

Numerische Simulation der Benzinselbstzündung

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. Thomas Breitenberger

aus Melsungen

Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. J. Janicka
Mitberichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. C. Hasse
Tag der Einreichung:	22. August 2013
Tag der mündlichen Prüfung:	29. Oktober 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.

Breitenberger, Thomas:

Numerische Simulation der Benzinselbstzündung

ISBN 978-3-86376-065-6

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 vorliegende Dissertation ist im Rahmen meiner fünfjährigen Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet für Energie- und Kraftwerkstechnik der Technischen Universität Darmstadt entstanden.

Mein Dank gilt daher im Besonderen dem Leiter des Fachgebiets, Herrn Prof. Dr.-Ing. Johannes Janicka, für die Ermöglichung der Promotion und für sein Vertrauen in meine Person. Er hat durch sein Interesse und seine Begeisterungsfähigkeit das Vorhaben maßgeblich vorangetrieben und mir zu jeder Zeit die notwendige Freiheit und Unterstützung bei der Durchführung gewährt.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Christian Hasse, dem Leiter des Lehrstuhls für Numerische Thermofluidodynamik der Technischen Universität Bergakademie Freiberg, danke ich für die Übernahme des Koreferats und dem damit verbundenen Interesse an meiner Arbeit.

Bei allen Kollegen und Mitarbeitern des Fachgebiets bedanke ich mich für die kreative Arbeitsatmosphäre sowie die gute Zusammenarbeit und das kollegiale Verhältnis. Durch kritische Diskussionen sind die erzielten Ergebnisse erst möglich geworden. Namentlich möchte ich meinen Kollegen Dr.-Ing. Jens Kühne, Dr.-Ing. Michael Baumann und Dipl.-Ing. Andreas Ludwig sowie Dr.-Ing. Kai Aschmoneit für die Loyalität, fruchtbare Zusammenarbeit und Hilfsbereitschaft danken. Neben zahlreichen interessanten wissenschaftlichen und privaten Diskussionen trugen sie maßgeblich zum Gelingen der Arbeit bei.

Besonderer Dank gebührt meinen Eltern, die meine Neugier geweckt haben und mir stets die Freiheit gaben, Wege einzuschlagen, die ich für erstrebenswert hielt. Sie haben mich während meiner Schul- und Studienzeit nicht nur finanziell unterstützt.

Meiner Partnerin Maren Leudesdorff danke ich aus tiefstem Herzen für die fortwährende Unterstützung und den starken Rückhalt. Dadurch ist es mir möglich, mich auch herausfordernden Aufgaben zu stellen.

Thomas Breitenberger

Darmstadt, den 22. August 2013

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	1
1.2	Stand der Forschung	3
1.3	Zielsetzung und Aufbau der Arbeit	5
2	Motorische Grundlagen	7
2.1	Funktionsweise und Kenngrößen	7
2.2	Motorische Zündung und Verbrennung	11
3	Theoretische Grundlagen und Modellierung	15
3.1	Strömungsmechanische Gleichungen	15
3.2	Numerische Gitter	19
3.3	Turbulenz	20
3.4	Simulationstechniken turbulenter Strömung	23
3.4.1	Direkte Numerische Simulation	24
3.4.2	Reynolds-Averaged Navier-Stokes	24
3.4.3	Grobstruktursimulation	25
3.5	Mehrphasenströmungen	30
3.5.1	Direkte Methode	30
3.5.2	Modellierende Verfahren	30
3.6	Modellierung der dispersen Phase	31
3.6.1	Tropfenverteilungsfunktion	31
3.6.2	Kollisionsmodell	32
3.6.3	Zerfallsmodell	33
3.6.4	Verdampfungsmodell	34
3.6.5	Kopplung der Trägerphase und dispersen Phase	34
3.7	Verbrennung	35
3.7.1	Reaktionskinetik	35
3.7.2	Gliederung von Flammen	37
3.8	Modellierung turbulenter Verbrennung	39
3.8.1	Mischungsbruchansatz	40
3.8.2	Flamelet-Modell	42
3.8.3	Flamelet Generated Manifolds	44
3.9	Zündung	49
3.9.1	Zündverhalten von Kohlenwasserstoffgemischen	50
3.9.2	Modellierung der Selbstzündung	51

4	Numerisches Verfahren	53
4.1	Lagrange'scher Rechenschritt	54
4.1.1	Diskretisierung	55
4.1.2	Lösung des gekoppelten Gleichungssystems	57
4.2	Konvektiver Rechenschritt	60
4.2.1	Diskretisierung	60
4.3	Zeitschrittsteuerung und Konvergenz	62
4.4	Randbedingungen	63
4.5	Rechenzeit	64
5	Verifikation	67
5.1	Verdampfung eines Tropfens	67
5.2	Der eindimensionale Dichtesprung	70
5.3	Die eindimensionale Flamme	73
5.4	Der homogene Reaktor	76
6	Anwendungen	79
6.1	Volvo-Brenner	79
6.1.1	Aufbau	79
6.1.2	Ergebnisse	81
6.2	Sandia FlameD	84
6.2.1	Aufbau	84
6.2.2	Ergebnisse	86
6.3	Transparentmotor	91
6.3.1	Aufbau	91
6.3.2	Ergebnisse	95
6.4	Vollmotor	113
6.4.1	Aufbau	113
6.4.2	Ergebnisse	117
7	Zusammenfassung und Ausblick	125
	Literaturverzeichnis	127

Nomenklatur

Große lateinische Buchstaben

Einheit

Große lateinische Buchstaben		Einheit
$A_{(f/b),j}$	Präexponentialfaktor der Reaktion j	$k_{(f/b),j}$
A	Fläche	m^2
C_s	Smagorinsky-Konstante	–
D	Diffusionskoeffizient	$m^2 s^{-1}$
D_m	Diffusionskoeffizient der Spezies m	$m^2 s^{-1}$
D_K	Bohrungsdurchmesser des Kolbens	m
E_a	Aktivierungsenergie	$kg m^2 s^{-2} mol^{-1}$
$E(k)$	Spektrum der turbulenten kinetischen Energie	$m^2 s^{-2}$
F_i	Kraft	$kg m s^{-2}$
I	Spezifische innere Energie	$J kg^{-1}$
$J_j^{Y_m}$	Massenbruch-Flussvektor der Spezies m	$kg m^{-2} s^{-1}$
L	Charakteristische Länge	m
L_{ij}	Integrales Längenmaß	m
M	Masse	kg
N	In eine Mittelung eingehende Menge	–
N_k	Anzahl der Unterzeitschritte für den konvektiven Rechenschritt	–
N_S	Anzahl der Spezies	–
N_R	Anzahl der Reaktionen	–
P_t	Thermische Leistung	$kg m^2 s^{-3}$
$\dot{Q}_{zu,ab}$	Zu- bzw. abgeführter Wärmestrom	$kg m^2 s^{-3}$
R	Universelle Gaskonstante	$kg m^2 s^{-2} mol^{-1} K^{-1}$
R_{ij}	Korrelationsfunktion	–
S_{ij}	Deformationsgeschwindigkeitstensor	s^{-1}
T	Temperatur	K
T^d	Temperatur eines Tropfens	K
T_{ij}	Integrales Zeitmaß	s
U	Charakteristische Geschwindigkeit	$m s^{-1}$
V	Volumen	m^3
$ V $	Geschwindigkeitsmagnitude	$m s^{-1}$
V_c	Kompressionsvolumen	m^3
V_h	Hubvolumen	m^3
W	Arbeit	$kg m^2 s^{-3}$
W	Molmasse	$kg mol^{-1}$
X_m	Molenbruch der Komponente m	–
Y_m	Massenbruch der Komponente m	–
\mathcal{Y}	Fortschrittsvariable	Υ
\mathcal{Y}^*	Normierte Fortschrittsvariable	–

\mathcal{Y}_{eq}	Gleichgewichtswert der Fortschrittsvariable	Υ
Z_γ	Elementmassenbruch des Elements γ	—
Z	Mischungsvariable	—

Kleine lateinische Buchstaben		Einheit
a_i^d	Beschleunigung eines Tropfens	m s^{-2}
$a_s(T_d)$	Oberflächenspannung	kg s^{-2}
b	Stoßparameter	m
c_m	Mittlere Kolbengeschwindigkeit	m s^{-1}
c_p	Spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck	$\text{J kg}^{-1}\text{K}^{-1}$
c_v	Spezifische Wärmekapazität bei konstantem Volumen	$\text{J kg}^{-1}\text{K}^{-1}$
f	Mischungsbruch	—
f	Tropfenverteilungsfunktion	—
$k_{f,j}, k_{b,j}$	Geschw.-Koeff. der Vor- und Rückwärtsreaktionen	$(\text{kmol m}^{-3})^{1-\sum_m \nu_{m,j}}\text{s}^{-1}$
l_{st}	Luftbedarf bei Stöchiometrie	—
l_f	Flammendicke	m
o_{st}	Sauerstoffbedarf bei Stöchiometrie	—
p	Druck	$10^5 \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-2}$
p_i	Impuls	kg m s^{-1}
r	Radius eines Tropfens	m
$r_{f,j}, r_{b,j}$	Reaktionsrate der Vorwärts- und Rückwärtsreaktionen	$\text{kmol m}^{-3}\text{s}^{-1}$
s	Kolbenweg	m
s	Flammenkoordinate	—
s_l	Laminare Flammengeschwindigkeit	m s^{-1}
t	Zeit	s
u_i	Geschwindigkeit	m s^{-1}
u_i^d	Geschwindigkeit eines Tropfens	m s^{-1}
w_m	Wichtungsfaktor der Fortschrittsvariable	\mathcal{Y}
x_i	Ortskoordinate	m
y	Verzerrung von der Sphärizität eines Tropfens	m
\dot{y}	Zeitliche Änderung des Radius eines Tropfens	m s^{-1}

Große griechische Buchstaben		Einheit
Δ	Filterweite	m
Φ	Äquivalenzverhältnis	—
Φ^D	Wichtungsfaktor	—
Φ^P	Wichtungsfaktor	—
Υ	Beliebige Einheit	Υ

Kleine griechische Buchstaben		Einheit
η	Wirkungsgrad	—
ϵ	Kompressionsverhältnis	—

ε	Turbulente Dissipationsrate	$\text{m}^2 \text{s}^{-3}$
γ	Verhältnis zweier Radien	—
η_{th}	Thermischer Wirkungsgrad	—
κ	Wellenzahl	m^{-1}
λ	Luftzahl	—
λ	Wärmeleitfähigkeit	$\text{kg m K}^{-1} \text{s}^{-3}$
μ	Dynamische Viskosität	$\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$
ν	Kinematische Viskosität	$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$
$\nu'_{m,R}$	Stöchiometrische Koeffizienten	—
$\nu''_{m,R}$	Stöchiometrische Koeffizienten	—
ν_t	Turbulente Viskosität	$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$
ϕ	Beliebiger Skalar	Υ
ρ	Dichte	kg m^{-3}
ρ_m	Dichte der Spezies m	kg m^{-3}
ρ^d	Dichte eines Tropfens	kg m^{-3}
τ	Beliebiges Zeitmaß	s
τ_{ij}	Feinstruktur-Spannungstensor	$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$
χ	Skalare Dissipationsrate	s^{-1}
$\dot{\omega}$	Beliebiger Quellterm	Υ
$\dot{\omega}_m$	Quellterm der Komponente m	$\text{kg m}^{-3} \text{s}^{-1}$

Tiefgestellte Indizes

<i>eff</i>	Effektiv
<i>f</i>	Anzahl der Flächen eines Kontrollvolumens
<i>ind</i>	Indiziert
<i>m</i>	Komponente
<i>mech</i>	Mechanisch
<i>th</i>	Thermisch
1	Stoßpartner eins
2	Stoßpartner zwei

Hochgestellte Indizes

<i>A</i>	Berechnungsphase A betreffend
<i>B</i>	Berechnungsphase B betreffend
<i>C</i>	Berechnungsphase C betreffend
<i>d</i>	Tropfen betreffend
<i>k</i>	Konvektiver Zeitschritt k
<i>n</i>	Zeitschritt n

Operatoren und Symbole

$\bar{\Phi}$	Zeitgemittelte Größe
$\overline{\Phi'^2}$	Varianz von zeitlich gemittelter Größe

$\overline{\Phi'^2}^{\frac{1}{2}}$	Standardabweichung von zeitlich gemittelter Größe
$\overline{\Phi'^2}$	Favre-Feinstruktur-Varianz
$\tilde{\Phi}$	Favre-gefilterte Größe
$\langle \Phi \rangle$	Phasengemittelte Größe
$\langle \Phi'^2 \rangle$	Varianz von phasengemittelter Größe
$\langle \Phi'^2 \rangle^{\frac{1}{2}}$	Standardabweichung von phasengemittelter Größe
Φ'	Fluktuierender Anteil einer mittleren oder gefilterten Größe
Φ''	Fluktuierender Anteil einer Favre-gefilterten Größe

Dimensionslose Kennzahlen

CFL	Courant-Friedrich-Levy
Da	Damköhler-Zahl
Da_t	Turbulente Damköhler-Zahl
Le	Lewis-Zahl
Pr	Prandtl-Zahl
Re	Reynolds-Zahl
Re_t	Turbulente Reynolds-Zahl
Sc	Schmidt-Zahl
St	Strouhal-Zahl
We	Weber-Zahl

Abkürzungen

AGR	Abgasrückführung
CAI	Controlled Auto Ignition
CFD	Computational Fluid Dynamics
CIHC	Compression Ignited Homogeneous Charge
DES	Detached Eddy Simulation
DFG	Deutsche Forschungsgemeinschaft
DI	Direct Injection
DISI	Direct Injection Spark Ignition
FVV	Forschungsvereinigung für Verbrennungskraftmaschinen
FSD	Flame Surface Density
HCCI	Homogeneous Charge Compression Ignition
ILDMM	Intrinsic Low Dimensional Manifold
IC	In Cylinder
LES	Large Eddy Simulation
LDA	Laser-Doppler-Anemometrie
LWOT	Oberer Totpunkt des Ladungswechsels
MPI	Message Passing Interface
PCCI	Premixed Charge Compression Ignition
PDC	Partial Donor Cell
PDF	Probability Density Function
PIV	Particle Image Velocimetry

QSOU	Quasi Second Order Upwind
RANS	Reynolds-Averaged Navier-Stokes
SGS	Sub Grid Scale
SI	Spark Ignition
SIMPLE	Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations
SST	Shear Stress Transport
TAB	Taylor Analogy Break-Up
UDS	Upwind Differencing Scheme
VoF	Volume of Fluid
ZOT	Oberer Totpunkt der Zündung