

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	XI
1. Einführung	1
1.1 Häufig auftretende Probleme mit Schüttgütern	1
1.2 Meilensteine der Schüttguttechnik	4
2 Grundlagen.....	9
2.1 Partikel oder Kontinuum?.....	9
2.2 Kräfte und Spannungen	10
2.3 Spannungsverhältnisse in Schüttgütern	12
2.3.1 Einführung des Mohrschen Spannungskreises	13
2.3.2 Berechnungen zum Mohrschen Spannungskreis	16
2.4 Schüttgutdichte	20
2.5 Elastische und plastische Verformung.....	22
2.6 Haftkräfte.....	24
2.7 Einfluss der Partikelgröße auf das Verhalten des Schüttgutes.....	32
3 Fließeigenschaften von Schüttgütern	35
3.1 Einachsiger Druckversuch als Modell	35
3.1.1 Verfestigung von Schüttgütern	35
3.1.2 Zeitverfestigung.....	38
3.1.3 Darstellung mit Spannungskreisen	39
3.1.4 Kennzahlen zur Charakterisierung der Fließfähigkeit	42
3.2 Prinzip der Messung mit Schergeräten	47
3.2.1 Messprozedur	48
3.2.3 Fließort und Fließeigenschaften	56
3.2.4 Zeitverfestigung (Caking).....	67
3.3 Wandreibung	71
3.3.1 Messprozedur für Wandfließorte.....	72
3.3.2 Wandfließort und Wandreibungswinkel.....	73
3.3.3 Zeitwandfließort, statische Wandreibung	75

4 Praktisches Messen von Fließeigenschaften	79
4.1 Messungen mit Schergeräten	79
4.1.1 Messung von Fließorten mit dem Jenike-Schergerät	80
4.1.2 Messung von Fließorten mit dem Ringschergerät	88
4.1.3 Messung der Zeitverfestigung	92
4.1.4 Messung der kinematischen Wandreibung	94
4.1.5 Messung der statischen Wandreibung	97
4.1.6 Abriebmessung	98
4.1.6 Messung der Verdichtbarkeit	101
4.2 Festlegen der Spannungen	103
4.2.1 Fließorte (Fließfähigkeit)	103
4.2.2 Zeitfließorte (Fließfähigkeit bei Zeitverfestigung)	112
4.2.3 Wandfließorte (Wandreibung)	113
4.3 Anwendungsbezogene Messung von Fließeigenschaften	114
4.3.1 Vergleichsmessungen	114
4.3.2 Verfahrenstechnische Siloauslegung	115
5 Anmerkungen zum realen Verhalten von Schüttgütern	117
5.1 Anisotropie und Einfluss der Verformung	117
5.1.1 Spannungen	119
5.1.2 Schüttgutdichte	129
5.1.3 Druckfestigkeit (Schüttgutfestigkeit)	130
5.2 Scherverformung, Scherzonen, Lokalisation	133
5.2.1 Idealisierung: Einfaches Scheren und reines Scheren	133
5.2.2 Scherzonen und Scherbänder	136
5.2.3 Dilatanz	144
5.2.4 Stationäres Fließen und Dilatanz beim Messen von Fließeigenschaften	148
5.3 Fließorte	151
5.3.1 Anscherpunkt, Abscherpunkte und Spannungskreise	152
5.3.2 Zugfestigkeit und Kohäsion	155
5.3.3 Verhalten bei sehr kleinen Spannungen	160
5.4 Einfluss der Geschwindigkeit	164
6 Überblick über Messverfahren und Messgeräte	167
6.1 Einflüsse auf das Messergebnis	167
6.1.1 Prozedur und Hauptspannungen	167
6.1.2 Spannungen in der Messebene	171
6.2 Anforderungen an Messgeräte für Fließeigenschaften	172
6.3 Messverfahren (Übersicht)	173
6.3.1 Trichter	175
6.3.2 Böschungswinkel	176

6.3.3 Lawinenbildung (Avalanching)	178
6.3.4 Imse-Test	179
6.3.5 Fließfähigkeitsindex nach Carr.....	180
6.3.6 Rührer	181
6.3.7 Verdichtbarkeitsmessung.....	182
6.3.8 Cohesion Tester, Flowability Test.....	183
6.3.9 Penetration Test	185
6.3.10 Einachsiger Druckversuch	185
6.3.11 Monoaxial Shear Test.....	186
6.3.12 Powder Bed Tester mit Zugfestigkeitsmessung	187
6.3.13 Einachsige Zugfestigkeitsmessung	188
6.3.14 Zugfestigkeitsmessung mit Gasströmung.....	189
6.3.15 Johanson Hang-up Indicizer™, ähnliche Messprinzipien ..	190
6.3.16 Quality Control Tester	192
6.3.17 Zweiachsiger Druckversuch (Biaxial compression test) ...	193
6.3.18 Jenike-Schergerät.....	194
6.3.19 Torsionsschergeräte	195
6.3.20 Ringschergeräte	196
6.4 Bemerkungen zu Aussagekraft und Genauigkeit.....	197
6.5 Messung von Haftkräften	200
6.6 Zusammenfassung	202
7 Spezielle Eigenschaften und Einflüsse auf das Fließverhalten	203
7.1 Effekte beim Fließen von Schüttgütern	203
7.1.1 Slip-Stick-Effekt durch Zeit- und Geschwindigkeitsabhängigkeit	203
7.1.2 Wegabhängigkeit der Wandreibung	213
7.2 Einflüsse auf das Fließverhalten	215
7.2.1 Partikelgrößenverteilung	215
7.2.2 Fließhilfsmittel	215
7.2.3 Flüssigkeit, Feuchtigkeit.....	220
7.2.4 Gasströmung.....	223
7.2.5 Partikelform.....	227
8 Beispiele gemessener Fließeigenschaften	237
8.1 Fließhilfsmittel.....	237
8.2 Feuchtigkeit	239
8.3 Temperatur.....	241
8.4 Zeitverfestigung.....	242
8.5 Feinheit	244
8.6 Abrieb	246
8.7 Schüttgutedichte	247

8.8	Spannungsabhängigkeit des Wandreibungswinkels	249
8.9	Wandreibungswinkel in Abhängigkeit vom Wandmaterial.....	251
9	Spannungen im Schüttgut	255
9.1	Spannungsverhältnisse bei der Lagerung in Silos	255
9.1.1	Horizontallastverhältnis.....	255
9.1.2	Spannungsverläufe	258
9.2	Berechnungsverfahren (Übersicht).....	263
9.2.1	Berechnung der Spannungen im Siloschaft.....	265
9.2.2	Weitere Anwendungen der Janssen-Gleichung	268
9.2.3	Schüttguteigenschaften zur Spannungsberechnung.....	272
9.2.4	Abschätzung der Spannungen an der Auslauföffnung	275
9.2.5	Spannungsberechnung für das Gesamtsystem.....	276
9.3	Belastung von Ausraggeräten.....	277
9.3.1	Vertikalspannung an der Auslauföffnung.....	278
9.3.2	Abschätzen von Abzugskräften	280
9.4	Einflüsse auf die Spannungsverteilung.....	284
9.4.1	Lokale Querschnittsänderungen	284
9.4.2	Exzentrisches Entleeren.....	291
10	Verfahrenstechnische Siloauslegung.....	295
10.1	Fließprofile: Massenfluss und Kernfluss	295
10.2	Probleme beim Lagern von Schüttgütern in Silos	297
10.3	Das Auslegungsverfahren von Jenike.....	299
10.3.1	Auslegung von Massenflusssilos.....	299
10.3.2	Auslegung von Kernflusssilos	310
10.4	Anwendungen der Ergebnisse der Siloauslegung.....	314
10.5	Diagramme zur Siloauslegung.....	316
11	Silogestaltung	321
11.1	Einfluss der Fließeigenschaften auf die Silogestaltung	321
11.2	Trichtergestaltung	322
11.2.1	Trichterformen.....	322
11.2.2	Übergänge und Wandgestaltung.....	325
11.2.3	Mehrere Auslauföffnungen.....	328
11.2.4	Sonderfälle: Unterschiedliche Wandneigungswinkel.....	328
11.3	Einbauten	330
11.3.1	Verdrängende Einbauten	331
11.3.2	Trichterförmige Einbauten	334
11.3.3	Rohrförmige Einbauten	335

12 Schüttgutaustrag	341
12.1 Freier Auslauf und maximaler Massenstrom.....	341
12.1.1 Abschätzung des Auslaufmassenstroms grobkörniger Schüttgüter.....	343
12.1.2 Auslaufmassenstrom feinkörniger Schüttgüter.....	344
12.2 Austraghilfen	349
12.2.1 Pneumatische Austraghilfen	349
12.2.2 Mechanische Austraghilfen	352
12.2.3 Einsatz von Austraghilfen	354
12.3 Austraggeräte.....	355
12.3.1 Regeln zur Gestaltung hinsichtlich Massenfluss	355
12.3.2 Übersicht.....	359
12.4 Einsatz von Austraghilfen und Austraggeräten	379
13 Entmischung	383
13.1 Entmischungsmechanismen.....	383
13.1.1 Siebeffekt und andere Entmischungsmechanismen auf Böschungen	384
13.1.2 Perkolation bei Verformung des Schüttgutes	386
13.1.3 Flugbahn und Gasströmung.....	388
13.2 Reduzieren der Entmischung beim Lagern von Schüttgütern ...	392
13.2.1 Veränderung des Schüttgutes	393
13.2.2 Optimieren von Einfüllprozessen	394
13.2.3 Zusammenführen des entmischten Schüttgutes.....	398
13.3 Probenahme	405
13.4 Schlussfolgerungen.....	406
14 Erschütterungen und Schwingungen in Silos	407
14.1 Phänomen	407
14.2 Erschütterungen als Ergebnis schlagartig bewegter Schüttgutmassen	408
14.3 Schlagartiges und pulsierendes Fließen durch Slip-Stick.....	411
14.4 Scherzonen im Silo.....	411
14.5 Erschütterungen durch Slip-Stick-Reibung	415
14.5.1 Scherzonen im fließenden Schüttgut	415
14.5.2 Veränderliche tote Zonen (Kernfluss)	421
14.5.3 Fließen an der Silowand	425
14.5.4 Kombinationen verschiedener Mechanismen.....	431
14.6 Erschütterungen durch andere Ursachen	431
14.6.1 Große Massenströme bei kleinen Auslauföffnungen.....	431
14.6.2 Zyklische Anregung durch das Austraggerät	432
14.6.3 Zusammenbrechende Brücken und Schächte	432

14.7 Maßnahmen zur Reduzierung von Silobeben und Silohupen....	433
14.7.1 Verringerung der beschleunigten Masse	434
14.7.2 Regelmäßiges Auslösen von kleinen Erschütterungen.....	436
14.7.3 Erhöhung der Wandrauigkeit im Siloschaft	437
14.7.4 Vergleichmäßigung des Fließprofils	438
14.7.5 Umwandeln von Kernfluss in Massenfluss	439
15 Beispielaufgaben mit Lösungen.....	441
15.1 Allgemeine Hinweise zu den Aufgaben	441
15.2 Aufgaben und Lösungen.....	441
Aufgabe 1: Spannungen im Siloschaft	441
Aufgabe 2: Maximale Spannung im Massenflusssilo (Abrieb).....	443
Aufgabe 3: Entleerungsrohr.....	444
Aufgabe 4: Abzugskraft	446
Aufgabe 5: Presse	447
Aufgabe 6: Spannungen bei Kombination von Behältern	449
Aufgabe 7: Spannungen in BigBags und gestapelten Säcken	451
Aufgabe 8: Auslaufmassenstrom.....	452
Aufgabe 9: Auswahl eines Wandmaterials für Massenfluss	453
Aufgabe 10: Auslegung eines Massenflusssilos.....	454
Aufgabe 11: Auslegung eines Kernflusssilos	458
Aufgabe 12: Auslegung eines Silos bei Zeitverfestigung.....	461
Symbolverzeichnis	467
Literaturverzeichnis	471
Sachverzeichnis	501