

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Einführung</b>	<b>1</b>
1.1 Häufig auftretende Probleme mit Schüttgütern	1
1.2 Meilensteine der Schüttguttechnik	4
Literatur	7
<b>2 Grundlagen</b>	<b>9</b>
2.1 Partikel oder Kontinuum?	9
2.2 Kräfte und Spannungen	10
2.3 Das Verhalten von Schüttgütern (Einführung)	11
2.4 Der Mohrsche Spannungskreis	15
2.4.1 Die wichtigsten Grundlagen zum Mohrschen Spannungskreis	15
2.4.2 Berechnungen zum Mohrschen Spannungskreis	18
2.5 Schüttgutdichte, Porosität und Sättigungsgrad	22
2.6 Statischer Auftrieb	26
2.7 Elastische und plastische Verformung	30
2.8 Haftkräfte	31
2.9 Einfluss der Partikelgröße auf das Verhalten des Schüttgutes	38
2.10 Partikelgrößenverteilungen	40
2.10.1 Verteilungssumme und Verteilungsdichte	41
2.10.2 Mengenart	44
2.10.3 Kennwerte von Partikelgrößenverteilungen	45
Literatur	47
<b>3 Fließeigenschaften von Schüttgütern</b>	<b>49</b>
3.1 Einachsiger Druckversuch als Modell	49
3.1.1 Verfestigung von Schüttgütern	49
3.1.2 Zeitverfestigung	51
3.1.3 Fließfähigkeit	53
3.1.4 Druckversuch mit Fließgrenze und Spannungskreisen	53

3.2	Prinzip der Messung mit Schergeräten .....	57
3.2.1	Messprozedur .....	57
3.2.2	Fließort und Fließeigenschaften .....	64
3.2.3	Zeitverfestigung (Caking) .....	74
3.3	Wandreibung .....	78
3.3.1	Messprozedur für Wandfließorte .....	78
3.3.2	Wandfließort und Wandreibungswinkel (kinematisch) .....	79
3.3.3	Zeitwandfließort, statische Wandreibung .....	81
3.4	Kennzahlen zur Charakterisierung der Fließfähigkeit .....	83
3.4.1	Die Fließfähigkeit $ff_c$ .....	83
3.4.2	Bemerkungen zur Bezeichnung „Fließfähigkeit“ .....	87
3.4.3	Weitere Zahlen zur Kennzeichnung der Fließfähigkeit .....	88
	Literatur .....	93
<b>4</b>	<b>Praktisches Messen von Fließeigenschaften .....</b>	<b>95</b>
4.1	Messungen mit Schergeräten .....	95
4.1.1	Messung von Fließorten mit dem Jenike-Schergerät .....	96
4.1.2	Messung von Fließorten mit dem Ringschergerät .....	102
4.1.3	Messung der Zeitverfestigung .....	106
4.1.4	Messung der kinematischen Wandreibung .....	108
4.1.5	Messung der statischen Wandreibung .....	111
4.1.6	Abriebmessung .....	112
4.1.7	Messung der Verdichtbarkeit .....	114
4.2	Festlegen der Spannungen .....	116
4.2.1	Fließorte (Fließfähigkeit) .....	116
4.2.2	Zeitfließorte (Fließfähigkeit bei Zeitverfestigung) .....	123
4.2.3	Wandfließorte (Wandreibung) .....	125
4.3	Anwendungsbezogene Messung von Fließeigenschaften .....	125
4.3.1	Vergleichsmessungen .....	125
4.3.2	Verfahrenstechnische Siloauslegung .....	126
	Literatur .....	127
<b>5</b>	<b>Anmerkungen zum realen Verhalten von Schüttgütern .....</b>	<b>131</b>
5.1	Anisotropie und Einfluss der Verformung .....	131
5.1.1	Spannungen .....	132
5.1.2	Schüttgutdichte .....	141
5.1.3	Druckfestigkeit (Schüttgutfestigkeit) .....	142
5.2	Scherverformung, Scherzonen, Lokalisation .....	145
5.2.1	Idealisierung: Einfaches Scheren und reines Scheren .....	145
5.2.2	Scherzonen und Scherbänder .....	147
5.2.3	Dilatanz .....	153
5.2.4	Stationäres Fließen und Dilatanz beim Messen von Fließeigenschaften .....	158

---

5.3	Fließorte .....	160
5.3.1	Anscherpunkt, Abscherpunkte und Spannungskreise .....	160
5.3.2	Zugfestigkeit und Kohäsion .....	163
5.3.3	Verhalten bei sehr kleinen Spannungen .....	167
5.4	Einfluss der Geschwindigkeit .....	171
	Literatur .....	172
6	<b>Überblick über Messverfahren und Messgeräte .....</b>	175
6.1	Einflüsse auf das Messergebnis .....	175
6.1.1	Prozedur und Hauptspannungen .....	175
6.1.2	Spannungen in der Messebene .....	178
6.2	Anforderungen an Messgeräte für Fließeigenschaften .....	180
6.3	Messverfahren (Übersicht) .....	181
6.3.1	Trichter .....	182
6.3.2	Böschungswinkel .....	183
6.3.3	Lawinenbildung (Avalanching) .....	185
6.3.4	Imse-Test .....	186
6.3.5	Fließfähigkeitsindex nach Carr .....	187
6.3.6	Rührer .....	188
6.3.7	Verdichtbarkeitsmessung .....	189
6.3.8	Cohesion Tester, Flowability Test .....	190
6.3.9	Penetration Test und Indentation Test .....	191
6.3.10	Einachsiger Druckversuch .....	192
6.3.11	Monoaxial Shear Test .....	193
6.3.12	Powder Bed Tester mit Zugfestigkeitsmessung .....	194
6.3.13	Einachsige Zugfestigkeitsmessung .....	195
6.3.14	Zugfestigkeitsmessung mit Gasströmung .....	196
6.3.15	Johanson Hang-up Indicizer™, ähnliche Messprinzipien .....	197
6.3.16	Quality Control Tester .....	198
6.3.17	Zweiachsiger Druckversuch (Biaxial compression test) .....	199
6.3.18	Jenike-Schergerät .....	200
6.3.19	Torsionsschergeräte .....	201
6.3.20	Ringschergeräte .....	202
6.4	Bemerkungen zu Aussagekraft und Genauigkeit .....	202
6.5	Messung von Haftkräften .....	207
6.6	Zusammenfassung .....	209
	Literatur .....	210
7	<b>Spezielle Eigenschaften und Einflüsse auf das Fließverhalten .....</b>	217
7.1	Effekte beim Fließen von Schüttgütern .....	217
7.1.1	Stick-Slip-Effekt durch Zeit- und Geschwindigkeitsabhängigkeit ....	217
7.1.2	Lage- und Wegabhängigkeit der Wandreibung .....	226

<b>7.2 Einflüsse auf das Fließverhalten</b> .....	228
7.2.1 Partikelgrößenverteilung .....	228
7.2.2 Fließhilfsmittel .....	228
7.2.3 Flüssigkeit, Feuchteanteil .....	232
7.2.4 Gasströmung .....	234
7.2.5 Partikelform .....	238
7.2.6 Agglomeratbildung .....	245
<b>Literatur</b> .....	246
<b>8 Beispiele gemessener Fließeigenschaften</b> .....	249
8.1 Fließhilfsmittel .....	249
8.2 Feuchtigkeit .....	251
8.3 Temperatur .....	253
8.4 Zeitfestigung .....	254
8.5 Feinheit .....	255
8.6 Abrieb .....	257
8.7 Schüttgutdichte .....	258
8.8 Spannungsabhängigkeit des Wandreibungswinkels .....	260
8.9 Wandreibungswinkel in Abhängigkeit vom Wandmaterial .....	261
8.10 Wandreibungswinkel in Abhängigkeit von der Richtung .....	263
<b>Literatur</b> .....	268
<b>9 Spannungen im Schüttgut</b> .....	269
9.1 Spannungsverhältnisse bei der Lagerung in Silos .....	269
9.1.1 Horizontallastverhältnis .....	269
9.1.2 Spannungsverläufe .....	271
9.2 Berechnungsverfahren (Übersicht) .....	276
9.2.1 Berechnung der Spannungen im Siloschaft .....	278
9.2.2 Weitere Anwendungen der Janssen-Gleichung .....	284
9.2.3 Schüttguteigenschaften zur Spannungsberechnung mit der Janssen-Gleichung .....	288
9.2.4 Berechnung der Spannungen im Trichter .....	291
9.2.5 Abschätzung der Spannungen an der Auslauföffnung .....	312
9.2.6 Schüttguteigenschaften zur Berechnung der Spannungen im Trichter .....	313
9.2.7 Spannungsberechnung für das Gesamtsystem .....	314
9.3 Belastung von Austraggeräten .....	315
9.3.1 Vertikalspannung an der Auslauföffnung .....	315
9.3.2 Abschätzen von Abzugskräften .....	317
9.4 Einflüsse auf die Spannungsverteilung .....	320
9.4.1 Lokale Querschnittsänderungen .....	320
9.4.2 Exzentrisches Fließen .....	326
<b>Literatur</b> .....	330

<b>10 Verfahrenstechnische Siloauslegung</b>	335
10.1 Fließprofile: Massenfluss und Kernfluss	335
10.2 Probleme beim Lagern von Schüttgütern in Silos	337
10.3 Das Auslegungsverfahren von Jenike	339
10.3.1 Auslegung von Massenflusssilos	339
10.3.2 Auslegung von Kernflusssilos	349
10.4 Anwendungen der Ergebnisse der Siloauslegung	354
10.5 Diagramme zur Siloauslegung	356
Literatur	360
<b>11 Silogestaltung</b>	361
11.1 Einfluss der Fließeigenschaften auf die Silogestaltung	361
11.2 Trichtergestaltung	362
11.2.1 Trichterformen	362
11.2.2 Übergänge und Wandgestaltung	365
11.2.3 Mehrere Auslauföffnungen	367
11.2.4 Sonderfälle: Unterschiedliche Wandneigungswinkel	368
11.3 Einbauten	369
11.3.1 Verdrängende Einbauten	370
11.3.2 Trichterförmige Einbauten	372
11.3.3 Rohrförmige Einbauten	373
Literatur	377
<b>12 Schüttgutaustrag</b>	379
12.1 Freier Auslauf und maximaler Massenstrom	379
12.1.1 Abschätzung des Auslaufmassenstroms grobkörniger Schüttgüter	381
12.1.2 Auslaufmassenstrom feinkörniger Schüttgüter	382
12.2 Austraghilfen	386
12.2.1 Pneumatische Austraghilfen	386
12.2.2 Mechanische Austraghilfen	389
12.2.3 Einsatz von Austraghilfen	390
12.3 Austraggeräte	392
12.3.1 Regeln zur Gestaltung hinsichtlich Massenfluss	392
12.3.2 Übersicht	395
12.4 Einsatz von Austraghilfen und Austraggeräten	411
Literatur	415
<b>13 Entmischung</b>	419
13.1 Entmischungsmechanismen	419
13.1.1 Siebeffekt und andere Entmischungsmechanismen auf Böschungen	420

13.1.2 Perkolation bei Verformung des Schüttgutes .....	422
13.1.3 Flugbahn und Gasströmung .....	423
13.2 Reduzieren der Entmischung beim Lagern von Schüttgütern .....	427
13.2.1 Veränderung des Schüttgutes .....	428
13.2.2 Optimieren von Einfüllprozessen .....	429
13.2.3 Zusammenführen des entmischten Schüttgutes .....	433
13.3 Probenahme .....	439
13.4 Schlussfolgerungen .....	439
Literatur .....	440
 <b>14 Erschütterungen und Schwingungen in Silos .....</b>	 441
14.1 Phänomen .....	441
14.2 Grundlegende Vorgänge .....	442
14.2.1 Erschütterungen als Ergebnis schlagartig bewegten Schüttgutes .....	442
14.2.2 Schlagartiges und pulsierendes Fließen durch Stick-Slip .....	444
14.2.3 Scherzonen im Silo .....	445
14.2.4 Beschleunigungs- und Verzögerungswellen .....	448
14.3 Erschütterungen durch Fließen des Schüttgutes .....	457
14.3.1 Scherzonen innerhalb des Schüttgutes .....	457
14.3.2 Erschütterungen durch veränderliche tote Zonen .....	461
14.3.3 Erschütterungen durch Fließen an der Silowand .....	464
14.3.4 Kombinationen verschiedener Mechanismen .....	466
14.3.5 Silohupen .....	466
14.4 Erschütterungen durch andere Ursachen .....	473
14.4.1 Großer Massenstrom .....	473
14.4.2 Zyklische Anregung durch das Austraggerät .....	473
14.4.3 Zusammenbrechende Brücken und Schächte .....	474
14.5 Maßnahmen zur Reduzierung von Silobeben und Silohupen .....	475
14.5.1 Verringerung der beschleunigten Masse .....	475
14.5.2 Regelmäßiges Auslösen von kleinen Erschütterungen .....	477
14.5.3 Erhöhung der Wandrauigkeit im Siloschaft .....	478
14.5.4 Vergleichmäßigung des Fließprofils .....	480
14.5.5 Umwandeln von Kernfluss in Massenfluss .....	481
14.5.6 Einbauten .....	481
Literatur .....	483
 <b>15 Beispieldaufgaben mit Lösungen .....</b>	 487
15.1 Allgemeine Hinweise zu den Aufgaben .....	487
15.2 Aufgaben und Lösungen .....	487
15.2.1 Aufgabe 1: Spannungen im Siloschaft .....	487
15.2.2 Aufgabe 2: Maximale Spannung im Massenflusssilo (Abrieb) .....	489
15.2.3 Aufgabe 3: Entleerungsrohr .....	490

15.2.4 Aufgabe 4: Abzugskraft .....	491
15.2.5 Aufgabe 5: Presse .....	492
15.2.6 Aufgabe 6: Spannungen bei Kombination von Behältern .....	494
15.2.7 Aufgabe 7: Spannungen in BigBags und gestapelten Säcken .....	496
15.2.8 Aufgabe 8: Auslaufmassenstrom .....	497
15.2.9 Aufgabe 9: Auswahl eines Wandmaterials für Massenfluss .....	497
15.2.10 Aufgabe 10: Auslegung eines Massenflusssilos .....	499
15.2.11 Aufgabe 11: Auslegung eines Kernflusssilos .....	503
15.2.12 Aufgabe 12: Auslegung eines Silos bei Zeitverfestigung .....	507
<b>Symbolverzeichnis .....</b>	<b>513</b>
<b>Sachverzeichnis .....</b>	<b>519</b>