

Inhaltsverzeichnis

Symbolverzeichnis	IV
1 Einleitung und Zielstellung	1
1.1 Einleitung	1
1.2 Zielstellung.....	3
2 Anwendung mechanischer Schwingungen bei der Siloentleerung	6
2.1 Abgrenzung und Definition	6
2.2 Schwingende Austraghilfen	8
2.2.1 Außenvibratoren.....	8
2.2.2 Schwingtrichter	10
2.2.3 Schwingende Einbauten	12
2.3 Zur Auswahl und verfahrenstechnischen Dimensionierung	13
2.3.1 Allgemeine Kriterien zur Auslegung von Schwingtrichtern.....	16
2.3.2 Betriebsweise von Schwingtrichtern.....	16
2.3.3 Antrieb von Schwingtrichtern	17
2.3.4 Schwingungsintensität der Schwingtrichter	18
2.3.5 Anschlussmaße von Schwingtrichtern	19
3 Fließverhalten von Schüttgütern	21
3.1 Partikelmechanische Betrachtung von Schüttgütern.....	21
3.2 Kontinuumsmechanische Betrachtung von Schüttgütern	25
3.2.1 Das Kontinuum „Schüttgut“	26
3.2.2 Kräfte und Spannungen.....	27
3.2.3 Deformation und Deformationsgeschwindigkeit.....	31
3.2.4 Hauptmerkmale des Materialverhaltens von Schüttgütern	33
3.2.5 Phänomenologische Fließkriterien.....	34
3.3 Physikalische Betrachtung des reibungsbehafteten Fließens kohäsiver Schüttgüter ..	38
3.3.1 Fließbedingungen für beginnendes und stationäres Fließen	39
3.3.2 Verfestigungsfunktionen und Fließfunktion	42
3.3.3 Kompressionsverhalten kohäsiver Schüttgüter.....	42
4 Siloauslegung und Dimensionierung	45
4.1 Spannungen in Silos.....	45
4.2 Fließprofile und Fließstörungen in Silos.....	50
4.3 Minimale Austragweite und maximaler Trichterneigungswinkel.....	53
4.3.1 Fließfaktor ff	54
4.3.2 Maximaler Trichterneigungswinkel für Massenfluss.....	58
4.3.3 Minimale Austragweite zur Vermeidung von Brückenbildung.....	60

4.4	Modelle zur Beschreibung des Austragmassenstroms	65
4.4.1	Phänomenologische Einflüsse auf den Massenstrom beim Schüttgutaustrag aus einem Silotrichter	65
4.4.2	Phänomenologische Massenstromkorrelationen	69
4.4.3	Massenstrom eines kohäsiven Schüttguts	70
4.4.4	Frei fallende Schüttgutbrücke und Minimierung der Gesamtenergie	71
4.4.5	Sanduhrmodell	72
4.4.6	Wandreibungsbefahrter Trichter	72
4.4.7	Steuerung des Austragmassenstroms durch die Fluidströmung	73
4.4.8	Austragmassenstrom unter Berücksichtigung der Fluidgegenströmung für kohäsionslose Schüttgüter	73
4.4.9	Austragmassenstrom kohäsiver Pulver unter Fluidgegenströmung	75
4.4.10	Diskussion und Bewertung der Modelle des Austragmassenstroms	78
5	Fließverhalten kohäsiver Schüttgüter unter mechanischen Schwingungen	79
5.1	Harmonische Schwingungen	79
5.2	Fließkriterium für das schwingungsinduzierte Fließen von Schüttgütern	81
5.3	Trichterdrücke und Fließen unter Wirkung dynamischer Kräfte	83
6	Versuchsaufbau und verwendete Materialien	88
6.1	Silo-Versuche im technischen bzw. Pilot-Maßstab	88
6.1.1	WAM Vibrationsaustrageboden	95
6.1.2	SCHÄFFER-Schwingauslauf®	96
6.2	Scherversuche	98
6.3	Stampfdichtemessungen	104
6.4	Calcit Kalksteinmehle	104
6.5	Fließverhalten der Calcit Kalksteinpulver	108
6.6	Kompressionsverhalten	110
6.7	Kritische Trichterabmessungen	112
6.8	Auswahl des Calcit MX10 für die Technikum-Siloversuche	112
7	Ergebnisse aus den Silo-Versuchen	114
7.1	Frequenzspektren der Schwingungen während des Betriebs der Schwingtrichter ..	114
7.2	Frequenz und Schwingbeschleunigung der Schwingungen während des stationären Betriebs der Schwingtrichter	120
7.3	Schüttgutaustrag unter Schwingungseinwirkung	122
7.3.1	Beobachtungen und Schlussfolgerungen aus den Messungen des Austragmassenstroms zu den kritischen Trichterabmessungen	122
7.3.2	Einfluss der Betriebsweise der Schwingtrichter auf den Austragmassenstrom	130
7.3.3	Einfluss der Schwingtrichtergestaltung auf den Schüttgutaustrag	134
8	Schwingungsübertragung im Schüttgut Kontinuum	139

8.1	Modellvorstellungen zur Schwingungsübertragung in Schüttgütern.....	139
8.2	Erkenntnisse zur Schwingungsausbreitung in Silos mit Schwingtrichtern im Pilot-Maßstab	145
9	Beschreibung des Schwerkraftflusses kohäsiver Schüttgüter unter Schwingungseinwirkung.....	150
9.1	Fließverhalten unter Schwingungseinwirkung.....	150
9.2	Randbedingungen für die Beschreibung des Schwerkraftflusses unter Schwingungseinwirkung.....	155
9.3	Kritische Trichterabmessungen unter Schwingungseinwirkung.....	157
9.4	Modellierung des Austragmassenstroms aus Schwingtrichtern.....	158
9.4.1	Berechnung der Austraggeschwindigkeit kohäsiver Schüttgüter aus Schwingtrichtern	158
9.4.2	Kohäsiver Widerstand und Durchströmungswiderstand.....	161
9.4.3	Berechnung des Druckgradienten beim Schüttgutaustrag	167
9.5	Gegenüberstellung des Modells nach Tomas mit dem weiterentwickelten Modell	171
9.6	Zeitintervalle für den Puls-Pause-Betrieb von Schwingtrichter.....	172
9.6.1	Berechnung des Trichterfüllgrads	174
9.6.2	Berechnung der Intervallzeiten für den Puls-Pause-Betrieb	177
9.7	Gegenüberstellung von Modell- und Messdaten zum Austragmassenstrom	179
9.8	Nachlaufmassenstrom und Brückenbildungswahrscheinlichkeit.....	187
10	Konsequenzen für die Schwingtrichter-Auslegung	193
11	Zusammenfassung.....	197
12	Literaturverzeichnis	200
13	Anhang	207
13.1	Abschätzung der eingetragenen Schwingarbeit	207
13.2	Auslegungsdiagramme für Silos	208
13.3	Versuchsaufbau für Technikum-Siloversuche	210
13.4	Silo-Versuche	212
13.5	Modellparameter zur Beschreibung des Fließverhaltens und der Schüttgutdichte..	217
13.6	Modellrechnungen Siloaustrag	218
13.7	Schwinggeschwindigkeiten und Unwucht	221