

# **Modellierung und experimentelle Validierung des Schwerkraftaustrags ultrafeiner kohäsiver Pulver**

## **Dissertation**

zur Erlangung des akademischen Grades

## **Doktoringenieur (Dr.-Ing.)**

von           Dipl. -Ing. Christian Schwenke

geb. am       11.08.1986 in Kyritz

genehmigt durch die Fakultät für Verfahrens- und Systemtechnik  
der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Promotionskommission:   Prof. Dr.-Ing. habil. Dominique Thevenin   (Vorsitz)  
                                  Prof. Dr.-Ing. habil. Evangelos Tsotsas   (Gutachter)  
                                  Prof. Dr.-Ing. Dietmar Schulze           (Gutachter)  
                                  Prof. Dr.-Ing. André Katterfeld         (Gutachter)

ingereicht am:

Promotionskolloquium am: 11.06.2018

**Inhaltsverzeichnis**

Symbolverzeichnis.....	IV
Kapitel 1 Einleitung und Zielstellung .....	1
Kapitel 2 Stand der Wissenschaft .....	3
2.1 Fließprobleme .....	3
2.2 Ermittlung der kritischen Trichtergeometrien .....	4
2.2.1 Grundlagen zur Spannungsverteilung in Silos .....	4
2.2.2 Grundlegende Berechnung zur minimalen Öffnungsweite $b_{\min}$ .....	8
2.2.3 Grundlegende Berechnung des maximalen Trichterneigungswinkels .....	12
2.2.4 Berechnung der kritischen Trichtergeometrien anhand der Scherversuche.....	12
2.3 Einfluss von Schwingungen auf das Austragsverhalten .....	14
2.4 Modelle zur Berechnung der Auslaufgeschwindigkeit .....	15
2.4.1 Allgemeines Austragsverhalten von Flüssigkeiten und Schüttgütern .....	15
2.4.2 Berechnungsmodelle für freifließende Schüttgüter .....	16
2.4.3 Berechnungsmodelle für kohäsive und feine Schüttgüter .....	20
Kapitel 3 Modellierung des Schüttgutaustrags .....	31
3.1 Allgemeine Austragshypothese .....	31
3.2 Besonderheiten des erweiterten Berechnungsmodells .....	32
3.3 Kräftegleichgewicht .....	33
3.4 Spannungsgleichgewicht .....	34
3.4.1 Spannungsgleichgewicht an einer durchströmten Schüttgutbrücke .....	34
3.4.2 Spannungsgleichgewicht einer nicht durchströmten Schüttgutbrücke bei Überdruck.....	36
3.5 Bestimmung der Einzelspannungen .....	38
3.5.1 Gewichtsbedingte Spannung .....	38
3.5.2 Trägheitsbedingte Spannung .....	40
3.5.3 Impulsbedingte Spannung .....	41
3.5.4 Strömungsbedingte Spannung .....	43
3.5.5 Druckbedingte Spannung .....	46
3.5.6 Schüttgutaufspannung .....	47
3.6 Tragfähigkeit der Schüttgutbrücke .....	50
3.6.1 Fließkriterien .....	50
3.6.2 Approximation der Fließfunktion des Schüttgutes .....	54
3.7 Geschwindigkeiten an der Schüttgutbrücke .....	55
3.7.1 Stationäre Geschwindigkeit in der Schüttgutbrücke .....	56
3.7.2 Instationäre Geschwindigkeit in der Schüttgutbrücke .....	57
3.8 Ermittlung der stationären Schüttgutaustragsgeschwindigkeit (Fluidkreislauf).....	58
3.8.1 Annahmen in bisherigen Berechnungsmodellen .....	59

3.8.2	Voraussetzungen für das Durchströmen des Schüttgutes .....	59
3.8.3	Ersatzschaltbild des Siloaustrages .....	62
3.8.4	Ersatzschaltbild der Fluidgegenströmung .....	63
3.8.5	Ermittlung der Strömungswiderstände .....	69
3.8.6	Ermittlung der Schüttgutaustragsgeschwindigkeit .....	72
<b>Kapitel 4</b>	<b>Bestimmung der Schüttguteigenschaften .....</b>	<b>75</b>
4.1	Herstellungsprozesse der untersuchten Pulver .....	76
4.2	Optische Analyse der Partikelform und Partikelgröße .....	78
4.3	Bestimmung der Partikelgrößenverteilung .....	82
4.4	Bestimmung der spezifischen Oberfläche .....	89
4.5	Bestimmung der Feststoffdichte .....	91
4.6	Bestimmung der Schüttgutdichte .....	92
4.7	Bestimmung der Schüttgutfeuchte .....	95
4.8	Bestimmung des Fließverhaltens .....	96
4.8.1	Partikelmechanische Betrachtung von Schüttgütern .....	97
4.8.2	Kontinuumsmechanische Betrachtung von Schüttgütern .....	98
4.8.3	Allgemeines Messprinzip mit einer herkömmlichen Translationsscherzelle... 99	
4.8.4	Besonderheit der schwingenden Translationsscherzelle .....	105
4.8.5	Scherversuche zur Bestimmung der Verfestigungsfunktion .....	106
4.8.6	Scherversuche zur Bestimmung des Wandreibungswinkels .....	110
<b>Kapitel 5</b>	<b>Planung und Entwicklung des Versuchsaufbaus .....</b>	<b>113</b>
5.1	Rahmenbedingungen der Technikumsprüfstände .....	113
5.2	Verwendete schwingende Austragshilfen .....	114
5.2.1	Vibrationsaustragsboden von WAM .....	115
5.2.2	Schäffer-Schwingauslauf® .....	116
5.3	Verwendete Dosiereinrichtung .....	117
5.4	Versuchsspezifische Messtechnik .....	119
5.4.1	Pulveraustragsmengenmessung .....	120
5.4.2	Schwingungserzeugung und -messung .....	120
5.4.3	Schüttgutdruckmessungen .....	122
5.4.4	Luft- oder Porendruckmessung beim Einbrechen der Pulverbrücke .....	123
5.4.5	Bestimmung des Fließprofils .....	124
5.5	Realisierung der Datenerfassung und Speicherung .....	124
5.6	Sicherheitsmaßnahmen .....	126
<b>Kapitel 6</b>	<b>Auswertung der Technikumsversuche .....</b>	<b>127</b>
6.1	Technikumsversuche bei der Firma Zeppelin .....	127
6.1.1	Austragsuntersuchungen von Mikro-S-PVC und BaCO <sub>3</sub> bei Zeppelin .....	128
6.1.2	Austragsuntersuchungen des Aerosil®200 bei Zeppelin .....	134
6.1.3	Untersuchung des Fließprofils im Silo .....	137
6.1.4	Ergebnisse der Druckmessungen bei Versuchen mit Zellenradschleuse .....	140

6.2	Technikumsversuche bei der Firma Coperion .....	142
6.2.1	Unterschiede gegenüber dem Versuchsaufbau bei der Firma Zeppelin .....	142
6.2.2	Transport und Füllvorgänge .....	142
6.2.3	Schwingungsanalyse .....	143
6.2.4	Austragsuntersuchung bei pulsierender Fahrweise .....	151
6.2.5	Untersuchung der Brückenbildung bei Reduzierung der Schwingungsintensität .....	160
6.2.6	Bandbreite des Massenstroms .....	163
6.2.7	Ergebnisse der Druckmessungen bei Versuchen ohne Dosiereinrichtung ....	166
6.2.8	Untersuchung des Fließprofils .....	168
6.2.9	Untersuchung des Dämpfungsverhaltens .....	171
Kapitel 7	Validierung des Berechnungsmodells .....	173
7.1	Gegenüberstellung der Modellhypothese mit den Versuchsergebnissen .....	173
7.1.1	Validierung der stationären Phase .....	176
7.1.2	Validierung der instationären Anlaufphase .....	181
7.1.3	Validierung der instationären Auslaufphase .....	186
7.2	Gegenüberstellung des neuen Berechnungsmodells mit vorherigen Modellen .....	186
7.2.1	Modellvergleich der stationären Austragsmassenströme .....	186
7.2.2	Modellvergleich der instationären Austragsmassenströme .....	191
7.3	Bewertung der notwendigen Schwingungsintensität .....	192
Kapitel 8	Rückschlüsse zum Einfluss der Zellenradschleuse .....	193
8.1	Einfluss der Zellenradschleuse auf den Massenaustrag .....	193
8.1.1	Feststellungen im Technikumsversuch bei Zeppelin .....	193
8.1.2	Vergleich der eigenen Ergebnisse mit denen von Kache (2010) .....	195
Kapitel 9	Zusammenfassung .....	203
9.1	Modellierung und Validierung .....	203
9.2	Einsatzmöglichkeiten schwingender Austragshilfen .....	206
9.3	Ausblick .....	207
Literaturverzeichnis	.....	211
Anhang	X	