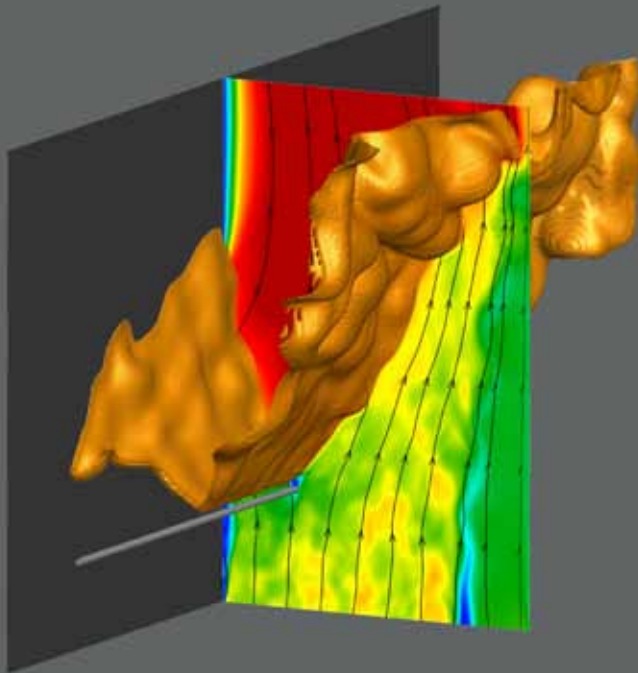


Turbulente, chemisch reagierende Strömungen: Wandnahe Simulationen

Arne Heinrich



Turbulente, chemisch reagierende Strömungen: Wandnahe Simulationen

Dem 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

Arne Heinrich, M. Sc.

aus Bad Saarow, Deutschland

Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Johannes Janicka
Mitberichterstatter:	Prof. Dr. rer. nat. Michael Schäfer
Tag der Einreichung:	09.04.2018
Tag der mündlichen Prüfung:	06.06.2018

Darmstadt 2018

D17

Berichte aus der Energietechnik

Arne Heinrich

**Turbulente, chemisch reagierende Strömungen:
Wandnahe Simulationen**

D 17 (Diss. TU Darmstadt)

Shaker Verlag
Aachen 2018

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.: Darmstadt, Techn. Univ., Diss., 2018

Copyright Shaker Verlag 2018

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-6089-8

ISSN 0945-0726

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

Danksagung

Die hier vorliegende Arbeit ist während meiner dreijährigen Arbeit als Doktorand am Institut für Energie- und Kraftwerkstechnik an der TU Darmstadt entstanden. An erster Stelle möchte ich dem Institutsleiter Herrn Prof. Dr. Ing. Johannes Janicka dafür danken, mir hier in Darmstadt die Möglichkeit zur Promotion geben zu haben und für das geschenkte Vertrauen zum selbstständigen Arbeiten, welches schließlich zu dieser Dissertation geführt hat.

Außerdem danke ich Herrn Prof. Dr. rer. nat. Michael Schäfer für die freundliche Übernahme des Korreferats und der Darmstadt Graduate School of Excellence Energy Science and Engineering für die Finanzierung in den letzten drei Jahren.

Des Weiteren möchte ich mich bei meinen Kollegen aus dem EKT, RSM und STFS für die gute Arbeitsatmosphäre, den gemeinschaftlichen Feiern und sportlichen Aktivitäten bedanken, auch die hier erfahrende Zusammenarbeit und Hilfsbereitschaft sind nicht selbstverständlich. Weiterer Dank gilt auch Prof. Andreas Dreizler für die produktive Zusammenarbeit bei meiner ersten Veröffentlichung. Einigen Kollegen möchte ich noch speziell danken. Zuerst Guido Künne, für die fachliche Unterstützung und Ausrichtung meiner Arbeit, auch dafür, dass du dir immer Zeit genommen hast, wenn ich Fragen hatte. Als nächstes bedanke ich mich bei Florian Ries, für die unendlich vielen fachlichen Gespräche und Diskussionen, welche auch schnell mal in absurde Themen abwichen. Bei meinem Bürokollegen Michael Stephan, für die gute gemeinsame Zeit, in welcher wir beide unsere Arbeiten durchführten und letztendlich auch zusammenschreiben durften. Des Weiteren danke ich Flavia Cavalcanti Miranda, für das oftmalige Zuhören und die vielen Diskussionen, sowohl fachlich als auch privater Natur. Dank geht auch an meine Korrekturleser, Andreas Ludwig und Hendrik Nicolai, denn so wurde diese Arbeit deutlich fehlerfreier hinsichtlich der Sprache bzw. des Inhaltes. Nicht zu vergessen sind die Doktoranden aus dem Linux-IT Team, insbesondere Illya Shevchuk und Dennis Kütemeier, die alles dafür getan haben meinen betreuungsintensiven PC am Laufen zu halten, wie zum Beispiel ihn mit Festplatten und Arbeitsspeicher zu versorgen. Zum Schluss möchte ich meinen Freunden und der Familie danken, für die bedingungslose Unterstützung in dieser Zeit, besonders in der letzten, sehr anstrengenden Phase. Hervorheben möchte ich dabei meine lieben Eltern, Torsten und Kirsten Heinrich, für die großartige Unterstützung während meiner gesamten Studien- und Promotionszeit, welche mir außerdem jegliche Freiheiten gaben, den heutigen Weg einschlagen zu können.

Darmstadt, April 2018

Arne Heinrich

„Es gibt kein größeres Hindernis des Fortgangs in den Wissenschaften als das Verlangen,
den Erfolg davon zu früh verspüren zu wollen.“

Georg Christoph Lichtenberg

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	1
1.2	Stand der Forschung	3
1.3	Zielsetzung	6
1.4	Aufbau der Arbeit	7
2	Beschreibung und Modellierung turbulenter Strömungen	9
2.1	Grundgleichungen	9
2.1.1	Massen- und Impulserhaltung	10
2.1.2	Spezieserhaltung	11
2.1.3	Enthalpieerhaltung	13
2.1.4	Thermische Zustandsgleichung	16
2.1.5	Zusammenfassung der verwendeten Gleichungen	16
2.2	Turbulenz	17
2.2.1	Energiekaskade und turbulente Skalen	18
2.2.2	Modellierung turbulenter Strömung	20
2.2.3	Large-Eddy-Simulation	20
2.3	Zusammenfassung	24
3	Beschreibung und Modellierung turbulenter reagierender Strömungen	25
3.1	Grundlagen chemischer Reaktion	25
3.1.1	Reaktionskinetik	26
3.1.2	Flammentypen	27
3.1.2.1	Diffusionsflammen	28
3.1.2.2	Vormischflammen	29
3.1.3	Eigenschaften vorgemischter Flammen	30
3.1.3.1	Laminare Eigenschaften	30
3.1.3.2	Flamme-Turbulenz-Interaktion	32
3.1.4	Flamme-Wand-Interaktion	35
3.1.4.1	Laminare Flamme-Wand-Interaktion	36
3.1.4.2	Turbulente Flamme-Wand-Interaktion	38
3.2	Chemiebehandlung	39
3.2.1	Chemiereduktion mittels FGM	40
3.2.1.1	Wahl der Reaktionsfortschrittsvariable	40
3.2.1.2	Tabellengenerierung	41
3.2.1.3	Anpassung der Flammengeschwindigkeit aufgrund der Diffusionsannahme	44

3.2.1.4	FGM-Kopplung mit einem LES-Löser	45
3.2.2	Turbulenz-Chemie-Interaktion für die LES im ATF-Kontext	47
3.2.2.1	Künstliches Flammenaufdicken	47
3.2.2.2	Wrinkling	48
3.2.2.3	Dynamische Aufdickung	49
3.2.3	Chemiebeschreibung mittels DC	50
4	Numerische Verfahren	51
4.1	Generelles Lösungsverfahren	51
4.1.1	Räumliche Diskretisierung	51
4.1.2	Konvektive Flüsse	54
4.1.3	Diffusive Flüsse	55
4.1.4	Zeitliche Diskretisierung	56
4.1.5	Druckkorrektur	57
4.1.6	Randbedingungen	59
4.2	Performancesteigerungen in FASTEST	59
4.2.1	Parallelisierung in FASTEST	60
4.2.1.1	Blocking communication in FASTEST	61
4.2.1.2	Non-blocking communication in FASTEST	63
4.2.1.3	Vergleich der Skalierung	65
4.2.2	Externe Bibliothek iterativer Gleichungslöser	66
4.2.2.1	Bibliothek LIS	67
4.2.3	Skalierungsplot mit realem Fall	68
4.2.4	Zusammenfassung der Performancesteigerungen	68
5	Charakterisierung des simulierten experimentellen SWQ-Brenners	69
5.1	Beschreibung des Brenners und verwendete Messtechnik	69
5.1.1	Messgenauigkeiten und Unterschiede zu den Simulationen	71
5.2	Numerische Beschreibung des Brenners	72
5.2.1	Gebietsbeschreibung für OpenFOAM	72
5.2.2	Gebietsbeschreibung für FASTEST	73
5.3	Physikalische Beschreibung und Randbedingungen am SWQ-Brenner . . .	75
5.3.1	Laminare Strömung	76
5.3.2	Flammenstabilisierung	78
5.3.3	Turbulente Strömung	80
5.4	Zusammenfassung	85
6	Ergebnisse der laminaren SWQ-Konfiguration	87
6.1	Grundlagen für die laminare Auswertung	87
6.1.1	Bestimmung der Verlöschpunktes	87
6.1.2	Einführung eines konditionierten Koordinatensystems	88
6.1.3	ATF-Rücktransformation	89
6.2	Nicht reaktiver Vergleich der Geschwindigkeiten	90
6.3	Reaktive Konfiguration	91
6.3.1	Reaktiver zweidimensionaler Fall	91
6.3.2	Reaktiver dreidimensionaler Fall	94

6.3.3	Vergleich von Verlöschpunkt, Wärmestromdichte und Verlöschabstand	94
6.3.4	Einfluss der Wandtemperatur basierend auf einer zweidimensionalen Auswertung	96
6.3.5	Auswertung der Temperatur und des CO-Molenbruch	97
6.3.5.1	Temperaturprofile	97
6.3.5.2	CO-Molenbruch-Profile	98
6.3.5.3	CO-T-Profile	98
6.3.6	Zusammenfassung der 2-D und 3-D-Ergebnisse	100
6.4	Auswertung der FGM-Simulationen nahe der Wand	101
6.5	Zusammenfassung der laminaren Ergebnisse	103
7	Ergebnisse der turbulenten SWQ-Konfiguration	105
7.1	Wahl des ATF-Modells im turbulenten Fall	105
7.2	Bestimmung der Verlöschpunktes	106
7.3	Vergleich mit den experimentellen Daten	109
7.3.1	Nicht reagierendes Strömungsfeld	109
7.3.2	Vergleich der reagierenden LES mit dem Experiment	111
7.4	Charakterisierung der Flamme-Wand-Interaktion	114
7.4.1	Verlöschpunkt und Flammenform im Vergleich zum laminaren Fall	115
7.4.2	Flamme-Wand-Auftreffwinkel	115
7.4.3	Flammenlänge und Verlöschlinienlänge	117
7.4.4	Axiale Verlöschposition und Wärmefluss	119
7.4.5	Verlöschabstand und zugehörige Wandwärmestromdichte	122
7.5	Transiente Analyse der Flamme-Wand-Interaktion	123
7.5.1	Einteilung der Bewegungen vom Verlöschpunkt	123
7.5.2	Verlöschpunkt und Wärmestromdichte in der transienten Betrachtung	128
7.6	Zusammenfassung	133
8	Zusammenfassung und Ausblick	137
8.1	Zusammenfassung	137
8.2	Ausblick	139
	Literaturverzeichnis	141
	Lebenslauf	155