammer C	157
C.1	Messstellenplan und Fluidversorgung	157
C.2	Betriebssequenzen	158
C.3	Optischer Aufbau	159
D	Ergänzende Emissionsaufnahmen	161

Nomenklatur

Lateinische Symbole

Zeichen	Einheit	Bedeutung
a	$\text{Pa} \cdot \text{m}^6 \cdot \sqrt{\text{K}} \cdot \text{mol}^{-2}$	Parameter für die Anziehungskräfte zwischen Molekülen
a	m/s	Schallgeschwindigkeit
A	m^2	Fläche
AR		Flächenverhältnis (engl. area ratio)
b	m^3/mol	Kovolumen
b		Schätzwert
B	m	Breite
B	Pixel	radiale Flammenausdehnung
c^*	m/s	Kenngröße für die Verbrennungsgüte
c_F		Schubkoeffizient
c_p	$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$	isobare Wärmekapazität
d	m	Durchmesser
DR		Dichteverhältnis (engl. density ratio)
$\vec{e}_x, \vec{e}_y$		Einheitsvektor in x - bzw. y -Richtung
f	Hz	Frequenz
F		Intensität
F	N	Schubkraft
$\mathcal{F}$		Fourier-Transformation
g	m/s^2	Erdbeschleunigung
G		Betrag des Gradienten $\vec{\nabla} I$
h	J·s	Planck'sches Wirkungsquantum
H	m	Höhe
i	Pixel	axiale Position
I		Intensität
I_{sp}	s	spezifischer Impuls
j	Pixel	radiale Position
J		Impulsstromverhältnis (engl. momentum flux ratio)
k	J/K	Boltzmann-Konstante
k	m^3/kg	Gladstone-Dale Koeffizient
k_{ij}		binärer Wechselwirkungsparameter
L	m	Länge
m		Bildspalte
$\dot{m}$	kg/s	Massenstrom
M	Pixel	Kantenlänge
M	kg/mol	molare Masse
Ma		Mach-Zahl
n		Anzahl

Zeichen	Einheit	Bedeutung
n		Bildzeile
n		Brechungsindex
N		Gesamtanzahl
N	Pixel	Kantenlänge
Oh		Ohnesorge-Zahl
P, p	Pa	Druck
$[P]$	$\text{N}^{0,25} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{m}^{2,75}$	Parachor
r	m	Versatz LOX-post (engl. recess)
R	$\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$	allgemeine Gaskonstante
R		Kreuzkorrelation
R	1/m	Rayleigh-Verhältnis
Re		Reynoldszahl
ROF		Mischungsverhältnis (engl. ratio of oxidizer to fuel)
s	Pixel	axiale Verschiebung
s	m	Scherschichtdicke
s_{η}		Nullstelle η der Bessel-Funktion v
t	Pixel	radiale Verschiebung
t	m	Wandstärke LOX-post
t	s	Zeit
T	K	Temperatur
u	m/s	Geschwindigkeit
v	m/s	Geschwindigkeit
v	m^3/mol	molares Volumen
v	m^3/kg	spezifisches Volumen
v^2		Varianz des Rauschanteils
VR		Geschwindigkeitsverhältnis (engl. velocity ratio)
We		Weber-Zahl
x		axiale Position
x		Molanteil, Gasphase
y		Molanteil, Flüssigkeitsphase
y		radiale Position
y	m	Spaltbreite

Griechische Symbole

Zeichen	Einheit	Bedeutung
α	$^{\circ}$	Taper-Winkel
ϵ		Dielektrizitätskonstante
ϵ		Düsenexpansionsverhältnis
ϵ_{6-12}	J	Lennard-Jones-Parameter
η	$\text{Pa} \cdot \text{s}$	dynamische Viskosität
η_{c^*}		c^* -Verbrennungseffizienz
κ		Isentropenexponent
κ_T	1/Pa	isothermer Kompressibilitätskoeffizient

Zeichen	Einheit	Bedeutung
λ	m	Wellenlänge
μ		lokaler Mittelwert
ρ	kg/m^3	Dichte
ρ		Emissionsdichte
σ	N/m	Oberflächen-/Grenzflächenspannung
σ^2		lokale Varianz, Standardabweichung
σ_{6-12}	m	Van-der-Waals-Radius

Indizes, tiefgestellt

Zeichen	Bedeutung
0	Referenzzustand, Umgebungszustand
c	kritischer Zustand (engl. critical)
cc	Brennkammer (engl. combustion chamber)
e	Zustand am Düsenaustritt (engl. exit)
f	flüssige Phase
g	gasförmige Phase
i	innen (engl. inner)
<i>i</i>	Koeffizient
<i>j</i>	Koeffizient
kp	Injektorkopfplatte
max	maximal
o	außen (engl. outer)
opt	optimal
r	reduzierte Größe
thres	Grenzwert, Schwellenwert (engl. threshold)
throat	Düsenhals, engster Querschnitt (engl. throat)
win	Fensterkühlung (engl. window cooling)

Indizes, hochgestellt

Zeichen	Bedeutung
-1	invers
*	komplex konjugiert
*	kritische Größe im engsten Querschnitt

Abkürzungen

Zeichen	Bedeutung
AU	Arbitrary Units
CARS	Coherent Anti-Stokes Raman Spectroscopy

Zeichen	Bedeutung
CCD	Charge-Coupled Device
CFD	Computational Fluid Dynamics
ClF ₃	Chlortrifluorid, Chlor-3-Fluorid
CNG	komprimiertes Erdgas (engl. compressed natural gas)
FFT	Fast-Fourier-Transformation
FLOX	Mischung aus Flüssigfluor und Flüssigsauerstoff
GH ₂	gasförmiger Wasserstoff
GHe	gasförmiges Helium
GN ₂	gasförmiger Stickstoff
GO ₂	gasförmiger Sauerstoff
H ₀	Zündzeitpunkt
HF	hochfrequent
LCH ₄	Flüssigmethan
LDV	Laser Doppler Velocimetry
LH ₂	Flüssigwasserstoff
LN ₂	Flüssigstickstoff
LNG	Flüssigerdgas (engl. liquified natural gas)
LOS	Line of sight
LOX	Flüssigsauerstoff
M	Moderator
max	maximal
MBWR	modifizierte Benedict-Webb-Rubin-Gleichung
min	minimal
MMH	Monomethylhydrazin
N ₂ O ₄	Distickstofftetroxid
NBP	Normal Boiling Point
PDPA	Phase Doppler Particle Analyzer
PIV	Particle Image Velocimetry
PLIF	planare laserinduzierte Fluoreszenz
PSD	Leistungsdichtespektrum (engl. power spectral density)
RP-1	Flüssigbrennstoff auf Kerosinbasis (C _n H _{1,953n}), amerikanischer Raumfahrt-Standard
SSME	Space Shuttle Main Engine
TEA	Triethylaluminium
TEB	Triethylboran
UV	ultraviolett
Xe	Xenon