

# Inhaltverzeichnis

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 $\omega$	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 Kitzetten .....	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	Mischgüteverlauf bei einer Mischgutmasse von 7,5kg .....	181
9.3.1	Mischversuche mit PS-Granulat/Kalkstein.....	182
9.4	Mischgüteverlauf 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