

**Untersuchungen zur Verknüpfung von Verweilzeit-Verteilung und
Mischgüte in einem kontinuierlichen Pflugscharmischer**

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

genehmigte
DISSERTATION

von
Dipl.-Ing. Ralf Habermann
aus Hannover

Tag des Kolloquiums: 04. Februar 2005

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

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Karl Sommer

Schriftenreihe der Verfahrenstechnik Universität Paderborn

Band 30

Ralf Habermann

**Untersuchungen zur Verknüpfung von
Verweilzeit-Verteilung und Mischgüte in einem
kontinuierlichen Pflugscharmischer**

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 3-8322-4332-1

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 Mitarbeiter am Lehrstuhl für Mechanische Verfahrenstechnik und Umweltverfahrenstechnik der Universität Paderborn.

Besonderen Dank bin ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. M.H. Pahl verpflichtet für die Übertragung des Forschungsthemas, die zahlreichen Anregungen sowie die intensiven Diskussionen der Sachverhalte. Das mir entgegengebrachte Vertrauen und die Freiheiten zur wissenschaftlichen Entfaltung haben maßgeblich zum Gelingen der Arbeit beigetragen.

Herrn Prof. Dr.-Ing K. Sommer danke ich für die freundliche Übernahme des Korreferates.

Der Deutschen Forschungsgemeinschaft, Bonn, danke ich für die finanzielle Unterstützung und Förderung des Projektes.

Das Forschungsprojekt wurde in enger Kooperation mit der Gebrüder Lödige Maschinenbau GmbH, Paderborn, durchgeführt. Dabei ist vor allem das große Interesse sowie die wohlwollende Unterstützung durch Herrn Dipl.-Ing. M. Schwarz hervorzuheben. Ebenso danke ich der Geschäftsführung und dem Mitarbeiterstab des Technikums für die große Hilfsbereitschaft.

Des weiteren gebührt mein Dank dem Sekretariat des Lehrstuhls in Person von U. Finger, den Mitarbeitern der Werkstatt sowie allen Kollegen, meiner Kollegin und wissenschaftlichen Hilfskräften des Lehrstuhls für Mechanische Verfahrenstechnik und Umweltverfahrenstechnik der Universität Paderborn für die einmalige, unvergeßliche Atmosphäre, die erfahrene Unterstützung und die gute Zusammenarbeit.

Ein großes Lob muss ich auch meiner langjährigen wissenschaftlichen Hilfskraft, Herrn A. Grewing, aussprechen, der meine Ideen stets kreativ umgesetzt hat. Ich bedanke mich auch bei allen Studien- und Diplomarbeitern für die geleistete Arbeit.

Abschließend danke ich meinen Eltern dafür, dass sie mir durch die zuteilgewordene Ausbildung sowie die finanzielle und ideelle Unterstützung die Basis zur Bewältigung der Arbeit bereitgestellt haben.

Gelnhausen, im Juli 2005

Ralf Habermann

Meinen Eltern.

Veröffentlichungen

- Habermann, R.; Pahl, M.H. Mischgüte- und Verweilzeit-Analysen an einem kontinuierlichen Pflugscharmischer.
VDI-GVC-Fachausschuss-Sitzung „Mischvorgänge“, Hameln, 1999.
- Habermann, R.; Pahl, M.H. Verknüpfung von Verweilzeit-Verteilung und Mischgüte in einem kontinuierlichen Pflugscharmischer.
VDI-GVC-Fachausschuss-Sitzung „Agglomerations- und Schüttguttechnik“, Freiburg, 2001.
- Habermann, R.; Pahl, M.H. Modellansätze für Verweilzeit-Analysen an kontinuierlichen Feststoffmischern.
Schüttgut 7 (2001) 2, S. 297 - 304
- Habermann, R. Kontinuierliches Feststoffmischen.
Tagungsband zum 1. Deutsch-Koreanischen Symposium „Umweltverfahrenstechnik und Schüttguttechnik“.
Samchok National University, Südkorea, 2001
- Habermann, R. Kontinuierliches Mischen.
Seminarband „Feststoffmischer“
Technische Akademie Wuppertal e.V., 2004
- Habermann, R.; Pahl, M.H. Untersuchungen zur Verknüpfung von Verweilzeit-Verteilung und Mischgüte in einem kontinuierlichen Pflugscharmischer.
VDI-GVC-Fachausschuss-Sitzung „Mischvorgänge“, Paderborn, 2005.

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen

Zusammenfassung 1

1 Einleitung und Aufgabenstellung 4

2 Stand des Wissens..... 6

- 2.1 Feststoffmischen 6
 - 2.1.1 Bauformen von Feststoffmischern 6
 - 2.1.2 Mischprinzipien und Mischaufgaben 8
- 2.2 Kontinuierliches Feststoffmischen 13
 - 2.2.1 Schwerkraftmischer und statische Mischer 14
 - 2.2.2 Drehrohr und Trommelmischer 17
 - 2.2.3 Wendelband-Mischer 22
 - 2.2.4 Schaufelmischer und Paddelmischer 47
 - 2.2.5 Bewertung 65

3 Theorie der Verweilzeit und der Mischgüte 68

- 3.1 Modellierung des Verweilzeitverhaltens 68
 - 3.1.1 Modelle des idealen Verweilzeitverhaltens 68
 - 3.1.2 Modelle des realen Verweilzeitverhaltens 72
- 3.2 Charakterisierung von Mischungen 98
 - 3.2.1 Produkteigenschaft 99
 - 3.2.2 Mischgüte-Maße 100
 - 3.2.3 Probenanzahl 101
 - 3.2.4 Probengröße 104
 - 3.2.5 Mischtechnisch bestmöglicher Mischzustand 104
 - 3.2.6 Geforderte Mischgüte 105
 - 3.2.7 Genauigkeit der Analysen-Messmethode 106
 - 3.2.8 Konsumenten/Produzenten-Risiko 107
 - 3.2.9 Darstellung und Interpretation der Ergebnisse 109
- 3.3 Kopplung von Verweilzeit-Verteilung und Mischgüte 111
 - 3.3.1 Materialtransport und Mischgüte
beim diskontinuierlichen Feststoffmischen 111
 - 3.3.2 Ansatz von Dankwerts 116
 - 3.3.3 Analogieansatz zur chemischen Reaktionstechnik 118
- 3.4 Dämpfung von Dosierschwankungen 119

4 Versuchsstand und Versuchsmaterial 121

- 4.1 Kontinuierliche Mischversuchsanlage 121
- 4.2 Dosieranlage 122
 - 4.2.1 Nachweis der Normalverteiltheit der Messwerte 124
 - 4.2.2 Überprüfung der Dosiergenauigkeit 126

4.3	Mischapparatur	128
4.4	Konzentrationsmessung mittels Reflexionsspektroskopie	134
4.4.1	Theoretische Grundlagen der Reflexionsspektroskopie	135
4.4.2	CCD-Kamera	137
4.4.3	Beleuchtung	138
4.4.4	Verweilzeit-Messapparatur	142
4.4.5	Kalibrierung	144
4.5	Mischgüte-Analytik	146
4.5.1	Probenahme beim kontinuierlichen Feststoffmischen	146
4.5.2	Siebanalyse	149
4.5.3	Sinusförmige Dosierprofile	153
4.6	Versuchsmaterial	155
4.6.1	Versuchsmaterial für die Verweilzeit-Analysen	155
4.6.2	Versuchsmaterial für Mischgüte-Analysen und Dämpfungsversuche	158
4.7	Versuchsplanung und -durchführung	160
5	Simultane Verweilzeit- und Mischgüte-Analysen	163
5.1	Verweilzeit-Analysen	164
5.1.1	Einfluss des Stoffsystems	164
5.1.2	Einfluss der Werkzeug-Froude-Zahl	172
5.1.3	Einfluss des Dosier-Massenstrom	185
5.1.4	Einfluss des Füllgrads	193
5.1.5	Modellierung des Verweilzeit-Verhaltens	204
5.2	Mischgüte-Untersuchungen	212
5.2.1	Einfluss des Dosier-Massenstrom	212
5.2.2	Einfluss der Werkzeug-Froude-Zahl	219
5.2.3	Einfluss des Füllgrads	224
5.2.4	Vergleich mit anderen Mischsystemen	234
5.3	Kopplung von Verweilzeit-Verteilung und Mischgüte	241
5.3.1	Ansatz nach Danckwerts	247
5.3.2	Analogieansatz zur chemischen Reaktionstechnik	251
6	Dämpfung sinusförmiger Dosierschwankungen	255
6.1	Varianzreduktion	255
6.2	Vergleich der Mischgüte bei gravimetrischer und volumetrischer Komponenten-Dosierung	268
7	Technische Folgerungen und Ausblick	273
8	Literaturverzeichnis	275
	Anhang	283

Formelzeichen

a	[-]	Koeffizient
a	[m]	Abstand
a	[m/s ²]	Beschleunigung
A	[-]	Parameter der Approximationsfunktion
A	[-]	Parameter der Weibull-Verteilung
A	[m]	Achismaß
A	[m ²]	Querschnittsfläche
B	[-]	Parameter der Weibull-Verteilung
B	[m]	Breite
c	[-]	Konzentration
C	[-]	dimensionslose Konzentration
d	[-]	Dämpfung
d	[m]	Schichtdicke
D	[m]	Durchmesser
D	[-]	normierter Dispersionskoeffizient
D	[m ² /s]	Dispersionskoeffizient
D*	[m ² /s]	Diffusionskoeffizient
E	[-]	Produkteigenschaft
E	[-]	Erwartungswert
E	[Lux]	Beleuchtungsstärke
f	[-]	relativer Fehler
f	[Hz]	Frequenz
ffc	[-]	Fließfunktion
F	[-]	Funktion
F	[N]	Kraft
g	[m/s ²]	Gravitationsbeschleunigung
G	[-]	Übertragungsfunktion im Frequenzbereich
GW	[-]	Grauwert
h	[-]	Heterogenitätsfunktion
h ²	[-]	Hilfsgröße
H	[-]	Summenhäufigkeit
H	[m]	Höhe
i	[-]	Injizierfunktion
I	[-]	Strahlungsfluß in x-Richtung
İ	[-]	Einheitsmatrix
J	[-]	Bessel-Funktion
J	[-]	Strahlungsfluß entgegen x-Richtung
k	[-]	Probenzahl

k	[1/s]	Geschwindigkeitskonstante
K	[-]	Absorptionskoeffizient
K	[-]	Parameter der Verteilungsfunktion
K	[-]	Rührkessel-Äquivalent
l_0	[-]	linear scale of segregation
L	[m]	Länge
m	[-]	Freiheitsgrad, Digitalisierung
m_{GW}	[-]	mittlerer Grauwert
M	[kg]	Masse
$\dot{M}$	[kg/h]	Dosier-Massenstrom
n	[-]	Freiheitsgrad, Parameter
n	[1/s]	Drehfrequenz
N	[-]	Anzahl der Einheiten
p	[-]	Soll-Konzentration der Komponente x
p	[-]	Verweilzeit-Dichteverteilung
p	[Pa]	Druck
p	[kW/m ³]	spezifische Leistung
P	[-]	Verweilzeit-Summenverteilung
P	[-]	Übertragungsfunktion des linearen, zeitinvarianten Systems
P	[kW]	Leistung
$\bar{P}$	[-]	Matrix der Durchgangs-Wahrscheinlichkeiten
q	[-]	dimensionslose Konzentration
q	[-]	Soll-Konzentration der Komponente y
Q	[-]	Partikelgrößen-Summenverteilung
r	[-]	Korrelationskoeffizient
r	[s]	Zeitverschiebung
R	[-]	Autokorrelationsfunktion
R	[-]	Reflexionsvermögen
R	[m]	Behälter-Radius
s	[-]	empirische Standardabweichung
s^2	[-]	empirische Varianz
s	[-]	komplexe Variable im Frequenzbereich
$s_{1,2}$	[-]	Pole der Übertragungsfunktion
s	[-]	Position
s	[-]	Aufenthalts-Wahrscheinlichkeit je Zelle
$\bar{s}$	[-]	Zustandsvektor
S	[-]	Sicherheit
S	[-]	Streukoeffizient
t	[-]	Parameter der Approximationsfunktion

t	[-]	Student-Faktor
t	[s]	Zeit
T	[K]	absolute Temperatur
T	[m/s]	Transportkoeffizient
T	[s]	Periodendauer der Dosierschwankung
u	[-]	normierter Transportkoeffizient
$\bar{u}$	[m/s]	mittlere Konvektionsgeschwindigkeit
u^*	[m/s]	Transportkoeffizient
U	[-]	Umsatzgrad
U	[V]	Spannung
v	[-]	Variogrammfunktion
V	[-]	Variationskoeffizient
V	[m ³]	Volumen
$\dot{V}$	[m ³ /h]	Volumenstrom
VRR	[-]	Varianzreduktion
w	[m/s]	Geschwindigkeit
x	[-]	Variable
$\bar{x}$	[μ m]	mittlere Partikelgröße
z	[m]	axiale Koordinate
Z	[-]	dimensionslose axiale Koordinate

Griechische Symbole

α	[-]	Ablöswinkel, Anstellwinkel
α	[-]	Wurzel der transzendenten Gleichungen
α	[-]	Produzenten-Risiko
β	[-]	Wahrscheinlichkeit einer richtigen Konsumenten-Entscheidung
γ	[-]	Schiefte, Effektivität
Γ_{xx}	[s]	Leistungsdichtespektrum
δ	[-]	Fluktuation
δ	[-]	Dämpfung
δ	[-]	Stoßfunktion
ε	[s]	Zeitkonstante
ζ^*	[s]	Zeitvariable
Θ	[-]	dimensionslose Zeit
κ	[-]	Exzeß
λ	[-]	Faktor
λ	[nm]	Wellenlänge
λ	[-]	dimensionslose axiale Koordinate

μ	[-]	Mittelwert
ξ	[-]	Betriebs- oder Maschinengröße
ρ	[-]	dimensionsloser Radius
ρ	[kg/m ³]	Dichte
ρ_{xx}	[s]	Autokorrelationsfunktion
σ	[-]	wahre Standardabweichung
σ^2	[-]	wahre Varianz
τ	[s]	Zeitvariable
τ	[s]	theoretische Zeit
τ	[-]	dimensionslose Zeit
φ	[-]	Füllgrad
φ^*	[-]	Füllgrad der Zelle
Φ_{xx}	[s]	Autokovarianzfunktion
χ	[-]	Parameter der Chi-Quadrat-Verteilung
ω	[1/s]	Kreisfrequenz
ω_0	[1/s]	Eigenfrequenz
Ω	[-]	Parameter
ψ	[-]	Permutationsoperator

Indizes

A	Ausgang
ax	axial
alt	alter Wert
Anf	Beginn der Tracerzugabe
Appr	Approximation
Aus	Austritt
B	Bulk
Batch	Batch-Reaktor/ -Mischer
Beh	Behälter
c	kritisch
CaCO ₃	Calciumcarbonat
D	Dosierer
D	Dispersion
dif	gemessen mit Laserbeugungsspektrometer
E	Eingang
Ein	Eintritt
erf	erforderlich

End	Endzustand
EPS	expandierbares Polystyrol-Granulat
F	Forderung
F	Farbe
G	Gravitationsfeld
H	Homogenisierung
i	innen
i	Zählindex
I	Injektion
Inj	Injizierfunktion
Inj	Injektor
IRK	idealer Rührkessel
ISR	ideales Strömungsrohr
Ist	Istwert
j	Zählindex
kontin	kontinuierlich
K	Konvektion
L	Menge
max	maximal
min	minimal
M	Mischung
M	Masse
MS	Maisstärke
Mess	Meßverfahren
n	Zählindex
neu	neuer Wert
o	oben
O	Obergrenze
P	Partikel
P	Periodendauer
r	radial
rel	relativ
Rand	Randbedingung
RKK	Rührkesselkaskade
S	Segregation
S	Solid, Feststoff
Soll	Sollwert
Syst	System
theor	theoretisch

T	Totzeit
T	Trommel, Tracer
T	Konvektion
u	unten
V	mittlere Verweilzeit
V	Volumen
W	Werkzeug
W	Wehr
x	mischtechnisch kritische Komponente
y	zusammengefaßte Restkomponenten
Z	Zentrifugalkraftfeld
Z	homogene Zufallsmischung
λ	diffus
χ	Chi-Quadrat-Verteilung
0	Eintritt oder Anfang
1, 2	Komponente 1 bzw. 2
50	Medianwert

Kennzahlen

$$Fr = \frac{F_Z}{F_G} = \frac{a_Z}{g} \quad \text{Froude-Zahl}$$

$$Fr_P = \frac{\omega_P^2 \cdot R_P}{g} \quad \text{Partikel-Froude-Zahl}$$

$$Fr_W = \frac{\omega_W^2 \cdot R_W}{g} \quad \text{Werkzeug-Froude-Zahl}$$

$$Fr_{Beh} = \frac{\omega_{Beh}^2 \cdot R_{Beh}}{g} \quad \text{Behälter-Froude-Zahl}$$

$$Bo = \frac{\bar{u} \cdot L}{D_{ax}} \quad \text{Bodenstein-Zahl}$$