

Frederic Buß

Geschürte Verbrennung fester Biomasse: DEM/CFD-Modellierung und experimentelle Untersuchungen

Geschürte Verbrennung fester Biomasse:
DEM/CFD-Modellierung und experimentelle Untersuchungen

Dissertation
zur
Erlangung des Grades
Doktor-Ingenieur

der
Fakultät für Maschinenbau
der Ruhr-Universität Bochum

von
Frederic Alexander Buß
aus Düsseldorf

Bochum 2019

Dissertation eingereicht am: 19.12.2019.

Tag der mündlichen Prüfung: 23.06.2020.

Erstgutachter: Prof. Dr.-Ing Viktor Scherer

Zweitgutachter: Prof. Dr.-Ing Michael Beckmann

Berichte aus der Energietechnik

Frederic Buß

**Geschürte Verbrennung fester Biomasse:
DEM/CFD-Modellierung und experimentelle
Untersuchungen**

Shaker Verlag
Düren 2020

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.: Ruhr-Universität Bochum Diss., 2020

Copyright Shaker Verlag 2020

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-7604-2

ISSN 0945-0726

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

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

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Energieanlagen und Energieprozesstechnik (LEAT) der Ruhr-Universität Bochum.

Mein ganz besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Viktor Scherer für die sehr gute Zusammenarbeit während meiner Tätigkeit am Lehrstuhl sowie die konstruktive und wissenschaftliche Unterstützung bei der Anfertigung meiner Dissertation. Darüber hinaus danke ich ihm für die Übernahme des Hauptreferats.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael Beckmann danke ich für die freundliche Übernahme des Ko-referats und das entgegengebrachte Interesse an meiner Arbeit.

Großer Dank gilt auch Herrn Dr.-Ing. Siegmund Wirtz für seine wissenschaftlichen Anregungen und seine Unterstützung während meiner Zeit am Lehrstuhl. Insbesondere seine Expertise auf dem Gebiet der numerischen Simulation und die damit einhergehenden intensiven Diskussionen bei der Entwicklung neuer Modellierungskonzepte lieferten einen maßgeblichen Beitrag zum Gelingen dieser Arbeit.

Ich möchte mich ebenfalls bei allen Kolleginnen und Kollegen des Lehrstuhls für die tolle Zusammenarbeit und die außerordentlich ausgeprägte Kollegialität bedanken. Besonderer Dank gilt Herrn Christoph Pieper mit dem ich zusammen viele intensive Arbeitstage während meiner Zeit am Lehrstuhl verbracht habe. Er war mir stets eine große Unterstützung in fachlichen Fragestellungen sowie in persönlichen Gesprächen. Weiterhin danke ich meinem Bürokollegen Julian Jägers, der mich insbesondere in der Endphase meiner Dissertation stets motivieren konnte. Hervorheben möchte ich auch meine langjährigen Kollegen Herr Dr.-Ing. Frederik Bambauer und Herrn Dr.-Ing. Frank Wissing für die intensive und fruchtbare Zusammenarbeit.

Abschließend möchte ich meiner Familie, insbesondere meiner Mutter Frau Elke Buß dafür danken, dass sie mich bei allen beruflichen und privaten Vorhaben immer vollends unterstützt hat. Frau Karin Ewers danke ich darüber hinaus für die formale Korrektur der Arbeit.

Mein herzlichster Dank gilt meiner geliebten Ehefrau Sabrina Buß für ihren Rückhalt, ihre Geduld und besonders Ihrer aufopferungsvollen Hingabe im familiären Bereich während der zeitintensiven Bearbeitung meiner Dissertation. Ihr widme ich diese Arbeit.

Kurzfassung

Die Verwendung von minderwertigen, festen Biomassebrennstoffen in thermischen Konversionsanlagen bietet entscheidendes Potenzial zur Substitution fossiler Energieträger aus regenerativen Quellen. Dies ist allerdings nur möglich wenn die Verbrennung solcher minderwertigen Brennstoffe effizient und schadstoffarm geschieht. Die kontrollierte Schürung des Brennstoffes stellt hierfür eine zusätzliche Steuergröße zur gezielten Optimierung der Verbrennungsführung solcher Anlagen zur Verfügung, steigert somit die Flexibilität der Anlagen hinsichtlich des einsetzbaren Brennstoffes. In dieser Arbeit wird das Wissen um die komplexen Vorgänge in geschürten, reagierenden Brennbetten aus festen Biomassebrennstoffen erweitert. Dazu wurden zunächst experimentelle Untersuchungen an einem neuartigen Versuchsreaktor durchgeführt, der es ermöglicht, den Abbrandprozess einer kontrolliert bewegten Brennstoffschüttung zu untersuchen. Die Ergebnisse zeigen eine erhebliche Zunahme der Abbrandrate eines Brennbettes durch Aufprägen einer definierten Schürbewegung. Zudem konnte eine wesentlich gesteigerte Sensitivität der Abbrandrate auf die Objektgeometrie beobachtet werden, wenn das Brennbett in Bewegung versetzt wurde.

Ein vertieftes Verständnis um die schüttungsinternen Prozesse eines bewegten, reagierenden Brennbettes wird anschließend mit Hilfe gekoppelter DEM/CFD Simulationen vermittelt. Kerngedanke dieser Methodik ist die individuelle Auflösung der einzelnen Brennstoffobjekte einer Schüttung und ihrer Interaktion mit der umströmenden Gasphase.

In dieser Arbeit wird eine neu entwickelte DEM/CFD Kopplung vorgeschlagen, mit deren Hilfe die Vorgänge innerhalb einer bewegten, reagierenden und beliebig geformten Brennstoffschüttung auf bisher nicht verfügbarem Auflösungslevel abgebildet werden können. So ermöglicht dieser Ansatz erstmalig den Zugang zu statistischen Daten zur Verteilung der Konversionszustände, Temperaturniveaus und lokalen Stöchiometrie in einem reagierenden, bewegten Brennbett. Diese Informationen zeigen quantitativ, dass die Interaktionsmechanismen bei geschürter Verbrennung zu einer Homogenisierung des Abbrandprozesses führen. Während im Falle eines statischen Brennbettes die Phasen der thermochemischen Umwandlung simultan in übereinander angeordneten Schichten stattfinden, durchläuft die Schüttung als Ganzes sequentiell die Phasen der thermochemischen Konversion bei aktiver Schürung des Brennbettes.

INHALTSVERZEICHNIS

INHALTSVERZEICHNIS	I
NOMENKLATUR.....	III
1 Einleitung	1
1.1 Motivation und Zielsetzung	3
2 Stand des Wissens.....	5
2.1 Biomasse als Brennstoff.....	5
2.1.1 Eigenschaften fester Biomasse	5
2.1.2 Technische Verbrennung fester Biomasse.....	11
2.2 Stand der Forschung.....	14
2.2.1 Stufen der Biomassekonversion.....	15
2.2.2 Thermochemische Konversion fester Brennstoffe auf einem Rost	17
2.3 Abgrenzung der eigenen Arbeit	38
3 Experimentelle Untersuchungen	41
3.1 Anlagenbeschreibung.....	42
3.2 Brennstoffe	47
3.3 Versuche mit Modellpartikeln.....	49
3.3.1 Charakterisierung des mechanischen Verhaltens	49
3.3.2 Charakterisierung des Verbrennungsprozesses in der BORA	52
3.3.3 Einfluss der Primärluftmenge	57
3.3.4 Einfluss der Partikelgeometrie.....	62
3.4 Versuche mit Strohpellets	63
4 Modellierung des Abbrandes bewegter Schüttungen	67
4.1 Modellierung der Mechanik fester Brennstoffobjekte	68

4.1.1	Bewegungsgleichungen und Kraftmodelle	68
4.1.2	Approximation der Objektgeometrie	71
4.1.3	Nachbarschaftserkennung	73
4.1.4	Überprüfung des makroskopischen Bewegungsverhaltens.....	75
4.2	Interaktion zwischen Feststoff und Fluid	77
4.2.1	Dirichlet Randbedingungen via Quelltermlinearisation	81
4.2.2	Randbedingungen für die Impulserhaltung gasdurchströmter Schüttungen ..	83
4.2.3	Modellierung des konvektiven Wärme- und Stofftransports.....	100
4.3	Modellierung der Strahlungswärmeübertragung.....	105
4.3.1	Strahlungskopplung mittels Diskreter Ordinaten Methode	108
4.4	Modellierung der thermochemischen Prozesse	114
4.4.1	Thermochemie der Strohpellets	114
4.4.2	Thermochemie der Gasphase	123
5	Simulationsergebnisse	128
5.1	Definition der Berechnungsdomäne des BORA	128
5.2	Vergleich zwischen Simulation und Experiment	130
5.3	Wechselwirkungen bei geschürter Verbrennung	135
5.4	Abbrandcharakteristik statischer und bewegter Schüttungen	145
5.5	Anwendungsbeispiel	149
6	Zusammenfassung und Ausblick.....	155
6.1	Ausblick.....	157
	Literaturverzeichnis.....	159
	Anhang.....	177