

Inhaltsverzeichnis

1 Einführung	1
1.1 Häufig auftretende Probleme mit Schüttgütern	1
1.2 Meilensteine der Schüttguttechnik	4
Literatur	7
2 Grundlagen	9
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 Schüttguldichte, 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
3 Fließeigenschaften von Schüttgütern	49
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
4	Praktisches Messen von Fließeigenschaften	95
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
5	Anmerkungen zum realen Verhalten von Schüttgütern	131
5.1	Anisotropie und Einfluss der Verformung	131
5.1.1	Spannungen	132
5.1.2	Schüttgutedichte	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	Überblick über Messverfahren und Messgeräte	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	Spezielle Eigenschaften und Einflüsse auf das Fließverhalten	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

7.2	Einflüsse auf das Fließverhalten	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
	Literatur	246
8	Beispiele gemessener Fließeigenschaften	249
8.1	Fließhilfsmittel	249
8.2	Feuchtigkeit	251
8.3	Temperatur	253
8.4	Zeitverfestigung	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
	Literatur	268
9	Spannungen im Schüttgut	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
	Literatur	330

10 Verfahrenstechnische Siloauslegung	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
11 Silogestaltung	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
12 Schüttgutaustrag	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
13 Entmischung	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
14	Erschütterungen und Schwingungen in Silos	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
15	Beispielaufgaben mit Lösungen	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
Symbolverzeichnis		513
Sachverzeichnis		519