



Dietmar Schulze

Pulver und Schüttgüter

Fließeigenschaften und Handhabung

4. Auflage



VDI

 Springer Vieweg

VDI-Buch

Chemische Technik/Verfahrenstechnik

Weitere Bände in der Reihe <http://www.springer.com/series/5301>

Dietmar Schulze

Pulver und Schüttgüter

Fließeigenschaften und Handhabung

4., ergänzte Auflage

Dietmar Schulze
Ostfalia Hochschule für Angewandte
Wissenschaften
Wolfsburg, Deutschland

ISSN 2512-5281 ISSN 2512-529X (electronic)
VDI-Buch
ISSN 2627-3144 ISSN 2627-3152 (electronic)
Chemische Technik/Verfahrenstechnik
ISBN 978-3-662-58775-1 ISBN 978-3-662-58776-8 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-58776-8>

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 GmbH Deutschland, ein Teil von Springer Nature 2006, 2009, 2014, 2019

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 allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag, noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Springer Vieweg ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer-Verlag GmbH, DE und ist ein Teil von Springer Nature

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany

Geleitwort zur ersten Auflage

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 Monografie 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 liegen 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, sodass 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 Stoff verarbeitenden 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 vierten Auflage

Nachdem die ersten drei Auflagen des vorliegenden Fachbuchs erfreulich gut angenommen wurden, bietet diese Neuauflage die Gelegenheit, weitere Ergänzungen und Anpassungen vorzunehmen. Den größten Anteil daran haben die statistischen Methoden zur Untersuchung des Mischungszustandes im Hinblick auf die Quantifizierung von Entmischungerscheinungen, was auch Probenahme und die statistische Beurteilung von Lieferungen hinsichtlich ihrer Zusammensetzung beinhaltet. Weiterhin wurden weitere Diagramme zur Siloauslegung ergänzt, die zum Teil vom Verfasser berechnet wurden und über den Umfang der Diagramme von Jenike hinausgehen. Dazu gibt es Erweiterungen u. a. zu den Themen Grundlagen, Messverfahren, Spannungsberechnung und Spannungsmessung, Austraggeräte und Auslaufmassenstrom.

Die im Vorwort zur ersten Auflage geschilderte Situation gilt nach wie vor: Das in den 1960er bis 1980er Jahren erarbeitete Grundlagenwissen zur Schüttguttechnik droht immer mehr in Vergessenheit zu geraten. Zwar ist bei der Messung von Fließeigenschaften eine zunehmende Hinwendung zu ernsthaften Methoden wie Schergeräten festzustellen, aber noch immer werden Trichter und Silos nach Gefühl oder Erfahrung gebaut, die dann im Betrieb Probleme zeigen. Insofern ist meine Motivation für eine neue Auflage nach wie vor groß.

Im August 2018 verstarb Herr Prof. Dr.-Ing. Jörg Schwedes, dem ich persönlich sehr viel zu verdanken habe, denn er hat mich für die Schüttguttechnik begeistert. Als Doktorvater führte er mich zur Promotion, anschließend gründeten wir unsere gemeinsame Beratungsfirma Schwedes+Schulze Schüttguttechnik. Herr Prof. Schwedes war unter den ersten, die sich in Europa mit der Schüttgutmechanik befasst hatten, und über viele Jahrzehnte einer der weltweit bekanntesten Wissenschaftler auf diesem Feld. Darüber hinaus wurde er für seine Persönlichkeit und Freundlichkeit geschätzt.

Dem Springer-Verlag gilt mein Dank für die erneut angenehme und unkomplizierte Zusammenarbeit und die Entscheidung zur Herausgabe der vierten Auflage.

Wolfenbüttel
im Januar 2019

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, sodass 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

¹2009 umbenannt in „Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften“.

andere schüttguttechnische Apparate und Vorrichtungen so auszulegen, dass keine Fließprobleme (Fließstörungen, Entmischung, ...) auftreten. Aber auch beim Handhaben von 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, Ausraggeräte 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/Wolfenbüttel 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

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	18
2.4.1	Die wichtigsten Grundlagen zum Mohrschen Spannungskreis	18
2.4.2	Berechnungen zum Mohrschen Spannungskreis	21
2.5	Schüttgutedichte, Porosität und Sättigungsgrad	24
2.6	Statischer Auftrieb	28
2.7	Elastische und plastische Verformung	33
2.8	Haftkräfte	34
2.9	Einfluss der Partikelgröße auf das Verhalten des Schüttgutes	42
2.10	Partikelgrößenverteilungen	44
2.10.1	Verteilungssumme und Verteilungsdichte	44
2.10.2	Mengenart	47
2.10.3	Kennwerte von Partikelgrößenverteilungen	48
2.10.4	Umrechnung der Mengenart	49
	Literatur	50
3	Fließeigenschaften von Schüttgütern	53
3.1	Einachsiger Druckversuch als Modell	53
3.1.1	Verfestigung von Schüttgütern	53
3.1.2	Zeitverfestigung	55
3.1.3	Fließfähigkeit	57

3.1.4	Druckversuch mit Fließgrenze und Spannungskreisen	57
3.2	Prinzip der Messung mit Schergeräten	61
3.2.1	Messprozedur	61
3.2.2	Fließort und Fließeigenschaften	68
3.2.3	Zeitverfestigung (Caking)	79
3.3	Wandreibung	82
3.3.1	Messprozedur für Wandfließorte	83
3.3.2	Wandfließort und Wandreibungswinkel (kinematisch)	84
3.3.3	Zeitwandfließort, statische Wandreibung	85
3.4	Kennzahlen zur Charakterisierung der Fließfähigkeit	87
3.4.1	Die Fließfähigkeit ff_c	87
3.4.2	Bemerkungen zur Bezeichnung „Fließfähigkeit“	92
3.4.3	Weitere Zahlen zur Kennzeichnung der Fließfähigkeit	93
	Literatur	98
4	Praktisches Messen von Fließeigenschaften	99
4.1	Messungen mit Schergeräten	99
4.1.1	Messung von Fließorten mit dem Jenike-Schergerät	100
4.1.2	Messung von Fließorten mit dem Ringschergerät	107
4.1.3	Messung der Zeitverfestigung	111
4.1.4	Messung der kinematischen Wandreibung	113
4.1.5	Messung der statischen Wandreibung	117
4.1.6	Abriebmessung	117
4.1.7	Messung der Verdichtbarkeit	120
4.2	Festlegen der Spannungen	122
4.2.1	Fließorte (Fließfähigkeit)	122
4.2.2	Zeitfließorte (Fließfähigkeit bei Zeitverfestigung)	129
4.2.3	Wandfließorte (Wandreibung)	130
4.3	Anwendungsbezogene Messung von Fließeigenschaften	131
4.3.1	Vergleichsmessungen	131
4.3.2	Verfahrenstechnische Siloauslegung	131
	Literatur	132
5	Anmerkungen zum realen Verhalten von Schüttgütern	139
5.1	Anisotropie und Einfluss der Verformung	139
5.1.1	Spannungen	140
5.1.2	Schüttgutdichte	149
5.1.3	Druckfestigkeit (Schüttgutfestigkeit)	150
5.2	Scherverformung, Scherzonen, Lokalisation	153
5.2.1	Idealisierung: Einfaches Scheren und reines Scheren	153
5.2.2	Scherzonen und Scherbänder	156
5.2.3	Dilatanz	162

5.2.4	Stationäres Fließen und Dilatanz beim Messen von Fließeigenschaften	166
5.3	Fließborte	169
5.3.1	Anscherpunkt, Abscherpunkte und Spannungskreise	169
5.3.2	Zugfestigkeit und Kohäsion	172
5.3.3	Verhalten bei sehr kleinen Spannungen	176
5.4	Einfluss der Geschwindigkeit	180
	Literatur	181
6	Überblick über Messverfahren und Messgeräte	185
6.1	Einflüsse auf das Messergebnis	186
6.1.1	Prozedur und Hauptspannungen	186
6.1.2	Spannungen in der Messebene	188
6.2	Anforderungen an Messgeräte für Fließeigenschaften	190
6.3	Messverfahren (Übersicht)	191
6.3.1	Trichter	193
6.3.2	Böschungswinkel	194
6.3.3	Lawinenbildung (Avalanching)	196
6.3.4	Imse-Test	197
6.3.5	Fließfähigkeitsindex nach Carr	198
6.3.6	Rührer	199
6.3.7	Verdichtbarkeitsmessung	200
6.3.8	Cohesion Tester, Flowability Test	201
6.3.9	Penetration Test und Indentation Test	202
6.3.10	Einachsiger Druckversuch	203
6.3.11	Monoaxial Shear Test	204
6.3.12	Powder Bed Tester mit Zugfestigkeitsmessung	205
6.3.13	Einachsige Zugfestigkeitsmessung	206
6.3.14	Zugfestigkeitsmessung mit Gasströmung	207
6.3.15	Johanson Hang-up Indicizer™ ähnliche Messprinzipien	209
6.3.16	Quality Control Tester	211
6.3.17	Zweiachsiger Druckversuch (Biaxial compression test)	212
6.3.18	Jenike-Schergerät	213
6.3.19	Torsionsschergeräte	214
6.3.20	Ringschergeräte	215
6.4	Bemerkungen zu Aussagekraft und Genauigkeit	216
6.5	Messung von Haftkräften	221
6.6	Zusammenfassung	222
	Literatur	223

7	Spezielle Eigenschaften und Einflüsse auf das Fließverhalten	229
7.1	Effekte beim Fließen von Schüttgütern	229
7.1.1	Stick-Slip-Effekt durch Zeit- und Geschwindigkeitsabhängigkeit	229
7.1.2	Lage- und Wegabhängigkeit der Wandreibung	238
7.2	Einflüsse auf das Fließverhalten	240
7.2.1	Partikelgrößenverteilung	240
7.2.2	Fließhilfsmittel	241
7.2.3	Flüssigkeit, Feuchteanteil	245
7.2.4	Gasströmung	247
7.2.5	Partikelform	251
7.2.6	Agglomeratbildung	258
	Literatur	260
8	Beispiele gemessener Fließeigenschaften	263
8.1	Fließhilfsmittel	263
8.2	Feuchtigkeit	265
8.3	Temperatur	267
8.4	Zeitverfestigung	268
8.5	Feinheit	269
8.6	Abrieb	271
8.7	Schüttgutdichte	272
8.8	Spannungsabhängigkeit des Wandreibungswinkels	274
8.9	Wandreibungswinkel in Abhängigkeit vom Wandmaterial	276
8.10	Wandreibungswinkel in Abhängigkeit von der Richtung	278
	Literatur	282
9	Spannungen im Schüttgut	285
9.1	Spannungsverhältnisse bei der Lagerung in Silos	286
9.1.1	Horizontallastverhältnis	286
9.1.2	Spannungsverläufe	288
9.2	Berechnungsverfahren (Übersicht)	294
9.2.1	Berechnung der Spannungen im Siloschaft	295
9.2.2	Weitere Anwendungen der Janssen-Gleichung	302
9.2.3	Schüttguteigenschaften zur Spannungsberechnung mit der Janssen-Gleichung	308
9.2.4	Berechnung der Spannungen im Trichter	311
9.2.5	Abschätzung der Spannungen an der Auslauföffnung	333
9.2.6	Schüttguteigenschaften zur Berechnung der Spannungen im Trichter	333
9.2.7	Spannungsberechnung für das Gesamtsystem	334
9.3	Belastung von Austragern	335
9.3.1	Vertikalspannung an der Auslauföffnung	335
9.3.2	Abschätzen von Abzugskräften	338

9.4	Einflüsse auf die Spannungsverteilung	341
9.4.1	Lokale Querschnittsänderungen	342
9.4.2	Exzentrisches Fließen	349
9.5	Messen von Spannungen im Schüttgut	353
	Literatur	357
10	Verfahrenstechnische Siloauslegung	363
10.1	Fließprofile: Massenfluss und Kernfluss	363
10.2	Probleme beim Lagern von Schüttgütern in Silos	365
10.3	Das Auslegungsverfahren von Jenike	367
10.3.1	Auslegung von Massenflusssilos	368
10.3.2	Auslegung von Kernflusssilos	379
10.4	Andere Ansätze zur Brückenbildung	385
10.5	Anwendungen der Ergebnisse der Siloauslegung	389
10.6	Diagramme zur Siloauslegung	393
	Literatur	403
11	Silogestaltung	405
11.1	Einfluss der Fließeigenschaften auf die Silogestaltung	405
11.2	Trichtergestaltung	406
11.2.1	Trichterformen	406
11.2.2	Übergänge und Wandgestaltung	411
11.2.3	Mehrere Auslauföffnungen	414
11.2.4	Sonderfälle: Unterschiedliche Wandneigungswinkel	414
11.3	Einbauten	416
11.3.1	Verdrängende Einbauten	417
11.3.2	Trichterförmige Einbauten	419
11.3.3	Rohrförmige Einbauten	420
	Literatur	424
12	Schüttgutaustrag	427
12.1	Freier Auslauf und maximaler Massenstrom	427
12.1.1	Abschätzung des Auslaufmassenstroms grobkörniger Schüttgüter	429
12.1.2	Auslaufmassenstrom feinkörniger Schüttgüter	431
12.2	Austraghilfen	435
12.2.1	Pneumatische Austraghilfen	435
12.2.2	Mechanische Austraghilfen	438
12.2.3	Einsatz von Austraghilfen	439
12.3	Austraggeräte	441
12.3.1	Regeln zur Gestaltung hinsichtlich Massenfluss	441
12.3.2	Übersicht	444
12.4	Einsatz von Austraghilfen und Austraggeräten	464
	Literatur	467

13 Entmischung	471
13.1 Entmischungsmechanismen	471
13.1.1 Siebeffekt und andere Entmischungsmechanismen auf Böschungen	472
13.1.2 Perkolation bei Verformung des Schüttgutes	474
13.1.3 Flugbahn und Gasströmung	476
13.2 Reduzieren der Entmischung beim Lagern von Schüttgütern	480
13.2.1 Veränderung des Schüttgutes	481
13.2.2 Optimieren von Einfüllprozessen	481
13.2.3 Zusammenführen des entmischten Schüttgutes	486
13.3 Mischung – Entmischung	492
13.3.1 Beurteilung von Mischungen	492
13.3.2 Probenahme	514
13.3.3 Ausgesuchte Anwendungen	524
13.4 Schlussfolgerungen	527
Literatur	528
14 Erschütterungen und Schwingungen in Silos	531
14.1 Phänomen	531
14.2 Grundlegende Vorgänge	532
14.2.1 Erschütterungen als Ergebnis schlagartig bewegten Schüttgutes	532
14.2.2 Schlagartiges und pulsierendes Fließen durch Stick-Slip	534
14.2.3 Scherzonen im Silo	535
14.2.4 Beschleunigungs- und Verzögerungswellen	539
14.3 Erschütterungen durch Fließen des Schüttgutes	548
14.3.1 Scherzonen innerhalb des Schüttgutes	548
14.3.2 Erschütterungen durch veränderliche tote Zonen	553
14.3.3 Erschütterungen durch Fließen an der Silowand	556
14.3.4 Kombinationen verschiedener Mechanismen	558
14.3.5 Silohupen	558
14.4 Erschütterungen durch andere Ursachen	565
14.4.1 Großer Massenstrom	565
14.4.2 Zyklische Anregung durch das Austraggerät	565
14.4.3 Zusammenbrechende Brücken und Schächte	566
14.5 Maßnahmen zur Reduzierung von Silobeben und Silohupen	567
14.5.1 Verringerung der beschleunigten Masse	567
14.5.2 Regelmäßiges Auslösen von kleinen Erschütterungen	570
14.5.3 Erhöhung der Wandrauigkeit im Siloschaft	571
14.5.4 Vergleichmäßigung des Fließprofils	572

14.5.5	Umwandeln von Kernfluss in Massenfluss	573
14.5.6	Einbauten	574
	Literatur.	575
15	Beispielaufgaben mit Lösungen.	579
15.1	Allgemeine Hinweise zu den Aufgaben.	579
15.2	Aufgaben und Lösungen	579
15.2.1	Aufgabe 1: Spannungen im Siloschaft.	579
15.2.2	Aufgabe 2: Maximale Spannung im Massenflusssilo (Abrieb)	581
15.2.3	Aufgabe 3: Entleerungsrohr.	582
15.2.4	Aufgabe 4: Abzugskraft.	583
15.2.5	Aufgabe 5: Presse	584
15.2.6	Aufgabe 6: Spannungen bei Kombination von Behältern	586
15.2.7	Aufgabe 7: Spannungen in BigBags und gestapelten Säcken.	588
15.2.8	Aufgabe 8: Auslaufmassenstrom	589
15.2.9	Aufgabe 9: Auswahl eines Wandmaterials für Massenfluss	589
15.2.10	Aufgabe 10: Auslegung eines Massenflusssilos.	591
15.2.11	Aufgabe 11: Auslegung eines Kernflusssilos.	594
15.2.12	Aufgabe 12: Auslegung eines Silos bei Zeitverfestigung	599
	Literatur.	603
	Symbolverzeichnis.	605
	Sachverzeichnis.	611

Pulver und Schüttgüter treten in 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).

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



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. 1.2 zeigt eine Reihe von Problemen, die beim Betrieb von Silos auftreten können. Ist die Auslauföffnung zu klein, kann sich ein stabiles Gewölbe (Brücke) bilden, sodass 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), sodass frisch eingefülltes Produkt sofort wieder abgezogen wird. Ein leicht mit Luft fluidisierbares Schüttgut (z. B. Mehl, Feinkalk) hat dadurch

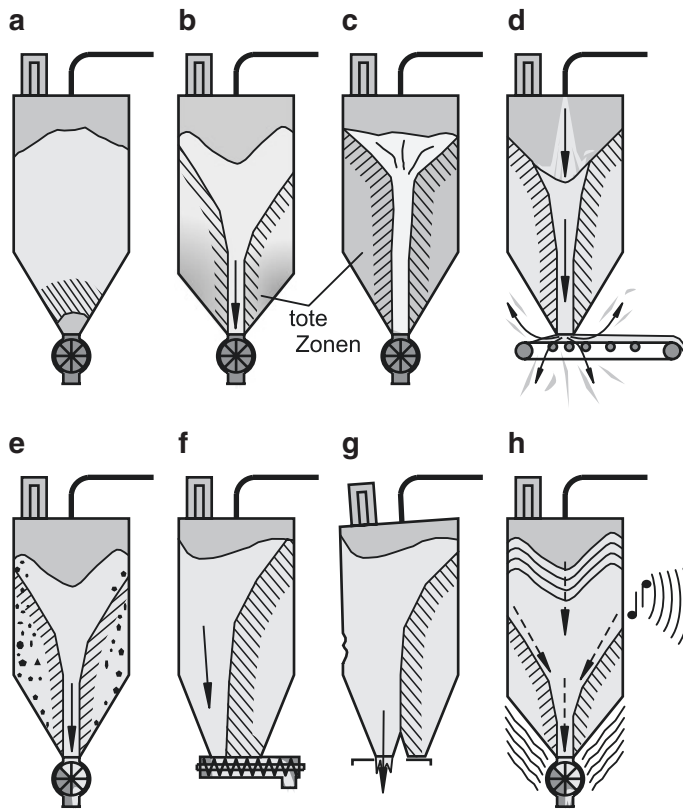


Abb. 1.2 Mögliche Probleme beim Betreiben von Silos; **a** Brückenbildung; **b** Kernfluss mit breiter Verweilzeitverteilung und Verschlechterung der Produktqualität; **c** Schachtbildung; **d** Schießen; **e** Entmischung; **f** Einseitiger Abzug durch Austraggerät; **g** Beulen aufgrund von einseitigem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

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.

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 zentrischer 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, sodass 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

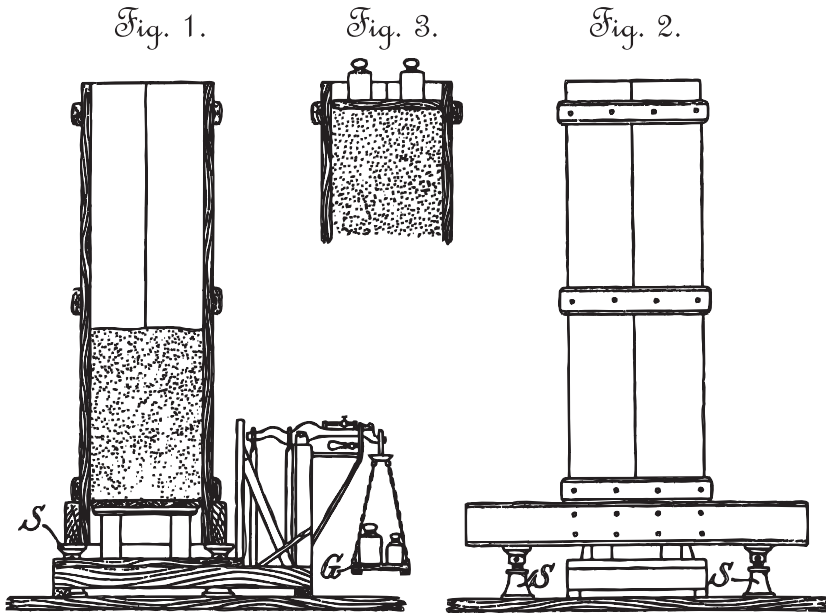


Abb. 1.3 Janssens Versuchsaufbau zur Messung der Vertikalspannung. (Abb. entnommen aus [4])

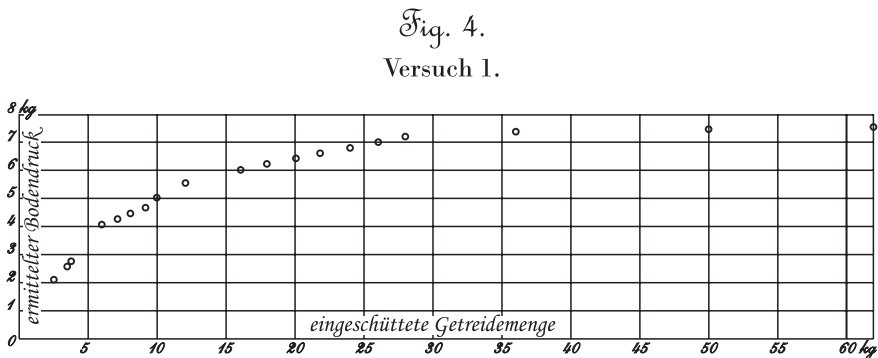


Abb. 1.4 Messergebnisse: Bodendruck (Vertikalspannung) in Abhängigkeit von der Menge des eingefüllten Getreides. (Abb. entnommen aus [4])

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 liegt vielen Normen zur Ermittlung der Lasten in Silos zugrunde, z. B. der

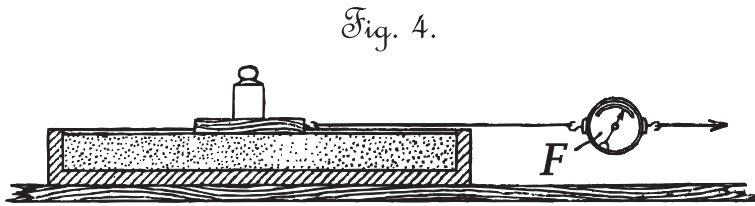


Abb. 1.5 Aufbau zur Messung der Reibung zwischen Schüttgut und dem Material der Silowand. (Abb. entnommen aus [4])

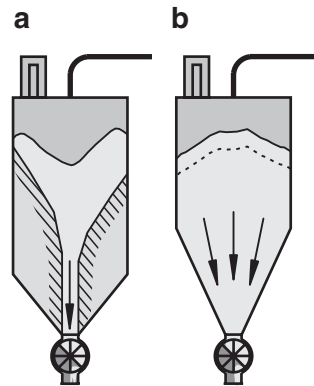
alten deutschen Norm DIN 1055 Teil 6 [5] und der neuen „europäischen“ Norm DIN 1055-6:2005-03 [6]. Die Gleichung wird im Abschn. 9.2.1 näher betrachtet.

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 mithilfe 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 verharrt 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 Fließeigenschaften, 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.

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



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, 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. 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 $10\text{ }\mu\text{m}$ (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, sodass 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.

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]).

Die für die Spannungen verwendete Einheit ist Pa (Pascal). 1 Pa ist gleich einem Newton pro Quadratmeter (1 N/m²). 100.000 Pa sind gleich einem bar.

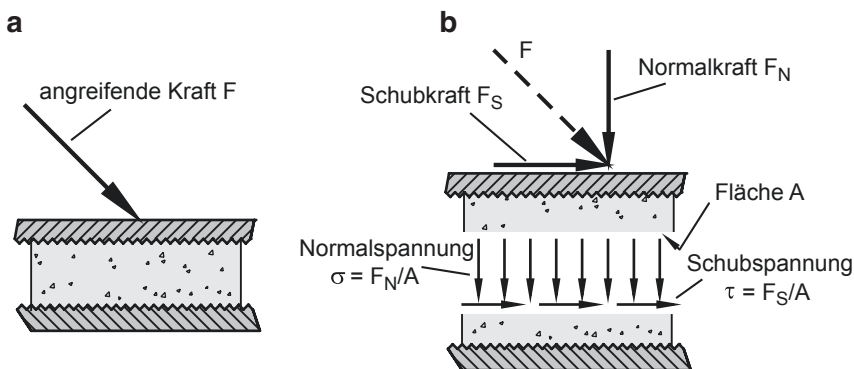


Abb. 2.1 a Angreifende Kraft; b Zerlegung in Komponenten; Spannungen in Schüttgut

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 Wirbelschicht (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 Zerschneiden 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 verdichteten 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.

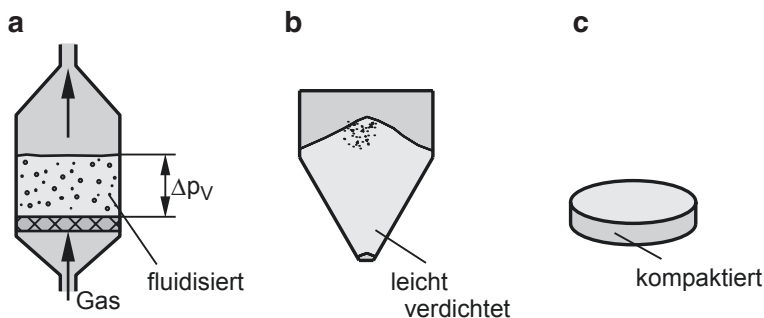


Abb. 2.2 a Fluidisiertes Schüttgut (Wirbelschicht); b Leicht verdichtetes Schüttgut (Behälter, Silo); c Kompaktiertes Schüttgut (Tablette, Brikett)

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 gleicher Füllhöhe ist der Druck am Boden unabhängig von der Gefäßform, bei gleicher Bodenfläche auch die Kraft auf den Boden, was als hydrostatisches Paradoxon

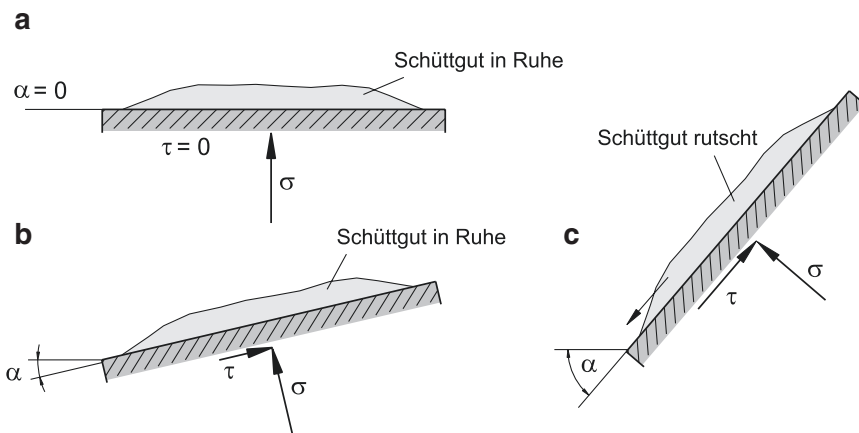


Abb. 2.3 Beispiele für Schubspannungen (Pfeile zeigen die Richtung der auf das Schüttgut wirkenden Normal- und Schubspannungen)

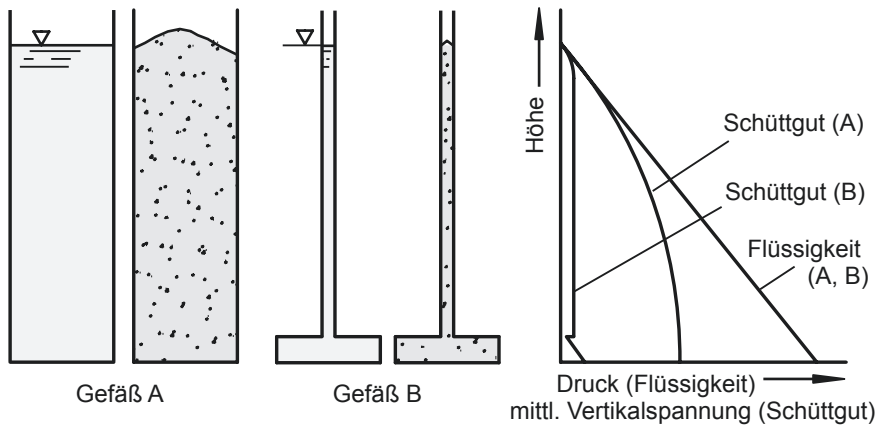


Abb. 2.4 Druckanstieg bzw. mittlere Vertikalspannung in mit Flüssigkeit bzw. Schüttgut gefüllten axialsymmetrischen Gefäßen gleicher Bodenfläche

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. Abschn. 1.2). Dadurch stützt die Behälterwand das Schüttgut über Reibung ab, sodass 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).