

3D-Simulationsmodell
für bewegte Schüttgüter mit
unregelmäßig geformten Partikeln

zur Erlangung des akademischen Grades eines
DOKTORS DER INGENIEURWISSENSCHAFTEN (Dr.-Ing.)
der Fakultät für Maschinenbau
der Universität Paderborn

genehmigte
DISSERTATION

von
Tobias Wehry
aus Berlin

Tag des Kolloquiums: 2.10.2008

Referent: Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. M. H. Pahl

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. H.-J. Schmid

Schriftenreihe der Verfahrenstechnik Universität Paderborn

Band 33

Tobias Wehry

**3D-Simulationsmodell für bewegte Schüttgüter
mit unregelmäßig geformten Partikeln**

D 466 (Diss. Universität Paderborn)

Shaker Verlag
Aachen 2009

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.: Paderborn, Univ., Diss., 2008

Copyright Shaker Verlag 2009

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-7859-5

ISSN 1435-1137

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

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für mechanische Verfahrenstechnik und Umweltverfahrenstechnik der Universität Paderborn in den Jahren 2002 bis 2007.

Ich danke Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Manfred H. Pahl für die Betreuung dieser Arbeit und für die Möglichkeit, die Projekte, auf denen die Dissertation aufbaut, frei und eigenverantwortlich zu bearbeiten. Neben der Projektarbeit konnte ich in vielfältigen weiteren Aufgaben Einblicke in Forschung und Lehre der Universität gewinnen.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Hans-Joachim Schmid danke ich für die Übernahme des Korreferats und die spannende Zeit, in der ich mit ihm zusammen die Lehrstuhlausrichtung gestalten durfte.

Ebenso danke ich Herrn Prof. Dr. Stefan Luding und Herrn Dr.-Ing. Jörg Theuerkauf für die Unterstützung und lehrreiche Diskussion meiner Forschungsarbeit.

Ein Teil der benötigten Forschungsgelder wurde von ThyssenKrupp EnCoke, Bochum, später ThyssenKrupp Uhde, Dortmund, zur Verfügung gestellt. Durch diese Aufträge wurde das Forschungsvorhaben erst ermöglicht.

Veröffentlichung

WEHRY, T.; PAHL, M. H.: Beeinflussung des Fließverhaltens von scharfkantigem Schüttgut in Bunkern mit mehreren keilförmigen Auslässen. In: *Aufbereitungs Technik* 46 (2005) Nr. 10, S. 44-51

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen	XI
Zusammenfassung	1
1 Einführung und Aufgabenstellung	5
2 Koks und Koksherstellung	9
2.1 Kohle	9
2.2 Verkokungsprozess	10
2.3 Geometrie von Kokspartikeln	13
2.4 Kokskühlung	13
2.4.1 Nasslöschung	13
2.4.2 Trockenkühlung	14
2.5 Zu berechnende Anlage	18
2.6 Bewertung	19
3 Grundlagen der DEM-Simulation	21
3.1 Anwendung der DEM bei Schüttgutsimulationen	21
3.2 Partikelbewegungen und Kräfte	23
3.2.1 Diskrete Elemente Methode	23
3.2.2 Kräftebilanz an einem Partikelkontakt	25
3.2.3 Diskrete Elemente Methode in PFC	27

3.2.4	Kontaktmodelle	28
3.2.5	Mechanische Dämpfung	31
3.2.6	Partikel aus mehreren Kugeln	33
3.3	Gasströmung und Wärmeübertragung	34
3.4	Bewertung	36
4	Aufbau und Ablauf der Technikumsversuche	37
4.1	Versuchsstand	37
4.2	Charakterisierung des Versuchsmaterials	41
4.3	Schichtung im Modell	43
4.4	Abzugsprofile	44
4.5	Messtechnik	45
4.6	Versuchsdurchführung	46
4.6.1	Fließversuch nach Abzugsprofil	46
4.6.2	Untersuchung der Schichtung im Inneren	46
4.6.3	Aufbereitung der Daten zur Auswertung	47
4.7	Versuchsplanung	47
5	Ergebnisse der experimentellen Untersuchung	49
5.1	Schüttgutfluss im Technikumsmodell mit Abzugsprofil A	49
5.2	Auswertung der Schnittbilder	52
5.3	Fließzonen	56
5.4	Bewertung im Hinblick auf Simulationen	57
6	Programmierung der Schüttgutsimulation	59
6.1	Modellierung der Versuchsanlage und des Versuchsmaterials	59
6.1.1	Geometrie der Versuchsanlage	59
6.1.2	Partikel	62
6.2	Programm-Aufbau	66
6.2.1	Füllen	68
6.2.2	Abwurfprogrammierung	69

6.2.3	Abzugspläne	71
6.3	Messdatenaufnahme	71
6.3.1	Bilder der Simulation	71
6.3.2	Abwurfmassen	72
6.3.3	Partikelspuren	72
6.3.4	Druck auf Seitenwand	74
6.3.5	Porosität	74
6.3.6	Partikelgeschwindigkeiten	76
6.4	Durchführung der Simulationsversuche	78
6.5	Versuchsplan der Simulationsversuche	78
7	Ergebnisse und Vergleich	81
7.1	Böschungswinkel	81
7.2	Abwurfmassen	82
7.3	Fließzonen	85
7.4	Zeitliche Veränderung der Deckschicht	86
7.5	Partikelspuren und Isochronen	87
7.6	Porosität und Partikelgeschwindigkeit	93
7.7	Druck auf die Seitenwand	96
8	Durchströmung und Wärmeaustausch	99
8.1	Schüttguttransport	99
8.2	Wärmeaustausch	101
9	Technische Folgerungen	103
	Literaturverzeichnis	107

Formelzeichen

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
B	m	Breite
E	N/mm^2	E-Modul
F	N	Kraft
H	m	Höhe
K	N/m	Gesamtsteifigkeit
M	Nm	Moment
T, t	s	Zeit
T	m	Tiefe
a	m/s^2	Beschleunigung
c	kg/s	Dämpfungskonstante
ffc	–	Fließfaktor
k	N/m	Federkonstante
m	kg	Masse
n_i	–	Normalenvektor
n	–	Anzahl
p	N/m^2	Druck
$u, \Delta u$	m	Distanz
w	m/s	Geschwindigkeit
\dot{w}	m/s^2	Beschleunigung
x	m	Partikelgröße

x	—	Koordinate
y	—	Koordinate
z	—	Koordinate
α, β	—	Dämpfungsparameter
ε	—	Porosität
φ	°	Reibungswinkel
μ	—	Reibwert
ρ	kg/m^3	Dichte
ω	s^{-1}	Frequenz

Indizes

D	Dämpfung; Dreh-
E	Edelstahl
G	Glas
S	Schamott
e	effektiv
f	Feststoff
i	Variable (im Text erklärt)
j	Zählvariable
$krit$	kritisch
max	maximal
n	Normalrichtung
p	Partikel
rot	Rotation
s	Scherrichtung
$tran$	translatorisch
x, y, z	Koordinatenrichtungen
w, q	Siebmaschenweite

Exponenten

1, 2, 3

Kontaktbezeichnungen

A, B

Partikelbezeichnungen

K

Klumpen, Agglomerat

P

Partikel