



Dietmar Schulze

Pulver und Schüttgüter

Fließeigenschaften und Handhabung

3. Auflage

VDI

 Springer Vieweg



Pulver und Schüttgüter

Dietmar Schulze

Pulver und Schüttgüter

Fließeigenschaften und Handhabung

3., ergänzte Auflage

Prof. Dr. Dietmar Schulze
Institut für Recycling
Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften
Wolfsburg
Deutschland

ISBN 978-3-642-53884-1 ISBN 978-3-642-53885-8 (eBook)
DOI 10.1007/978-3-642-53885-8

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Springer Vieweg

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2006, 2009, 2014

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Vieweg ist eine Marke von Springer DE. Springer DE ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media
www.springer-vieweg.de

Geleitwort

Die Handhabung von Pulvern und Schüttgütern wird im Ingenieurwesen als Schüttguttechnik bezeichnet, die ihrerseits ein Bestandteil der Mechanischen Verfahrenstechnik ist. Unter Verfahrenstechnik versteht man die Wandlung von Stoffeigenschaften. Werden dazu mechanische Verfahren angewandt, spricht man von Mechanischer Verfahrenstechnik. Die bekanntesten Grundoperationen der Mechanischen Verfahrenstechnik sind das Zerkleinern, das Agglomerieren, das Mischen und das Trennen. Dabei erhalten die Partikel als Einzelpartikel oder im Kollektiv durch die mechanische Behandlung eine Wertsteigerung. Um von dieser Wertsteigerung zu profitieren, wird in Forschung und Entwicklung investiert, sowohl in der Industrie als auch in den Hochschulen. Bei der Handhabung von Schüttgütern, dem Fördern, Lagern und Dosieren, entfällt dagegen eine Wertsteigerung, da die Stoffeigenschaften ja nicht verändert werden. Was man erreichen kann, ist „höchstens“ eine Problembeseitigung, die für Entwickler und Forscher wenig attraktiv ist, vergleicht man sie mit der patentfähigen Entwicklung neuer Produkte und Verfahren.

Ein Silo, in dem Schüttgut zwischengelagert wird, stellt häufig nur ein einzelnes, unbedeutend erscheinendes Element zur Verwirklichung eines größeren Prozesses dar. In ihm wird kontinuierlich oder diskontinuierlich Schüttgut eingefüllt, das dann zu bestimmten Zeiten in vorgegebenen Mengen wieder abgezogen werden soll. Das geht nicht immer problemlos. Die bekannten Vorgänge der Brücken- oder Schachtbildung können zu unregelmäßigem Austrag führen oder diesen ganz zum Erliegen kommen lassen. Der Hammer, der neben dem Silo liegt, ist ein bekanntes Hilfsmittel, das häufig bei einer ungenügenden Silodimensionierung nachträglich herangezogen wird. Vor knapp vierzig Jahren bezeichnete der Autor dieses Geleitwortes in einer Monographie die Schüttgutlagerung in Silos als zu den Stiefkindern der Technik gehörend und resümierte, dass es oft so ist, dass ein Problem durch sein häufiges Auftreten gerne als gegeben hingenommen wird. Ist das heute besser geworden?

Die Charakterisierung und Handhabung von Schüttgütern ist heute fast überall fester Bestandteil in der verfahrenstechnischen Ausbildung an Universitäten, Fachhochschulen und Ingenieurschulen. Seit über zwanzig Jahren werden Seminare und Hochschulkurse angeboten, die über die Grundlagen und Anwendungsmöglichkeiten der Schüttguttechnik informieren. Die wesentlichen theoretischen Grundlagen sind bekannt, auf denen aufbauend eine gesicherte Silodimensionierung erfolgen kann. Die nötigen Informationen lie-

gen vor, werden aber häufig nicht beachtet oder auch nicht verstanden. Erst vermeidbare Fehlschläge, unnötige Mehrarbeit und Produktionsausfall sind häufig die Ursache für ein Umdenken bezüglich einer besseren, dem Schüttgut angepassten Silogestaltung.

Bei der verfahrenstechnischen Auslegung eines Silos ist ähnlich vorzugehen wie bei der Auslegung eines Wärmetauschers. Die Stoffdaten der am Wärmeaustausch beteiligten Fluide und die Wärmeströme müssen bekannt sein, um den Wärmeaustauscher, insbesondere die Wärmeübertragungsflächen, auszulegen. Die Vorgehensweise ist Stand der Technik. Die benötigten Daten liefern der VDI-Wärmeatlas oder Laborversuche. Ähnlich ist bei der Siloauslegung vorzugehen. Hierzu gibt es eine Theorie, nur leider keinen „VDI-Schüttgutatlas“. Desto wichtiger ist die Ermittlung der relevanten Schüttguteigenschaften. Sind diese bekannt, wird die Silogeometrie den gemessenen Schüttguteigenschaften angepasst, so dass ein sicherer Silobetrieb erreicht wird. Voraussetzung ist, dass die in Laborversuchen gemessenen Schüttguteigenschaften repräsentativ sind. Aber auch das gilt für den Wärmetauscher. Wenn es dort zum Fouling an den Wärmeübertragungsflächen kommt, haben sich die Parameter verändert und der Wärmetauscher erfüllt nicht mehr die an ihn gestellten Anforderungen, so wie ein gesicherter Silobetrieb bei einer Produktabweichung eventuell nicht mehr gewährleistet ist.

Einen „VDI-Schüttgutatlas“, dem sich quantitative Schüttgutdaten entnehmen lassen, wird es nie geben. Ein Fluid, dessen Zusammensetzung bekannt ist, hat immer dieselben Stoffdaten. Dies gilt für ein Schüttgut nur selten. Neben der chemischen Zusammensetzung, die zur Charakterisierung eines Fluids ausreicht, haben weitere Größen Einfluss auf die Schüttguteigenschaften, die durch die disperse Natur des Schüttgutes bedingt sind. Von Einfluss sind Partikelgröße, Partikelgrößenverteilung, Partikelform, Porosität und Feuchtigkeit, um nur einige zu nennen. Wollte man den Einfluss aller dieser Größen auf die für die Silodimensionierung relevanten Schüttguteigenschaften ermitteln, wären sehr viele Messungen nötig. Es ist deshalb sinnvoller, die relevanten Schüttguteigenschaften an repräsentativen Proben direkt zu messen. Dazu werden Schergeräte eingesetzt. Aber nur, wenn die Scherversuche korrekt durchgeführt werden, ist mit Daten zu rechnen, auf denen aufbauend eine gesicherte Silodimensionierung ermöglicht wird. Die Erfahrung zeigt, dass diese Voraussetzung häufig nicht erfüllt ist, woraus dann allzu schnell geschlossen wird, dass Scherversuche nur bedingt einsetzbar sind.

Ich würde die Schüttgutlagerung in Silos heute nicht mehr als Stiefkind der Technik bezeichnen. Die wesentlichen Grundlagen sind bekannt und es gibt eine ausreichende Bestätigung dafür, dass Silos, die gemäß dem heutigen Stand der Technik auf der Basis von Scherversuchen dimensioniert wurden, die gestellten Anforderungen erfüllen. Was noch als stiefmütterlich und damit verbesserungsfähig bezeichnet werden kann, ist die breite Anwendung, das Vertrauen in die Methode und die Notwendigkeit, sie anzuwenden. Das ist um so erstaunlicher, da der Anteil von Schüttgütern in der stoffverarbeitenden Industrie enorm hoch ist. So bezifferte vor einigen Jahren der Präsident der EFCE (European Federation of Chemical Engineering) den Anteil von Schüttgütern auf 60% aller in der chemischen Industrie Europas hergestellten Produkte. Bei weiteren 20% waren Schüttgüter bei der Herstellung beteiligt.

Das von Dietmar Schulze vorgelegte Buch wird helfen, das Schüttgutverständnis einem breiteren Publikum verständlich näher zu bringen. Seit seinem Studium an der Technischen Universität Braunschweig hat er sich kontinuierlich mit allen Aspekten der Schüttgutcharakterisierung, der Anwendung gemessener Schüttguteigenschaften auf die Silodimensionierung und den theoretischen Grundlagen der Schüttguttechnik befasst und zu allen Teilbereichen wertvolle Beiträge geliefert, die in einer großen Zahl von Veröffentlichungen dokumentiert sind. Besonders intensiv hat er sich mit der Ermittlung der relevanten Schüttguteigenschaften befasst, was u. a. zur Entwicklung eines Ringschergerätes führte, das heute als „Schulze Ring Shear Tester“ bekannt und weltweit im Einsatz ist. Schergeräten wird fälschlicherweise häufig nachgesagt, dass sie für viele Anwendungsfälle zu kompliziert und zeitaufwendig seien. Das ist nicht richtig. Je nach Aufgabenstellung und Problem lassen sich auch mit wenigen, aber dem Problem angepassten Versuchen Ergebnisse erzielen, die verlässlicher sind als solche, die aus empirischen Vergleichsversuchen oder aus der Anwendung sogenannter „simple tester“ resultieren.

Möge das Buch helfen, das Verständnis für Schüttgüter und durch sie verursachte Probleme zu verbessern. Das Buch äußert sich praktisch zu allen Problemen, die in der technischen Anwendung beim Lagern und Fließen von Schüttgütern auftreten können. Das breite Wissen basiert auf eigener Erfahrung bei der Messung von Schüttguteigenschaften, der Durchführung von Siloversuchen an selbst konzipierten Technikumsanlagen, der Beratung von Firmen beim Lösen existierender Probleme und der Planung neuer Siloanlagen und einem kontinuierlich und breit angelegten Literaturstudium.

Braunschweig, im Juli 2006

Jörg Schwedes

Vorwort zur dritten Auflage

Nachdem die ersten beiden Auflagen des vorliegenden Fachbuchs erfreulich gut angenommen wurden, ist nun im Rahmen der Anpassung an das E-Book-Format eine weitere Neuauflage notwendig, die die Gelegenheit bietet, Ergänzungen und Anpassungen vorzunehmen. Dies betrifft vor allem die Abschätzung der Spannungen in Trichtern, neue Erkenntnisse zum Silohupen und Silobeben sowie kleinere Erweiterungen, z. B. zur Auftriebskraft bei hohen Fluidichten und zur Richtungsabhängigkeit der Wandreibung. Außerdem sind einige Grundlagen zu Partikelgrößenverteilungen und deren Kennwerten hinzugefügt worden.

Die im Vorwort zur ersten Auflage geschilderte Situation gilt nach wie vor: Das in den 1960er bis 1980er Jahren erarbeitete Grundlagenwissen zur Schüttguttechnik gerät immer mehr in Vergessenheit. Dies betrifft sowohl die Forschung, indem Themen untersucht werden, zu denen es längst eine Antwort gibt, aber auch die Praxis, wo immer wieder Silos nach Gefühl oder Erfahrung gebaut werden, die dann im Betrieb Probleme zeigen. Insofern ist meine Motivation für eine neue Auflage groß.

Mein Dank gilt dem Springer-Verlag für die erneut angenehme und unkomplizierte Zusammenarbeit und die Entscheidung zur Herausgabe der dritten Auflage.

Wolfenbüttel, im April 2014

Dietmar Schulze

Vorwort

Das vorliegende Buch gibt einen Einblick in die Schüttguttechnik, angefangen von den Fließeigenschaften bis hin zum Fließen von Pulvern und Schüttgütern in Trichtern, Behältern und Silos. Neben den Grundlagen werden dem Leser neuere Erkenntnisse zum Verhalten der Schüttgüter vermittelt, wobei häufige Fragen, die dem Verfasser von Anwenderseite gestellt wurden, berücksichtigt werden.

Das angestrebte Niveau ist so, dass es einem breiten Kreis von interessierten Lesern eine verständliche Einführung in das Thema gibt. Der Inhalt baut zu einem großen Teil auf Beiträgen zu Seminaren, z. B. dem aktuellen GVC-Hochschulkurs „Vom Schüttgut zum Silo“ und Veranstaltungen zur Schüttguttechnik im Haus der Technik e. V., auf Tagungsbeiträgen und auf Vorlesungen an der Fachhochschule Braunschweig/Wolfenbüttel¹ auf.

Hinsichtlich der Themen „Messen von Fließeigenschaften“ und „Siloauslegung“ folgt der Inhalt vor allem den Arbeiten Jenikes, der vor über 45 Jahren eine heute noch angewendete Theorie zum Schüttgutfluss in Silos und mit dem Jenike-Schergerät die Grundlage für die quantitative Messung von Fließeigenschaften geschaffen hat. Ausgehend von diesen Arbeiten wurde einige Jahrzehnte an vielen Orten intensiv im Bereich der Schüttguttechnik geforscht, so dass hierzu einiges Wissen vorliegt. Leider ist zuweilen zu beobachten, dass die zum Teil weit über zwanzig Jahre alten Arbeiten zur Schüttguttechnik nicht bekannt sind oder nicht beachtet werden. Daher ist ein weiteres Ziel dieses Buches, einen Teil des bestehenden Wissens zu verbreiten und zu konservieren.

Hier wie im Titel des Buches werden bewusst die Worte „Pulver“ und „Schüttgut“ nebeneinander gesetzt, da in manchen Bereichen, z. B. in der Pharmazie, das Wort „Pulver“ geläufig ist, während man bei Schüttgut an Materialien wie Steinkohle oder Sand denkt. Zur Vereinfachung wird im Verlauf dieses Buches aber das Wort „Schüttgut“ verwendet, da es von seiner Definition her alle aus einzelnen Partikeln bestehenden Materialien umfasst, vom feinen Pulver über Granulate bis hin zu grobstückigen Schüttgütern.

Der erste Teil des Buches befasst sich mit dem Fließverhalten von Schüttgütern. Die Kenntnis der Fließeigenschaften eines Schüttgutes ist notwendig, um Trichter, Silos und andere schüttguttechnische Apparate und Vorrichtungen so auszulegen, dass keine Fließprobleme (Fließstörungen, Entmischung, ...) auftreten. Aber auch beim Handhaben von

¹ 2009 umbenannt in „Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften“

Schüttgütern im kleinen Maßstab, z. B. beim Füllen der Matrizen einer Tablettenpresse oder beim Dosieren kleiner Mengen, kommt es auf ein hinreichend gutes Fließverhalten an. Außerdem werden in zunehmendem Maße Angaben zur Beurteilung der Fließfähigkeit eines Produktes benötigt, u. a. im Rahmen von Vergleichsmessungen (z. B. Aussagen zur Auswirkung von Fließhilfsmitteln oder anderer Beimengungen auf das Fließverhalten), Produktentwicklung, Produktüberwachung und Qualitätssicherung.

Zur Messung verwendet man in der Schüttguttechnik vor allem Schergeräte, die man als die Standardmessgeräte der Schüttguttechnik bezeichnen kann. Der Erläuterung ihres Messprinzips wird in diesem Buch breiter Raum eingeräumt, denn Funktion und theoretischer Hintergrund von Schergeräten wird von Außenstehenden manchmal als kompliziert empfunden.

Im zweiten Teil wird das Schüttgut beim Fließen und während der Lagerung in Trichtern, Silos etc. betrachtet. Dazu gehört vor allem die Vorgehensweise zur Auslegung von Behältern, um Probleme wie z. B. Fließstörungen oder Entmischung zu vermeiden. Zusätzlich werden Möglichkeiten zur Silogestaltung, Spannungen in Schüttgütern, Austraggeräte und Austraghilfen behandelt, um Planern, Konstrukteuren und Betreibern von schüttguttechnischen Anlagen Hilfestellung zu geben.

Mein besonderer Dank gilt all denen, die mich beim Sammeln von Erkenntnissen und damit letztendlich bei der Erstellung dieses Buches unterstützt haben. Vor etwa zwanzig Jahren begann ich als Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Mechanische Verfahrenstechnik der TU Braunschweig, wo ich dank Unterstützung der Deutschen Forschungsgemeinschaft und unter Anleitung von Herrn Prof. Jörg Schwedes Eingang in die Welt der Schüttguttechnik fand. Die Erkenntnisse konnte ich anschließend in unserem gemeinsamen Ingenieurbüro „Schwedes + Schulze Schüttguttechnik“ sowie bei der Entwicklung eines neuen Ringschergerätes nutzen und vertiefen. Auch im Rahmen meiner Tätigkeit an der Fachhochschule Braunschweig/Wolfenbüttel² konnte ich, unterstützt u. a. durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft, die Niedersächsische Arbeitsgemeinschaft Innovative Projekte (AGIP) und die Fachhochschule selbst, durch weitere Forschungsarbeiten Erkenntnisse sammeln.

Dem Springer-Verlag gilt mein Dank für die angenehme und unkomplizierte Zusammenarbeit.

Wolfenbüttel, im Juli 2006

Dietmar Schulze

² 2009 umbenannt in „Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften“

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	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	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	Schüttgutedichte	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 Austragerräten	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
Korrekturen		E1
Symbolverzeichnis		513
Sachverzeichnis		519

Pulver und Schüttgüter treten in allen fast allen Industriezweigen auf, von der Pulverlackierung bis hin zu Lebensmitteln, von Nanopulvern und pharmazeutischen Stoffen bis hin zu Massengütern wie Zement, Kohle und Erz, von trockenen Stoffen wie Filterasche bis zu feuchten Schüttgütern wie Filterkuchen, Lehm und Ton. All diese Stoffe müssen transportiert, gelagert, dosiert oder anderweitig gehandhabt werden. Dabei spielt die Charakterisierung von Pulvern und Schüttgütern hinsichtlich der Fließeigenschaften eine wichtige Rolle u. a. im Rahmen der Produktentwicklung, der Kundenunterstützung und der Behandlung von Reklamationen.

Speziell beim Austragen von Pulvern und Schüttgütern aus Silos, Zuführtrichtern, Transportbehältern etc. können größere Probleme auftreten, z. B. durch Fließstörungen, Entmischung, Erschütterungen oder unregelmäßigen Fluss. Um diese Probleme zu vermeiden, sind Lösungen unter Berücksichtigung der Eigenschaften des Schüttgutes zu finden.

1.1 Häufig auftretende Probleme mit Schüttgütern

Silos, Zuführtrichter und andere Schüttgutbehälter sind häufig nicht der Schwerpunkt bei der Planung einer Anlage, da diese in der Regel wenig zur Wertschöpfung durch Veredelung oder Erzeugung eines Produktes beitragen. Andererseits können sie aber bei nicht sachgerechter Auslegung Anlagendurchsatz oder Produktqualität negativ beeinflussen. Trotzdem werden viele Schüttgutbehälter ohne Rücksicht auf das Verhalten des zu lagernden Schüttgutes gebaut. Dies führt zu den bekannten Effekten, z. B. zu Fließproblemen, die häufig an den Spuren von Hammerschlägen am Trichter zu erkennen sind (Abb. 1.1).

Auch bei der Handhabung von Schüttgütern im kleinen Maßstab (z. B. Dosieren) treten ähnliche Probleme auf wie die, die nachfolgend anhand von Silos dargelegt werden, denn die grundlegenden Gesetzmäßigkeiten sind in beiden Fällen gleich.

Abb. 1.1 Spuren von Hammerschlägen am Trichter – Zeichen für Fließprobleme



Abbildung 1.2 zeigt eine Reihe von Problemen, die beim Betrieb von Silos auftreten können. Ist die Auslauföffnung zu klein, kann sich ein stabiles Gewölbe (Brücke) bilden, so dass der Schüttgutfluss zum Erliegen kommt (Abb. 1.2a). Sind die Partikel groß im Verhältnis zur Auslauföffnung, liegt dies am Verkeilen der Partikel. Bei feinen Schüttgütern ist die Ursache die Festigkeit des Schüttgutes aufgrund von Haftkräften zwischen den Partikeln.

Ein weiteres Problem kann Kernfluss sein (Abb. 1.2b). Kernfluss tritt z. B. dann auf, wenn die Trichterwände nicht steil oder glatt genug sind. In diesem Fall kann das Schüttgut im gefüllten Silo nicht unmittelbar auf den Trichterwänden nach unten gleiten. Es bilden sich tote Zonen, und nur in einer Fließzone, die sich von der Auslauföffnung nach oben hin erstreckt, bewegt sich das Schüttgut nach unten. Wird der Silo als Puffer betrieben, bleibt das Schüttgut sehr lange in den toten Zonen und kann seine Eigenschaften verändern (z. B. verderben). Außerdem kann sich das Schüttgut in den toten Zonen so sehr verfestigen, dass es nicht mehr allein aufgrund der Schwerkraft ausfließen kann. Erkennbar ist dies an einem von der Auslauföffnung nach oben reichenden leeren „Schacht“ (Abb. 1.2c).

Kernfluss kann auch dazu führen, dass Teile des Produktes extrem kurze Verweilzeiten haben (Abb. 1.2d), so dass frisch eingefülltes Produkt sofort wieder abgezogen wird. Ein leicht mit Luft fluidisierbares Schüttgut (z. B. Mehl, Feinkalk) hat dadurch nicht die Zeit, sich zu entlüften, und wird wie eine Flüssigkeit ungebremst aus der Auslauföffnung schießen. Möglich ist dadurch eine erhöhte Staubbelastung der Umgebung bis hin zum Überfluten des Austraggerätes.

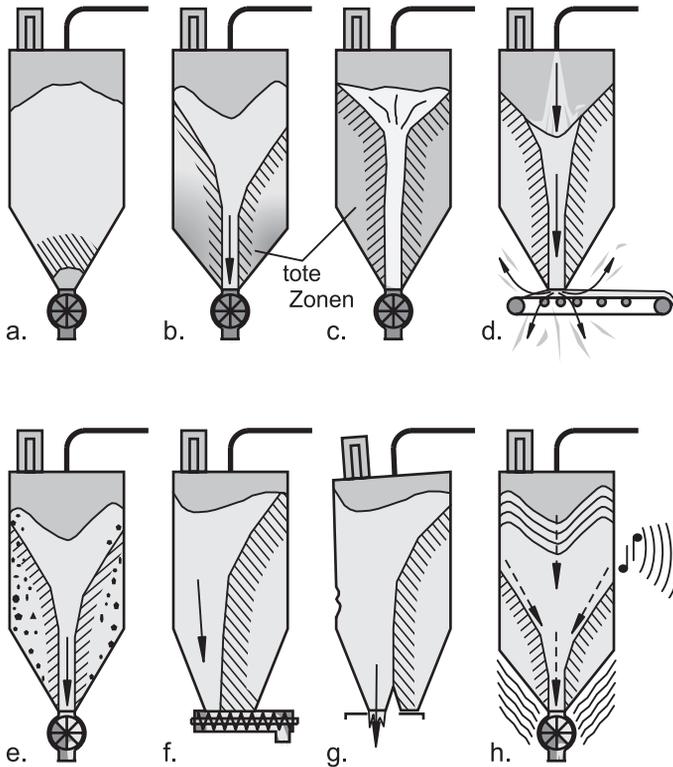


Abb. 1.2 Mögliche Probleme beim Betreiben von Silos; a. Brückenbildung; b. Kernfluss mit breiter Verweilzeitverteilung und Verschlechterung der Produktqualität; c. Schachtbildung; d. Schießen; e. Entmischung; f. Einseitiger Abzug durch Austraggerät; g. Beulen aufgrund von einseitigem Schüttgutfluss; h. Erschütterungen (Silobeben und Silohupen)

Kernfluss kann auch zur Verschlechterung der Produktqualität durch Entmischung führen (Abb. 1.2e). Beim Füllen eines Silos muss man stets damit rechnen, dass sich das Produkt über dem Siloquerschnitt entmischt. Bei zentraler Befüllung findet man meist die kleineren Partikel in der Siloachse und die größeren Partikel am Rand. Herrscht im Silo Kernfluss, wird zunächst das Produkt aus der Mitte (Feingut) ausfließen, während das gröbere Produkt vom Rand erst später folgt. Dadurch entsteht am Auslauf ein zeitlich entmischter Schüttgutstrom, was nicht nur beim Befüllen von kleinen Gebinden eine Qualitätsminderung darstellt, sondern auch den stationären Betrieb nachfolgender Prozesse unmöglich machen kann.

Austraggeräte können bei ungünstiger Gestaltung zum einseitigen Schüttgutabzug und damit zu Kernfluss führen. Der in Abb. 1.2f gezeigte Schneckenförderer füllt sich bereits am hinteren Ende mit Schüttgut, so dass weiter vorn kein weiteres Schüttgut abgezogen werden kann. Einseitiger Schüttgutabzug kann auch andere Ursachen haben, z. B. die Benutzung nur einer von mehreren Auslauföffnungen (Abb. 1.2g). Einseitiger Schüttgutfluss führt zu einer ungünstigen unsymmetrischen Belastung der Silostruktur. Damit vergrößert sich bei dünnwandigen Metallsilos die Gefahr des Beulens der Silowand.

Beim Fließen des Schüttgutes im Silo kann es aufgrund verschiedener Ursachen zu Erschütterungen kommen (Abb. 1.2h). Bei niedriger Frequenz spricht man von Silobeben, bei hörbaren Frequenzen von Silohupen.

Die beschriebenen Probleme resultieren zum einen aus apparativen Gegebenheiten (z. B. Form des Austraggerätes), zum anderen aus den Eigenschaften des Schüttgutes (Festigkeit, Reibung). Bei der Gestaltung von Silos, Zuführtrichtern, Behältern etc. oder bei der Optimierung von Pulvern und Schüttgütern ist also zuerst das Verhalten des Schüttgutes zu bestimmen. Dieses führt dann über die Anwendung fundierter Auslegungsverfahren zu einer geometrischen Form (Trichter, Auslaufgröße). Daher beschäftigt sich dieses Buch sowohl mit den Fließeigenschaften von Schüttgütern und ihrer Messung als auch mit Auslegungsverfahren (z. B. Spannungen, Vermeiden von Fließproblemen) und der konstruktiven Gestaltung (z. B. Trichterformen, Schüttgutaustrag).

1.2 Meilensteine der Schüttguttechnik

So wie die Gleichung von Bernoulli ein Meilenstein der Strömungsmechanik ist, so gibt es auch in der Schüttguttechnik zwei Namen, die erwähnt werden müssen und im Verlauf dieses Buches immer wieder auftauchen werden: Janssen und Jenike.

Janssen war Ende des 19. Jahrhunderts als Ingenieur in Bremen tätig, als immer größere Mengen Getreide aus Übersee importiert wurden und somit gelagert werden mussten. Aus den Vereinigten Staaten war die Lagerung von Getreide in Silos bekannt (Getreide war das erste in großen Mengen gelagerte Schüttgut, um 1900 folgten Zement und Mehl [1]). Die verfügbaren Bauhandbücher enthielten aber keine Bemessungsgrundlagen für Silos. Aus der Literatur [2, 3] wusste Janssen, dass die Spannungen in Silos wegen der Schüttgutreibung nicht wie in einer Flüssigkeit linear ansteigen, sondern dass sich im Silo ab einer bestimmten Füllhöhe die Spannung am Boden nicht weiter erhöht.

Um den Anstieg der Spannungen mit der Füllhöhe genauer zu untersuchen, erstellte Janssen den in Abb. 1.3 gezeigten Versuchsaufbau [4]. Silomodelle aus Holz mit quadratischen Querschnitten unterschiedlicher Seitenlänge wurden über einer Dezimalwaage aufgebaut. Bei verschiedenen Füllhöhen wurde die auf die Waage wirkende Kraft (und damit die Vertikalspannung) gemessen. Es bestätigte sich, dass die Vertikalspannung nicht proportional zur Füllmenge bzw. zum Füllstand war (Abb. 1.4). Das Schüttgut zeigte also nicht den für Flüssigkeiten typischen linearen Anstieg des Druckes mit der Füllhöhe.

Janssen erkannte, dass sich das Schüttgut über Reibung an der Silowand abstützt. Zur Messung des Reibungskoeffizienten zwischen Wand und Schüttgut verwendete er den in Abb. 1.5 gezeigten Aufbau, bei dem eine Platte des Silowandmaterials (Holz) unter verschiedenen Auflasten über das Schüttgut gezogen und die dazu erforderliche Kraft F gemessen wird. Außerdem entwickelte Janssen aus dem Kräftegleichgewicht an einer Schüttgutscheibe im Siloschaft eine Gleichung, mit der der Spannungsverlauf im Siloschaft berechnet werden kann. Diese „Janssen-Gleichung“ wird auch heute noch verwendet und

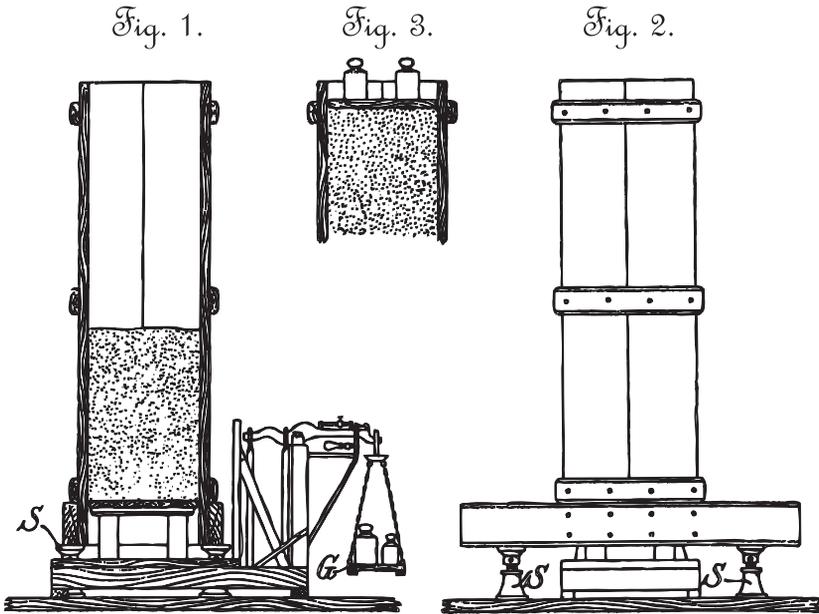


Abb. 1.3 Janssens Versuchsaufbau zur Messung der Vertikalspannung (Abb. entnommen aus [4])

Fig. 4.
Versuch 1.

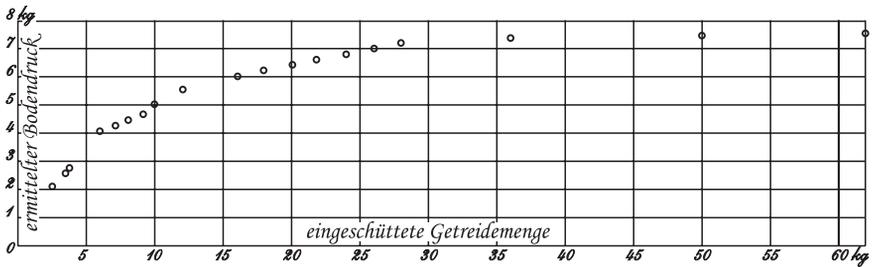


Abb. 1.4 Messergebnisse: Bodendruck (Vertikalspannung) in Abhängigkeit von der Menge des eingefüllten Getreides (Abb. entnommen aus [4])

Fig. 4.

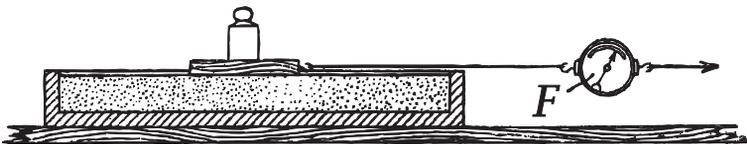
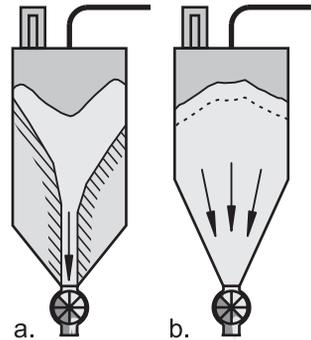


Abb. 1.5 Aufbau zur Messung der Reibung zwischen Schüttgut und dem Material der Silowand (Abb. entnommen aus [4])

Abb. 1.6 Kernfluss (a) und Massenfluss (b)



liegt vielen Normen zur Ermittlung der Lasten in Silos zugrunde, z. B. der alten deutschen Norm DIN 1055 Teil 6 [5] und der neuen „europäischen“ Norm DIN 1055-6:2005-03 [6]. Die Gleichung wird im Abschn. 9.2.1 näher betrachtet.

Dr. Andrew W. Jenike absolvierte 1939 ein Maschinenbaustudium in Warschau. Nach dem Zweiten Weltkrieg promovierte er 1949 in England, wanderte nach Kanada und später von dort in die USA aus. In den Fünfziger Jahren, nahe dem 40. Lebensjahr, war er auf der Suche nach einem Gebiet, auf dem man einen einzigartigen und herausragenden ingenieurwissenschaftlichen Beitrag leisten konnte. Er verbrachte ein Jahr, um etwa vierzig Forschungsgebiete zu untersuchen. Jenike entschied sich schließlich für die Schüttguttechnik, denn dort fand er ein besonders niedriges technisches Niveau vor. Mit Unterstützung von Forschungsgeldern baute er an der University of Utah in Salt Lake City ein „Bulk solids flow laboratory“ auf [7].

Aufbauend auf den Grundlagen der Bodenmechanik beschrieb Jenike das Verhalten von Schüttgütern mit Hilfe des Fließortes (engl.: yield locus). Außerdem erarbeitete er eine Theorie zur Beschreibung der Spannungen im Silo, insbesondere im Trichter [8, 9]. Jenike prägte die Begriffe Massenfluss und Kernfluss [10], die das wohl wichtigste Beurteilungskriterium für den Schüttgutfluss im Silo darstellen. Bei Kernfluss ist während des Schüttgutabzugs nur ein Teil der Schüttgutfüllung in Bewegung, während der Rest unbeweglich verharret und „tote Zonen“ bildet (Abb. 1.6a). Bei Massenfluss kommt dagegen beim Schüttgutabzug sämtliches Schüttgut im Silo in Bewegung (Abb. 1.6b).

Auf der Grundlage seiner Berechnungen entwickelte Jenike ein theoretisch fundiertes Verfahren, mit dem Silos für störungsfreien Schüttgutfluss ausgelegt werden konnten (s. Kap. 10). Von nun an war es möglich, die Wandneigung eines Trichters zu berechnen, die Massenfluss (Abb. 1.6b) ermöglichte, und die Auslaufabmessungen vorherzusagen, die zur Vermeidung von Brückenbildung (Abb. 1.2a) oder Schachtbildung (Abb. 1.2c) notwendig sind. Außerdem beschäftigte sich Jenike mit der praktischen Gestaltung von Silos, z. B. hinsichtlich des Zusammenwirkens von Austraggerät und Silo (s. Abb. 1.2f). Zur Bestimmung der Fließigenschaften, deren Kenntnis Voraussetzung zur Anwendung des Auslegungsverfahrens ist, entwickelte er ein Messgerät, das weithin als Jenike-Schergerät bekannt ist. Bis heute ist das Jenike-Verfahren das weltweit am meisten benutzte Auslegungsverfahren für Silos, obwohl in der Zwischenzeit auch andere Ansätze publiziert wurden.

Jenikes Arbeiten, insbesondere seine wichtigste Publikation, das Bulletin 123 „Storage and flow of solids“ [9], werden immer noch als grundlegende Literatur zum Thema Silo zitiert.

Mit der Beschreibung der Fließeigenschaften durch den Fließort und der Vorstellung eines geeigneten Messgerätes schuf Jenike die Grundlagen für die quantitative Ermittlung des Fließverhaltens (z. B. Fließfähigkeit), was weit über archaische, vergleichsweise ungenaue Methoden wie z. B. die Messung von Böschungswinkeln hinausgeht (s. Kap. 3 und 6).

Literatur

1. Hampe E (1987) Silos, Band 1, Grundlagen. VEB Verlag für Bauwesen, Berlin
2. Roberts I (1882) On the pressure of wheat stored in elongated cells or bins. *Engineering* 34:399
3. Roberts I (1884) Determination of the vertical and lateral pressures of granular substances. *Proc Royal Soc Lond* 36:225–240
4. Janssen HA (1895) Versuche über Getreidedruck in Silozellen. *Ztg Ver dt Ing* 39:1045–1049
5. DIN 1055 Teil 6 (1987) Lasten in Silozellen.
6. DIN EN 1991-4:2010-12 (2010) Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 4: Einwirkungen auf Silos und Flüssigkeitsbehälter. Deutsche Fassung EN 1991-4:2006
7. Jenike & Johanson, Inc. (2003) Newsletter Fall 2003 (www.jenike.com)
8. Jenike AW (1961) Gravity flow of bulk solids. Bull. No. 108. Engng. Exp. Station, Univ. Utah, Salt Lake City
9. Jenike AW (1964) Storage and flow of solids. Bull. No. 123. Engng. Exp. Station, Univ. Utah, Salt Lake City
10. Schwedes J (1970) Fließverhalten von Schüttgütern in Bunkern. Verlag Chemie, Weinheim

2.1 Partikel oder Kontinuum?

Ein Schüttgut setzt sich aus einzelnen Partikeln zusammen. Grundsätzlich besteht daher die Möglichkeit, zur Beschreibung des Schüttgutverhaltens die Kräfte zwischen den einzelnen Partikeln zu betrachten. Wie man leicht nachvollziehen kann, ist dies aber ein schwieriges und aufwendiges Unterfangen, denn die Zahl der in einem technischen System zu betrachtenden Partikel ist in der Regel sehr groß. So sind z. B. ca. 10^9 Partikel mit dem Durchmesser $10\ \mu\text{m}$ (sprich „Mikrometer“, nicht „Mükrometer“ [1]) in einem Kubikzentimeter enthalten. Außerdem hat jedes Partikel eine andere Form, und die Haftkräfte zwischen einzelnen Partikeln sind kaum genau wiederzugeben. Auch wenn seit einigen Jahren zunehmend entsprechende Berechnungen (Diskrete Elemente Methode) durchgeführt werden, sind diese aufgrund der verfügbaren Rechenleistung hinsichtlich der Anzahl der Partikel und der Komplexität und Vielfalt der Partikelform begrenzt.

Die andere Betrachtungsweise ist die, das Schüttgut als ein Kontinuum anzusehen. Man betrachtet dazu nicht die Kräfte an den einzelnen Partikeln des Schüttgutes, sondern die Kräfte auf die Begrenzungsflächen einzelner Volumenelemente und die daraus folgenden Verformungen, ähnlich wie auch in der Strömungsmechanik oder der Festigkeitslehre. Kräfte zwischen einzelnen Partikeln werden dabei nur integral betrachtet. Die Volumenelemente werden hinreichend groß gegenüber den einzelnen Partikeln gewählt, so dass lokale Vorgänge an einzelnen Partikelkontakten nicht berücksichtigt werden müssen.

Die letztgenannte Betrachtungsweise, also die Anwendung der Methoden der Kontinuumsmechanik, ist die klassische Vorgehensweise in der Schüttgutmechanik, die in diesem Buch dargelegt wird. Dies gilt sowohl für die Messung von Fließeigenschaften, bei der üblicherweise Kräfte und Verformungen an einem definierten Schüttgutvolumen untersucht werden, als auch für Berechnungsverfahren.

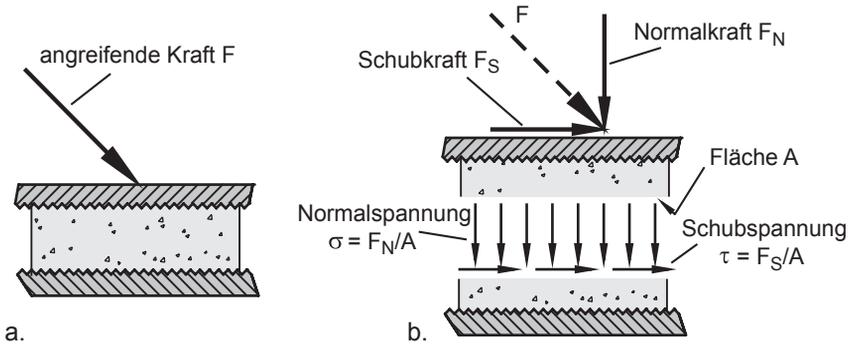


Abb. 2.1 a. Angreifende Kraft; b. Zerlegung in Komponenten; Spannungen in Schüttgut

2.2 Kräfte und Spannungen

Der Belastungszustand eines Schüttgutes wird wie in der Kontinuumsmechanik beschrieben, d. h., nicht die Kräfte an den einzelnen Partikeln des Schüttgutes werden betrachtet, sondern die Kräfte auf die Begrenzungsflächen einzelner Volumenelemente. Eine Kraft F beliebiger Richtung (Abb. 2.1) lässt sich aufteilen in:

- die Normalkraft F_N : Kraft senkrecht („normal“) zur Fläche A .
- die Schubkraft F_S : Kraft parallel zur Fläche A .

Um die Belastung des Schüttgutes unabhängig von der Größe der gerade betrachteten Fläche beschreiben zu können, berechnet man Spannungen. Eine Spannung ist wie ein Druck durch das Verhältnis von Kraft zu Fläche definiert. Bezieht man also die oben beschriebenen Kräfte F_S und F_N auf die Fläche A eines horizontalen Schnittes im Schüttgut, erhält man

- die Normalspannung $\sigma = F_N / A$: Spannung senkrecht („normal“) zur Fläche A ;
- die Schubspannung $\tau = F_S / A$: Spannung parallel zur Fläche A .

In der Schüttguttechnik hat man es meistens mit Druckspannungen zu tun, z. B. bei Lagerung eines Schüttgutes in einem Behälter. Das heißt, dass auf beliebige Flächenelemente innerhalb des Schüttgutes Normalkräfte ähnlich wie in Abb. 2.1 „drücken“. Zugkräfte treten in der Schüttguttechnik dagegen kaum auf. Daher sind in der Schüttguttechnik (im Gegensatz zur Technischen Mechanik, aber analog zum Druck in der Fluidmechanik) Druckkräfte als positive Kräfte und damit Druckspannungen als positive Normalspannungen σ definiert. Zugkräfte und Zugspannungen sind mit einem negativen Vorzeichen zu versehen. Für die Richtung der Schubspannungen gibt es ebenfalls Regeln, die hier aber nicht benötigt werden (Näheres s. [2, 3]).

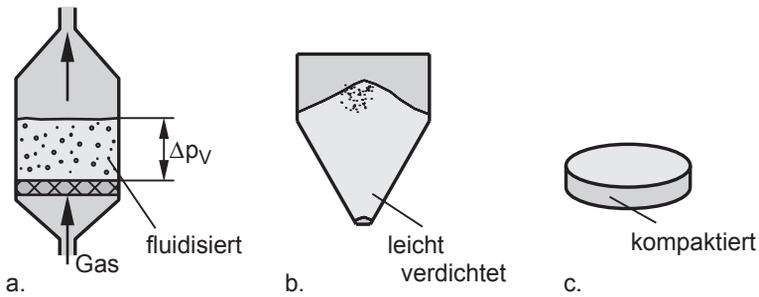


Abb. 2.2 a. Fluidisiertes Schüttgut (Wurbelschicht); b. Leicht verdichtetes Schüttgut (Behälter, Silo); c. Kompaktiertes Schüttgut (Tablette, Brikett)

Die für die Spannungen verwendete Einheit ist Pa (Pascal). 1 Pa ist gleich einem Newton pro Quadratmeter (1 N/m^2). 100.000 Pascal sind gleich einem bar.

2.3 Das Verhalten von Schüttgütern (Einführung)

Schüttgüter setzen sich aus einzelnen Festkörpern, den Partikeln, zusammen. Gegebenenfalls enthalten Schüttgüter in den Zwischenräumen (Poren) zwischen den Partikeln bzw. auf den Partikeloberflächen Flüssigkeiten wie z. B. bei feuchtem Sand, wodurch sich das Verhalten des Schüttgutes verändern kann. Trotzdem hat man es im Wesentlichen mit Festkörpern zu tun, wodurch das Verhalten des Schüttgutes geprägt wird.

Grundsätzlich kann ein und dasselbe Schüttgut völlig unterschiedliches Verhalten zeigen. Wird es fluidisiert und bildet eine Wurbelschicht (Abb. 2.2a), verhält es sich ähnlich wie eine Flüssigkeit. Allerdings ist hierzu immer ein strömendes Fluid, z. B. Luft oder Wasser, notwendig. Das Fluid erzeugt an den Partikeln nach oben wirkende Strömungskräfte, die der Gewichtskraft der Partikeln entgegenwirken. Für das ganze Schüttgutbett gilt dann, dass der Druckverlust Δp_v , der sich über der Schüttung einstellt, eine nach oben gerichtete Kraft erzeugt, die gleich der Gewichtskraft der Schüttung ist.

Ein durch Pressgranulation kompaktiertes Schüttgut, z. B. eine Tablette oder ein Brikett (Abb. 2.2c), ist formstabil und verhält sich wie ein Festkörper. Dieses Schüttgut in sich zum Fließen zu bringen wäre gleichbedeutend mit dem Zerschlagen dieses kompaktierten Körpers.

In den meisten Prozessen treten Schüttgüter weder fluidisiert noch kompaktiert auf, sondern müssen z. B. gelagert, gefördert oder dosiert werden. Sie sind dabei wie in Abb. 2.2b gewissen Spannungen (u. a. Druckspannungen) ausgesetzt, die z. B. in einem Silo durch die Schwerkraft entstehen, aber deutlich kleiner sind als die zum Kompaktieren benutzten Spannungen. Das Schüttgut befindet sich in diesen Situationen zwischen den beiden Extremen „fluidisiert“ und „kompaktiert“, also zwischen dem Verhalten einer (newtonschen) Flüssigkeit und dem eines Festkörpers. Man spricht daher von „leicht ver-

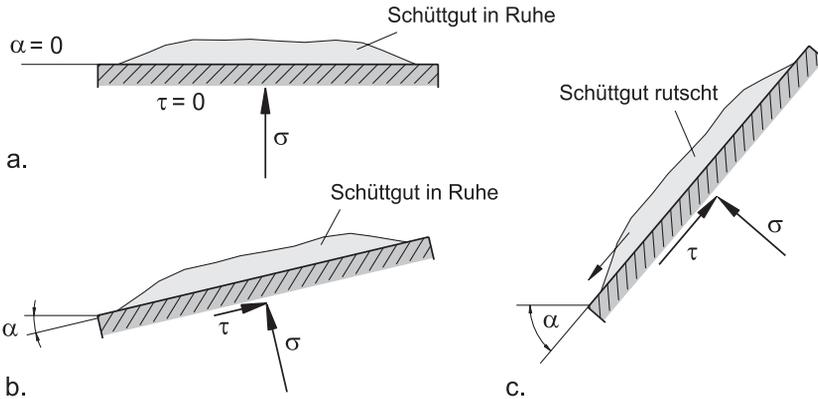


Abb. 2.3 Beispiele für Schubspannungen

dichteten Schüttgütern“ (Abb. 2.2b), um diesen Bereich zur Wirbelschicht (gar keine Verdichtung) und zur Pressgranulation (stark verdichtet) abzugrenzen.

Vorsicht ist geboten, wenn Analogien zwischen Flüssigkeiten und leicht verdichteten Schüttgütern aufgestellt werden. Dies wird im Folgenden an verschiedenen Phänomenen erläutert.

Befindet sich ein Schüttgut z. B. auf einer horizontalen Ebene (Abb. 2.3a) und ist nur der senkrecht zur Ebene wirkenden Schwerkraft unterworfen, wirkt (im Mittel) keine Schubspannung zwischen Ebene und Schüttgut. Das Schüttgut bleibt in Ruhe liegen.

Wird die Ebene um einen Winkel α zur Horizontalen geneigt, wird das Schüttgut abwärts rutschen, wenn die Neigung der Ebene zur Horizontalen hinreichend groß ist (Abb. 2.3c). Bei flacherer Neigung (Abb. 2.3b) wird das Schüttgut dagegen nicht rutschen. In beiden Fällen wirkt eine Schubspannung τ zwischen Schüttgut und geneigter Ebene, und zwar auf das Schüttgut in Richtung der in Abb. 2.3 eingezeichneten Pfeile. Ist die durch die Schubspannung auf das ruhende Schüttgut übertragene Kraft so groß wie die Kraft, die das Schüttgut zum Herunterrutschen bringen will (Hangabtriebskraft), herrscht statisches Gleichgewicht und das Schüttgut bleibt in Ruhe liegen. Ist die übertragbare Schubspannung zu klein, kommt das Schüttgut in Bewegung und rutscht auf der geneigten Ebene nach unten.

Die Größe der übertragbaren Schubspannung hängt mit der Reibung zwischen Schüttgut und Ebene zusammen: Eine Ebene mit rauer Oberfläche wird in der Lage sein, größere Schubspannungen zu übertragen als eine glattere Ebene, d. h., bei einer rauen Ebene würde das Schüttgut erst bei einer größeren Neigung α abrutschen als bei einer glatteren Ebene. Wäre die geneigte Ebene reibungsfrei („ideal glatt“), so würde das Schüttgut bei jeder Neigung $\alpha > 0^\circ$ abwärts rutschen, da die Ebene keine Schubspannungen übertragen könnte.

Der Unterschied zwischen Schüttgut und newtonscher Flüssigkeit wird auch am Druckverlauf in gefüllten Gefäßen A und B deutlich (Abb. 2.4). Der Druck in der ruhenden Flüssigkeit steigt linear nach unten hin an, wie es von der Hydrostatik bekannt ist, und bei

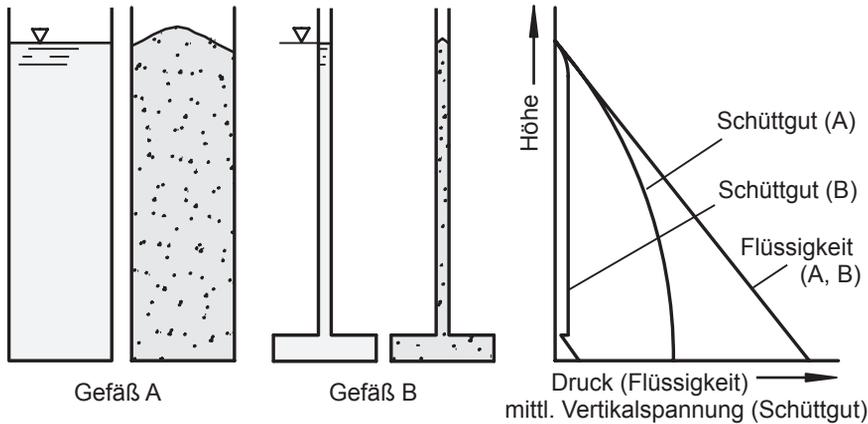
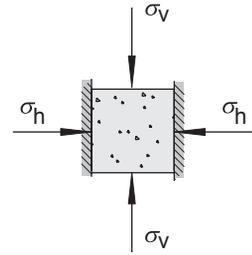


Abb. 2.4 Druckanstieg bzw. mittlere Vertikalspannung in mit Flüssigkeit bzw. Schüttgut gefüllten axialsymmetrischen Gefäßen gleicher Bodenfläche

gleicher Füllhöhe ist der Druck am Boden unabhängig von der Gefäßform, bei gleicher Bodenfläche auch die Kraft auf den Boden, was als hydrostatisches Paradoxon bekannt ist. Das Schüttgut dagegen kann auch in Ruhe Reibung bzw. Schubspannungen auf die Behälterwand übertragen (wie in Abb. 2.3b, und wie es schon Janssen nachwies, s. Kap. 1.2). Dadurch stützt die Behälterwand das Schüttgut über Reibung ab, so dass es beim Schüttgut zu einem weniger starken Anstieg der Vertikalspannung („Schüttgutdruck“) kommt. In hinreichender Tiefe innerhalb eines Bereichs mit konstanter Querschnittsfläche stellt sich sogar eine konstante Vertikalspannung ein, die umso größer ist, desto größer der Behälterquerschnitt ist.

Die Querschnittserweiterung im Gefäß B führt beim Schüttgut zunächst zu einer Abnahme der *mittleren* Spannung, da sich die von oben am Übergang wirkende Vertikalspannung rechnerisch auf einen größeren Querschnitt verteilt (Tatsächlich wird die Vertikalspannung über dem Querschnitt ungleichmäßig verteilt sein, und zwar von der Mitte nach außen hin abnehmen, was sich wachsendem Abstand vom Übergang zunehmend ausgleichen wird). Im Gegensatz zum Druck in der Flüssigkeit verteilt sich die am Übergang von oben wirkende Vertikalspannung also nicht unverändert auf den gesamten Querschnitt. Vom Übergang aus weiter nach unten hin erfolgt ein Spannungsanstieg, der in hinreichender (hier nicht vorhandener) Tiefe ähnliche Vertikalspannungen erzeugen wird wie im Gefäß A.

Ein weiterer Unterschied zwischen Flüssigkeit und Schüttgut in den Gefäßen (Abb. 2.4) ist die Richtungsabhängigkeit von Druck bzw. Spannung. Während der statische Druck in der Flüssigkeit in allen Richtungen gleich ist, wirkt im Schüttgut in horizontaler Richtung eine andere Spannung als in vertikaler Richtung. Zur Verdeutlichung zeigt Abb. 2.5 ein Schüttgutelement in einem mit Schüttgut gefüllten Behälter, dessen Innenwände zur Vereinfachung als reibungsfrei angenommen werden. Außerdem wird die Gewichtskraft des Schüttgutes vernachlässigt. In vertikaler Richtung wirkt auf das Schüttgutelement von oben und unten die positive Normalspannung $\sigma_v > 0$ (Druckspannung).

Abb. 2.5 Schüttgutelement

Verhielte sich das Schüttgut wie eine ruhende newtonsche Flüssigkeit, würde in der horizontalen Richtung eine gleich große Spannung wie in der vertikalen Richtung (und allen anderen Richtungen) wirken. Tatsächlich stellt sich im Schüttgut aufgrund der vertikalen Belastung eine Spannung σ_h in der horizontalen Richtung ein, die kleiner ist als die Vertikalspannung σ_v . Das Verhältnis der Spannungen σ_h und σ_v ist als Horizontallastverhältnis λ (auch „Horizontalspannungsverhältnis“; international und in Normen zur statischen Auslegung von Silos wie z. B. [4] mit K bezeichnet) definiert:

$$\lambda = K = \frac{\sigma_h}{\sigma_v} \quad (2.1)$$

Typische Werte von λ bzw. K liegen im Bereich von 0,3 bis 0,6 [5].

Das Fließverhalten von newtonschen Flüssigkeiten wird mit der Viskosität beschrieben und im Prinzip wie in Abb. 2.6a gemessen, indem eine Flüssigkeitsschicht zwischen zwei Platten einem Schergefälle v/y unterworfen wird. Die dabei zu überwindende Schubspannung τ wird gemessen. Zur graphischen Darstellung des Fließverhaltens von Fluiden wird häufig die Schubspannung über dem Schergefälle (oder umgekehrt) aufgetragen. In Abb. 2.6b ist ein solches Diagramm mit einem typischen Verlauf für ein newtonsches Fluid aufgezeichnet. Außerdem sind entsprechende Verläufe für ein Schüttgut für zwei unterschiedliche Normalspannungen σ , die während der Messung aufgegeben werden (Abb. 2.6a), eingezeichnet.

Beim Schüttgut spielt das Schergefälle im Bereich der hier betrachteten Geschwindigkeiten, die bei typischen Fließvorgängen im Schüttgut auftreten, kaum eine Rolle. Die Schubspannung kann je nach Material mit zunehmendem Schergefälle konstant sein, aber auch leicht zu- oder abnehmen (s. Kap. 5.4), was aber in der Regel vernachlässigt wird. Dagegen ist die Normalspannung die wichtigste Einflussgröße auf die Schubspannung. Bedenkt man, dass ein Schüttgut aus Festkörpern besteht, die hier gegeneinander verschoben werden, ist das Ergebnis nicht verwunderlich. Bei den hier betrachteten Fluiden ist dagegen die Normalspannung (der Druck) von untergeordneter Bedeutung, und die wesentliche Einflussgröße ist das Schergefälle.

Wegen des wesentlichen Einflusses der Normalspannung ist ein Diagramm wie in Abb. 2.6b in der Schüttguttechnik unüblich. Stattdessen wird die Schubspannung über der Normalspannung aufgetragen.