

Vibrationsmischen von Schüttgütern
bei stochastischer Anregung des Behälters

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

genehmigte
DISSERTATION

von
Dipl.-Ing. Yong-Soo Ko
aus Incheon / Südkorea

Tag des Kolloquiums: 24. Mai 2005
Referent: Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Manfred H. Pahl
Korreferent: Prof. Dr. techn. Peter Walzel

Schriftenreihe der Verfahrenstechnik Universität Paderborn

Band 29

Yong-Soo Ko

**Vibrationsmischen von Schüttgütern bei
stochastischer Anregung des Behälters**

D 466 (Diss. Universität Paderborn)

Shaker Verlag
Aachen 2005

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.

Zugl.: Paderborn, Univ., Diss., 2005

Copyright Shaker Verlag 2005

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

Printed in Germany.

ISBN 3-8322-4096-9

ISSN 1435-1137

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

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

Internet: www.shaker.de • eMail: info@shaker.de

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Angestellter im Lehrstuhl für Mechanische Verfahrenstechnik und Umweltverfahrenstechnik an der Universität Paderborn.

Dem Leiter des Lehrstuhls Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Manfred H. Pahl, möchte ich an dieser Stelle für die Überlassung und Betreuung des Forschungsthemas besonders danken. Seine umfangreichen Anregungen, Hinweise und Erfahrungen waren eine wertvolle Stütze dieser Arbeit.

Herrn Prof. Dr. techn. Peter Walzel vom Lehrstuhl für Mechanische Verfahrenstechnik der Universität Dortmund danke ich für die freundliche Übernahme des Korreferates sowie den Herrn Prof. Dr.-Ing. Hans Albert Richard und Prof. Dr.-Ing. Roland Span für die Mitwirkung in der Prüfungskommission.

Ich danke Herrn Dr.-Ing. Andreas Flekler für seine Unterstützung und Diskussionsbereitschaft.

Mein Dank gilt allen Kolleginnen und Kollegen des Lehrstuhls für Mechanische Verfahrenstechnik und Umweltverfahrenstechnik für die angenehme Arbeitsatmosphäre. Stellvertretend für alle anderen danke ich Frau Ulrike Finger aus dem Sekretariat für die verwaltungstechnische Unterstützung, den Herren Norbert Krause und Norbert Temborius aus der Werkstatt für die konstruktive Hilfe.

Der Wissenschaftsförderung der Deutschen Forschungsgemeinschaft danke ich für die finanzielle Unterstützung der Arbeit.

Weiterhin bedanke ich mich bei Frau Erika Derwanz für die freundliche Aufnahme während meines Aufenthaltes in Paderborn.

Bei meinen Eltern möchte ich mich herzlich bedanken, die mich verständnisvoll unterstützt und somit die Voraussetzung für diese Arbeit geschaffen haben.

Besonders bedanke ich mich bei meiner Frau Mieun für ihre große Unterstützung und ihre Beharrlichkeit in den verschiedenen Phasen der vergangenen Jahre.

Paderborn, im Mai 2005

Yong-Soo Ko

For my wife Mieun

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen

Zusammenfassung.....	1
1 Ausgangspunkt und Aufgabenstellung.....	3
2 Stand des Wissens.....	6
2.1 Definition des Mischens.....	6
2.2 Feststoffmischen und -mischsysteme.....	6
2.3 Vibrationsmischer.....	8
2.4 Strömungsphänomene von Schüttgütern bei Vibrationsanregung.....	11
2.4.1 Froude-Zahl.....	12
2.4.2 Fluidisierung und Konvektion.....	12
2.4.3 Feststoffmischen und Segregation.....	15
2.4.4 Bewertung.....	21
3 Mehrdimensionale Schwingungen.....	23
3.1 3D-Schwingung mit Lissajous-Figuren.....	23
3.2 Periodizität der Schwingungen.....	25
3.3 Mathematische Beschreibung der Überlagerung der Schwingungen.....	27
3.3.1 Summenschwingung bei gleicher Winkelgeschwindigkeit ω	27
3.3.2 Summenschwingung bei verschiedener Winkelgeschwindigkeit.....	29
3.4 Schwebungen.....	32
3.4.1 Schwebung aus 2D-Überlagerung.....	32
3.4.2 Schwebungsphänomene bei 3D-Schwingungen.....	34
3.5 Stochastische Modulationsschwingung.....	34
3.6 Schwingkurven der 3D-Vibrationsanregung.....	38
3.6.1 Deterministische konstante 3D-Anregung.....	38
3.6.2 Erzeugung eines „pulsierenden Wirbelbettes“.....	43
3.6.3 Stochastische 3D-Anregung.....	43
4 Federsteifigkeit und Resonanzfrequenz.....	47
4.1 Federwirkung der biegebeanspruchten Blattfeder.....	47
4.2 Berechnung der Federkonstanten im 3D-Vibrationsmischer.....	49
4.2.1 Aufbau der Schwingmechanik.....	49
4.2.2 Federkonstante der verstellbaren Blattfedern.....	51
4.2.3 Federkonstante der inneren Blattfedern.....	52
4.3 Resonanzfrequenz in 3 Achsen.....	54
5 Statistische Betrachtung zur Qualität einer Mischung.....	61
5.1 Mischgütemaß.....	61
5.2 Mischzustände.....	67
5.3 Einfluß der Probengröße auf die Varianz.....	69
5.4 Bestmöglicher Mischungszustand.....	70
5.5 Qualitätsforderung des Konsumenten.....	72
5.6 Zeitlicher Mischgüteverlauf.....	78
6 Versuchsstand und Versuchsmaterial.....	81

6.1	Entwurf eines neuen 3D-Vibrationsmischers	81
6.2	Aufbau des Schwingensystems	85
6.3	Schwingverhalten des 3D-Vibrationsmischers.....	88
6.4	Zufallsgenerator.....	89
6.4.1	Pseudo-Random Number Generator	89
6.4.2	Verteilung der Zufallszahlen	90
6.5	Einstellung des 3D-Vibrationsmischers	92
6.6	Schwingungsmessung	93
6.7	Vergleichsmischer	95
6.7.1	Biaxialmischer	95
6.7.2	Taumelmischer	97
6.8	Versuchsmaterial	98
6.9	Probenahme und Probenaufbereitung	101
6.9.1	Entwurf eines Probenehmers	102
6.9.2	Probenehmer mit zylindrischen Küvetten.....	108
6.10	Reproduzierbarkeit der Ergebnisse	110
6.11	Versuchsplanung.....	111
7	Bewegungsvorgänge des Mischbehälters bei 3D-Anregung	114
7.1	Einführung in die Schwingcharakteristik	114
7.2	Einheitlichkeit der Schwingbahnen.....	114
7.2.1	Schwingverhalten des kleinen 3D-Vibrationsmischers.....	114
7.2.2	Schwingverhalten des großen 3D-Vibrationsmischers	119
7.3	Schwingformen des Schüttgutes bei 3D-Vibrationsanregung.....	129
7.3.1	Schwingformen für die Mischgutmasse $M_M=5\text{kg}$	129
7.3.2	Schwingformen für die Mischgutmasse $M_M=10\text{kg}$	141
7.4	Bewertung	150
8	Strömungsvorgänge beim 3D-Vibrationsmischen	152
8.1	Einleitung	152
8.2	Fließphänomene bei feinen Schüttgütern	153
8.3	Mischbewegung im groben Schüttgut.....	157
8.3.1	Deterministische 3D-Anregung mit einer niedrigen Füllung	157
8.3.2	Stochastische 3D-Anregung mit einer niedrigen Füllung	158
8.3.3	Deterministische 3D-Anregung mit einer höheren Füllung.....	159
8.3.4	Stochastische 3D-Anregung mit einer höheren Füllung	161
8.4	Mischbewegung im feinen Schüttgut	162
8.4.1	Deterministische 3D-Anregung mit einer niedrigen Füllung	162
8.4.2	Stochastische 3D-Anregung mit einer niedrigen Füllung	164
8.4.3	Deterministische 3D-Anregung mit einer höheren Füllung.....	165
8.4.4	Stochastische 3D-Anregung mit einer höheren Füllung	167
8.5	Bewertung	168
9	Mischgüte-Untersuchungen.....	169
9.1	Mischgüteverlauf bei einer Mischgutmasse von 2,7kg	169
9.1.1	Mischgüte von PE/PE-Granulat	169
9.1.2	Mischgüte von PS-Granulat/Kalkstein.....	173
9.2	Mischgüteverlauf bei einer Mischgutmasse von 5kg	176

9.2.1	Mischgüte von PE/PE-Granulat	176
9.2.2	Mischgüte von PS-Granulat/Kalkstein.....	178
9.3	Mischgüterverlauf bei einer Mischgutmasse von 7,5kg	181
9.3.1	Mischversuche mit PS-Granulat/Kalkstein	182
9.4	Mischgüterverlauf bei einer Mischgutmasse von 10kg	185
9.4.1	Mischversuche mit PS-Granulat/Kalkstein	185
9.5	Vergleich der Mischsysteme	188
10	Technische Folgerungen und Ausblick.....	194
11	Literatur	196
12	Anhang.....	205