

Dipl.-Ing. Dipl.-Ing. (FH) Karsten Keller,
Waldbronn

Schwingentwässerung von körnigen Produkten

Reihe **3**: Verfahrenstechnik

Nr. **510**

1 Einleitung	1
2 Grundlagen und Stand der Technik.....	4
2.1 Anwendungsgebiete der Schwingentwässerung	4
2.1.1 Historie	5
2.1.2 Aufbereitung	6
2.1.3 Recycling.....	8
2.1.4 Bodensanierung	8
2.1.5 Chemische und pharmazeutische Industrie	8
2.1.6 Nahrungsmittelindustrie	9
2.2 Schwingsiebe	9
2.2.1 Historie	10
2.2.2 Antriebsformen	10
2.2.3 Bauformen.....	14
2.2.4 Siebbeläge	17
2.2.5 Beschleunigungskomponenten.....	19
2.3 Schwingentwässerung	22
2.3.1 Historie	22
2.3.2 Stand der Entwässerungstechnik.....	24
2.3.3 Einflußgrößen der Schwingentwässerung	26
2.3.4 Einordnung und Verschaltung bei der Schwingentwässerung	28
2.3.4.1 Einordnung nach Grundaufgaben bei vibrierenden Systemen.....	28
2.3.4.2 Einordnung nach wirkenden Kräften	29
2.3.4.3 Verschaltung von Schwingsieben und Alternativen zur Schwingentwässerung	30
2.3.5 Flüssigkeitsanteile in einem Haufwerk	33
2.3.6 Definitionen zur Beschreibung des Entwässerungsvorganges	34
2.3.7 Statische - und Zentrifugalentwässerung	36
3 Modell der Schwingentwässerung	38
3.1 Kuchenbildende Sedimentation und Durchströmung des Haufwerks	41
3.2 Kolbenkinetik.....	42
3.2.1 Beschleunigung im Haufwerk.....	46
3.2.1.1 Ortsabhängigkeit	46
3.2.1.2 Zeitabhängigkeit	47
3.2.2 Beschleunigungsmuster.....	48
3.2.3 Berechnung der Kolbenkinetik mit sinusförmigem Erregungsmuster	48
3.2.3.1 Trägheitseinfluß bei der statischen Entwässerung.....	49

3.2.3.2	Richtungseinfluß des Beschleunigungsfeldes	51
3.2.3.3	Grenzwertbetrachtung der Differentialgleichung	52
3.2.3.4	Frequenzeinfluß	53
3.2.3.5	Amplitudeneinfluß	57
3.2.3.6	Maximale Flüssigkeitshöhe	63
3.2.4	Berechnung der Kolbenkinetik mit beliebigem Beschleunigungsmuster	64
3.2.4.1	Quasistationärer Gleichgewichtsbereich	64
3.2.4.2	Trägheitsbereich	65
3.2.5	Siebeeinfluß	68
3.3	Filmkinetik	70
3.3.1	Allgemeine Betrachtung	70
3.3.2	Berechnung der Filmgeschwindigkeit ohne Trägheitsterme	71
3.3.3	Trägheitsterme	72
3.3.3.1	Abschätzung der laminaren Strömung	73
3.3.3.2	Abschätzung der trägheitsfreien Strömung	73
3.3.3.3	Trägheitsbehaftete Strömung	74
3.3.4	Numerische Berechnung der Filmsättigung ohne Trägheitsterme	74
3.3.4.1	Filmdicke	74
3.3.4.2	Filmsättigung	77
3.3.5	Vorgehensweise zur numerischen Berechnung der Filmsättigung mit Trägheitstermen	79
3.4	Überlagerte Film - und Kolbenkinetik	79
3.4.1	Gesamtsättigung	79
3.4.2	Vergleich von statischer Kolben- und Filmkinetik	81
3.4.3	Schwingentwässerung	82
3.5	Abtropfbedingung	85
3.5.1	Allgemeine Betrachtung	86
3.5.2	Historie	87
3.5.3	Einflußgrößen	87
3.5.3.1	Gleichgewicht, Tropfenform und Stabilität	87
3.5.3.2	Kapillardurchmesser	89
3.5.3.3	Volumenstrom	90
3.5.3.4	Bewegte Kontaktlinie, Benetzbarkeit, Randwinkel, Oberflächenform	90
3.5.3.5	Äußere Kräfte	91
3.5.4	Schwingentwässerung	91
3.5.5	Allgemeine Bemerkungen	96
3.6	Zusammenfassung	97
4	Versuchsanlage und Versuchstechnik	98
4.1	Vibrationstische	98
4.1.1	Aufbau	98
4.1.2	Siebbeläge	100
4.1.3	Betriebsgrößen	101

4.1.4 Versuchsdurchführung	103
4.2 Schwingsieb	104
4.2.1 Aufbau	104
4.2.2 Siebbeläge	105
4.2.3 Betriebsgrößen	105
4.2.4 Versuchsdurchführung	105
4.3 Becherzentrifuge	106
4.4 Versuchsprodukte.....	106
4.4.1 Bestimmung der Produkt - und Haufwerksgrößen.....	107
4.5 Analyse der Beschleunigung im Haufwerk.....	109
4.5.1 Meßwernerfassung und -verarbeitung.....	109
4.5.1.1 Methode der Meßwernerfassung	109
4.5.1.2 Skizzierung der Signalverarbeitung.....	111
4.5.2 Versuchsdurchführung	111
4.5.2.1 Produktbewegung in Abhängigkeit von der Erregerschwingung	111
4.5.2.2 Anwendung der Fourier-Transformation.....	114
4.5.2.3 Spektrale Darstellung der Produktschwingungen.....	115
4.5.3 Auswerteverfahren	118
4.5.3.1 Nachweis nichtlinearer Übertragung	118
4.5.3.2 Einsicht in das schwingungsübertragende System.....	120
4.5.4 Vergleich der Schwingungsformen im Zeitbereich.....	129
4.6 Abtropfverhalten bei Glaskapillaren und beim Haufwerk	131
4.6.1 Untersuchungen bei Glaskapillaren	132
4.6.1.1 Vibrationstisch	132
4.6.1.2 Fallapparatur	132
4.6.2 Untersuchungen bei Haufwerken	134
4.6.3 Hochgeschwindigkeitsaufnahmen.....	135
5 Experimentelle Untersuchungen.....	136
5.1 Abtropfvorgang.....	136
5.1.1 Hochgeschwindigkeitsaufnahmen.....	136
5.1.2 Glaskapillare	139
5.1.2.1 Untersuchungen an den Vibrationstischen	139
5.1.2.2 Untersuchungen bei Impulsbeschleunigung an der Fallapparatur	142
5.1.2.3 Zusammenfassung	149
5.1.3 Haufwerk.....	149
5.1.3.1 Versuchsaufbau und -durchführung.....	149
5.1.3.2 Beschleunigungsverlauf.....	150
5.1.3.3 Ergebnisse der Entfeuchtungsversuche.....	151
5.1.3.4 Zusammenfassung	155
5.1.4 Zusammenfassung.....	156
5.2 Schwingentwässerung	156

5.2.1 Einfluß der Partikelgröße	157
5.2.2 Einfluß der Kuchenhöhe	158
5.2.3 Einfluß der Amplitude	158
5.2.4 Einfluß der Frequenz.....	160
5.2.5 Einfluß des Siebbelages	163
5.2.6 Einfluß von Tensiden und Bürsten	164
5.2.7 Einfluß der Porosität und thermischer Trocknung.....	166
5.2.7.1 Porositätseinfluß.....	166
5.2.7.2 Thermischer Einfluß.....	167
5.2.8 Versuche an der Schwingentwässerungsanlage	168
5.2.9 Zusammenfassung der experimentellen Ergebnisse	170
5.3 Vergleich der Schwingentwässerung mit anderen Verfahren.....	170
5.3.1 Statische Entwässerung.....	170
5.3.2 Zentrifugalentwässerung.....	173
5.3.3 Zusammenfassung.....	173
5.4 Zusammenfassung	174
6 Experimenteller Nachweis des Modells zur Schwingentwässerung.....	175
6.1 Vergleich der Ergebnisse mit dem Entfeuchtungsmodell.....	175
6.1.1 Vergleich bei theoretischer Bestimmung des Tropfenvolumens	177
6.1.2 Vergleich bei Bestimmung der kapillaren Steighöhe	179
6.2 Vergleich von Meßdaten aus der Literatur	184
6.3 Zusammenfassung	186
6.4 Auslegung und Einsatz	187
6.4.1 Einfluß der Klassierung und des Transports	187
6.4.1.1 Klassierung	188
6.4.1.2 Transport.....	188
7 Einzelkornentwässerung und kombinierte Schwing-Saug-Entwässerung	189
7.1 Einzelkornentwässerung	189
7.1.1 Haftkraft zwischen einer Einzelkugel und einem Flüssigkeitsfilm	190
7.1.1.1 Vorhandene Ansätze.....	190
7.1.1.2 Kräftebilanz an einer Einzelkugel	191
7.1.1.3 Versuchsdurchführung zur Bestimmung der Haftbedingung	193
7.1.1.4 Versuchsergebnisse	193
7.1.2 Filmströmung auf der Kugeloberfläche	195
7.1.2.1 Vorhandene Ansätze.....	195
7.1.2.2 Numerische Herleitung zur Filmkinetik bei Kugeloberflächen.....	196
7.1.2.3 Berechnung des Filmverlaufes	198
7.1.3 Abtropfbedingung	200
7.1.4 Zusammenfassung und Ausblick	200

7.2 Kombinierte Schwing-Saug-Entwässerung	201
7.2.1 Vorhandene Ansätze und Einflußgrößen	202
7.2.1.1 Transportphänomene in porösen Medien	203
7.2.1.2 Einflußgrößen	204
7.2.1.3 Kapillare Saugzeit - Capillary Suction Time (CST)	205
7.2.2 Kräftebilanz bei der Kolbenströmung	207
7.2.2.1 Zusammenwirken einer Kapillaren im Kuchen mit einer Kapillaren im Saugtuch.....	207
7.2.2.2 Zusammenwirken einer Kapillaren im Kuchen mit n Kapillaren im Saugtuch	210
7.2.2.3 Berücksichtigung eines Siebbelags.....	212
7.2.2.4 Berücksichtigung einer Eingangsfeuchte des Saugtuches	212
7.2.2.5 Einfluß der Flüssigkeitsaufnahmekapazität des Saugtuches.....	213
7.2.2.6 Schwinganregung.....	213
7.2.3 Versuchsergebnisse	213
7.2.4 Zusammenfassung und Ausblick	216
8 Zusammenfassung	218
9 Formelzeichen	220
A1 Anhang.....	225
A1.1 Berechnung der Kuchenbildungs- und Durchströmungszeiten.....	225
A1.1.1 Kuchenbildungszeit.....	225
A1.1.2 Durchströmungszeiten.....	227
A2 Anhang.....	228
A2.1 Überprüfung der Reynolds-Zahl bei der Reibungskraft.....	228
A2.2 Überprüfung der dynamischen Reynolds-Zahl	229
A3 Anhang.....	230
A3.1 Überprüfung der numerischen Ergebnisse	230
A4 Anhang.....	231
A4.1 Stoffdaten: Leitungswasser / Tensid / Luviskol.....	231
A5 Anhang.....	234
A5.1 Entwässerungsergebnisse der Produkte	234
Literatur	239