

Mehr Informationen zu Fließeigenschaften und Anwendungen finden Sie im Buch

Pulver und Schüttgüter – Fließeigenschaften und Handhabung

von Dietmar Schulze

4. Auflage 2019, erschienen bei Springer ([Link](#))



Lagern von Pulvern und Schüttgütern

Dietmar Schulze¹

Bei der Lagerung von Pulvern oder Schüttgütern in nicht sachgemäß gestalteten Silos treten häufig Probleme auf, die durch eine Auslegung nach schüttgutmechanischen Gesichtspunkten vermeidbar wären. Bei einer solchen Auslegung wird die Silokonstruktion den Eigenschaften des zu lagernden Produktes angepasst (eine Vorgehensweise, die bei anderen Apparatetypen, z.B. Wärmetauschern, die Regel ist). Der vorliegende Aufsatz befasst sich nach einer kurzen Darstellung der Probleme, die in schlecht ausgeführten Silos auftreten können, mit den Grundregeln zur Gestaltung von Silos.

1 Spannungen in Silos

Im Bild 1 sind Silos zusammen mit den dazugehörigen Druck- bzw. Spannungsverläufen gezeigt. Während man bei Flüssigkeiten gewöhnlich von Druck spricht, wird der „Schüttgutdruck“ im Folgenden als Spannung bezeichnet. Würde man einen Silo mit einer Flüssigkeit füllen, so würde der Druck linear nach unten hin unabhängig vom Siloquerschnitt und der Neigung der Wände zunehmen.

Dagegen ergibt sich in einem mit Schüttgut gefüllten Silo ein anderer Verlauf: Im Siloschaft steigt die Vertikalspannung nach unten hin immer weniger stark an, bis schließlich (bei hinreichend großem Höhe/Durchmesser-Verhältnis, in der Regel größer als 3) eine konstante Vertikalspannung erreicht wird. Dies bedeutet, dass die Vertikalspannung im Vertikalteil auch bei weit größeren Füllhöhen nicht weiter ansteigen würde. Ursache für diesen Verlauf sind die vom Schüttgut auf die Silowand ausgeübten Schubspannungen, die einen Teil des Schüttgutgewichts aufnehmen, und zwar auch dann, wenn das Schüttgut in Ruhe ist (Unterschied zu Fluiden!). Eine Methode zum Berechnen des Druckverlaufs im Siloschaft wurde schon 1895 von Janssen hergeleitet [1]. Dieselbe Methode liegt der heute gültigen Europäischen Norm [2] zur Berechnung der Wandbelastung für die festigkeitsmäßige Siloauslegung zugrunde.

¹ Prof. Dr.-Ing. Dietmar Schulze, Ostfalia University of Applied Sciences, Wolfenbüttel, Germany.
E-Mail: mail@dietmar-schulze.de, Internet: www.dietmar-schulze.de

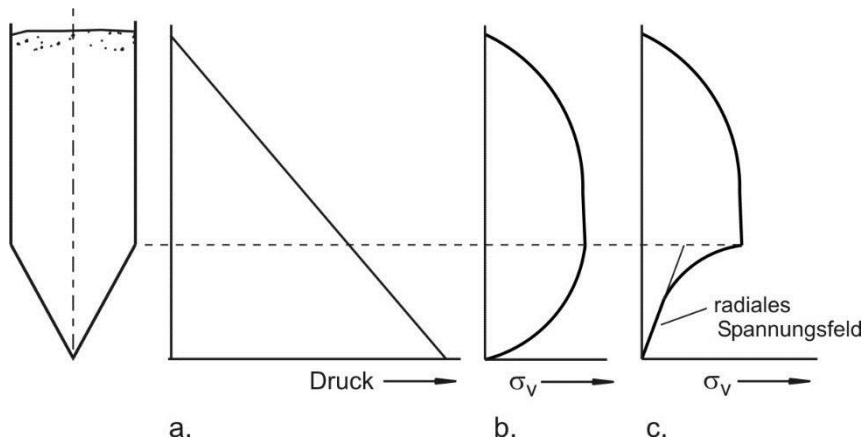


Bild 1: a. Druck in einem mit einer Flüssigkeit gefüllten Silo; b. Vertikalspannung nach dem Füllen eines Silos mit Schüttgut; c. Vertikalspannung nach dem Abzug von etwas Schüttgut aus dem Silo

Im Trichter ergeben sich andere Spannungsverläufe als im Vertikalteil. Unmittelbar nach dem Füllen eines leeren Silos, im sogenannten Füllzustand (auch: aktiver Spannungszustand, Bild 1.b), fällt die Vertikalspannung im Trichter zunächst wenig und in der Nähe zur (gedachten) Trichterspitze stärker ab.

Sobald das erste Mal Schüttgut aus dem Silo abgezogen wird, ändern sich die Spannungen im Trichter und der sogenannte „Entleerungszustand“ stellt sich ein (Bild 1.c; im Vertikalteil bleibt der oben erläuterte Spannungsverlauf im Prinzip erhalten). Das beim Schüttgutabzug nach unten fließende Schüttgut wird im Trichter in horizontaler Richtung zusammengedrückt, so dass die Trichterwand einen größeren Teil der Schüttgutlast aufnimmt. Die Vertikalspannung im Trichter fällt dadurch nach unten hin deutlich stärker ab als im Füllzustand. Im unteren Bereich des Trichters sind die Spannungen näherungsweise proportional zum Abstand von der (gedachten) Trichterspitze bzw. proportional zum örtlichen Trichterdurchmesser. Dieser lineare Spannungsverlauf wird als „radiales Spannungsfeld“ bezeichnet [3].

2 Fließprofile: Massenfluss und Kernfluss

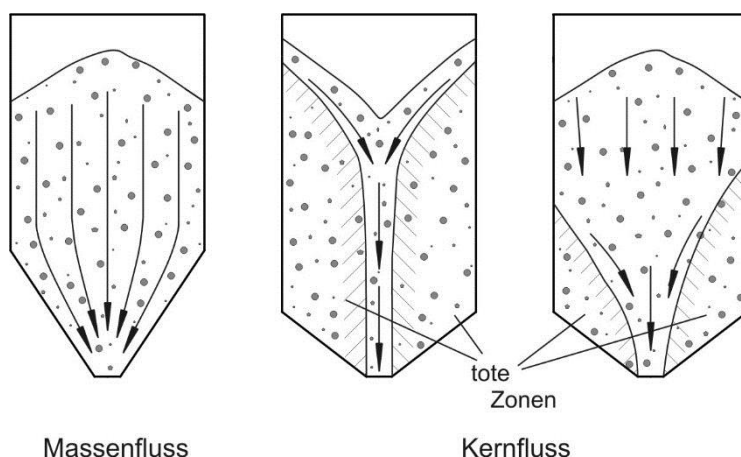


Bild 2: Massenfluss und Kernfluss

Fließt Schüttgut aus einem Silo aus, ist zwischen Massenfluss und Kernfluss zu unterscheiden (Bild 2.a). Bei Massenfluss ist der ganze Siloinhalt in Bewegung, wenn Schüttgut abgezogen wird. Massenfluss ist nur möglich, wenn die Trichterwände ausreichend steil und/oder glatt sind. Ist die Trichterwand dagegen zu flach oder zu rau, stellt sich Kernfluss ein. Bei Kernfluss (Bild 2.b) ist zunächst nur das Schüttgut im Bereich über der Auslauföffnung in Bewegung.

Das Schüttgut in den „toten Zonen“, die sich ausgehend von den Trichterwänden im Randbereich des Silos bilden, wird erst bei der völligen Entleerung des Silos ausgetragen. Die toten Zonen können bis zur Schüttgutoberfläche reichen, so dass sich dort ein Fließtrichter ausbildet und der Kernfluss von oben her deutlich als solcher zu erkennen ist. Es besteht aber auch die Möglichkeit, dass die toten Zonen nur im unteren Bereich des Silos sind, so dass sich durch Betrachtung der Schüttgutoberfläche nicht eindeutig auf das Fließprofil schließen lässt.

3 Probleme bei der Lagerung

Typische Probleme, die beim Lagern von Schüttgütern in Silos auftreten, sind:

- **Brückenbildung:** Bildet sich über der Auslauföffnung ein stabiles Gewölbe aus, so dass der Schüttgutfluss zum Erliegen kommt, spricht man von Brückenbildung (Bild 3.a). Bei feinkörnigem, kohäsivem Schüttgut ist die Ursache der Brückenbildung die auf den Haftkräften zwischen den einzelnen Partikeln beruhende Schüttgutfestigkeit. Bei grobkörnigen Schüttgütern kann es zu Brückenbildung aufgrund der Verkeilung von Einzelpartikeln kommen. Die Brückenbildung lässt sich durch eine hinreichend große Auslauföffnung vermeiden.

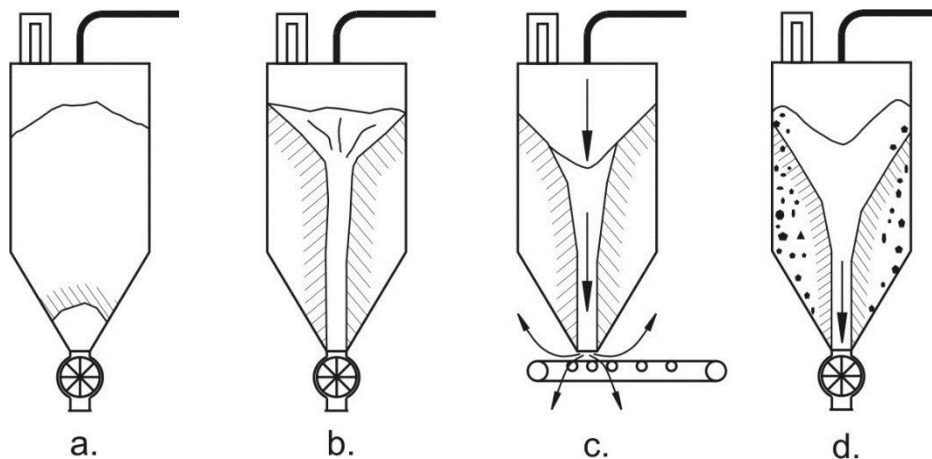


Bild 3: a. Brückenbildung, b. Schachtbildung, c. unregelmäßiger Fluss, d. Entmischung

- **Schachtbildung** entsteht in Kernflusssilos, indem nur das Schüttgut vertikal über der Auslauföffnung ausfließt. Das übrige Schüttgut - die toten Zonen - bleiben aufgrund der Schüttgutfestigkeit im Silo stehen und bilden einen „Schacht“ (Bild 3.b). Neigt das Schüttgut zur Zeitverfestigung, kann es sich in den toten Zonen, wo über lange Zeiten keine Schüttgutbewegung vorliegt, immer stärker verfestigen, so dass die Gefahr der Schachtbildung zunimmt. Im Extremfall ist das Schüttgut nur unter größtem Aufwand („bergmännisch“) wieder in Bewegung zu bringen.
- **Unregelmäßiger Fluss** entsteht, wenn sich beim Ausfließen des Schüttgutes kurzzeitig Brücken oder Schächte bilden, die sofort wieder einstürzen. Dabei können feinkörnige Schüttgüter beim Einstürzen der Brücken oder Schächte soviel Luft mitreißen, dass sie fluidisiert werden und wie eine Flüssigkeit aus dem Silo fließen. Diesen Vorgang bezeichnet man auch als „Schießen“. Das Schießen kann zu starker Staubentwicklung oder zum Überfluten der dem Silo nachgeschalteten Austrag- und Förderorgane führen und eine kontinuierliche Dosierung unmöglich machen. Schießen ist bei Kernfluss auch möglich, wenn während des Befüllens Schüttgut ausgetragen wird, aber aufgrund der kurzen Verweilzeit in der Fließzone keine hinreichende Entlüftung des Schüttgutes möglich ist.
- **Breite Verweilzeitverteilung:** Wenn sich im Silo tote Zonen ausbilden (Kernfluss), wird das Schüttgut, das beim Füllen in diese Zonen gelangt, erst beim völligen Entleeren

abgezogen, wogegen später eingefülltes Schüttgut sofort wieder ausgetragen wird. Damit ergibt sich eine breite Verweilzeitverteilung, die manchmal (z.B. bei der Lagerung verderblicher Schüttgüter) unerwünscht ist.

- **Entmischung:** Bildet sich beim Füllen des Silos ein Schüttkegel, ist eine Entmischung nach der Partikelgröße oder Partikeldichte möglich (Bild 3.c). Die größeren Partikeln gelangen bei zentrischer Befüllung nach dem Herabfallen in die Randzonen des Silos, während sich das Feingut im Zentrum ansammelt. Handelt es sich bei dem betreffenden Silo um einen Kernflusssilo, wird beim Entleeren zunächst das Schüttgut im Zentrum des Silos - also das Feingut - abgezogen, während gegen Ende der Entleerung vorwiegend Grobgut ausgetragen wird. Dieses würde z.B. bei einer dem Silo nachgeschalteten Sackbefüllung zu unterschiedlichen Qualitäten in den einzelnen Säcken führen. In einem Massenflusssilo dagegen fließt das beim Füllen entmischte Schüttgut im Trichter wieder zusammen, so dass an der Auslauföffnung die Entmischung nicht zu spüren ist.

In einem Kernflusssilo können grundsätzlich alle der genannten Probleme auftreten, während beim Massenflusssilo nur das Problem der Brückenbildung berücksichtigt werden muss: Entmischung, Schachtbildung, unregelmäßiger Fluss und Schießen des Schüttgutes treten in einem sorgfältig ausgelegten Massenflusssilo nicht auf, und die Verweilzeitverteilung ist eng.

Zur Auslegung eines Massenflusssilos sind zwei Schritte notwendig: Berechnung der erforderlichen Trichterwandneigung zum Erreichen von Massenfluss und Ermittlung der erforderlichen Auslaufgröße zur Vermeidung von Brückenbildung.

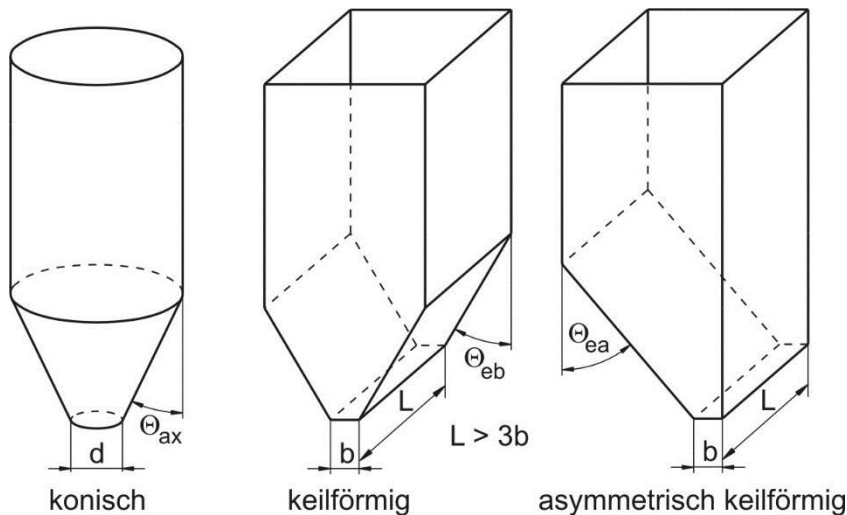
4 Verfahrenstechnische Siloauslegung

Für die Auslegung eines Massenflusssilos werden die Größen benötigt, die das Fließverhalten des zu lagernden Schüttgutes beschreiben [3–6]. Das sind im Wesentlichen die Schüttgutdichte ρ_b , der effektive Reibungswinkel μ (ein Maß für die innere Reibung des Schüttgutes), die Schüttgutfestigkeit σ_c und der Wandreibungswinkel φ_x . Für die Massenflussauslegung ist der Wandreibungswinkel φ_x die Haupteinflussgröße, während die bestimmende Größe für die Brückenbildung die Schüttgutfestigkeit σ_c ist. Der Wandreibungswinkel φ_x ist als Reibungswinkel zwischen der Wandoberfläche und dem betreffenden Schüttgut definiert, die Schüttgutfestigkeit σ_c ist die Druckfestigkeit einer Schüttgutprobe. Es ist zu berücksichtigen, dass alle genannten Schüttguteigenschaften vom Spannungsniveau abhängig sind, das durch die Verfestigungsspannung σ_1 repräsentiert wird [3–6].

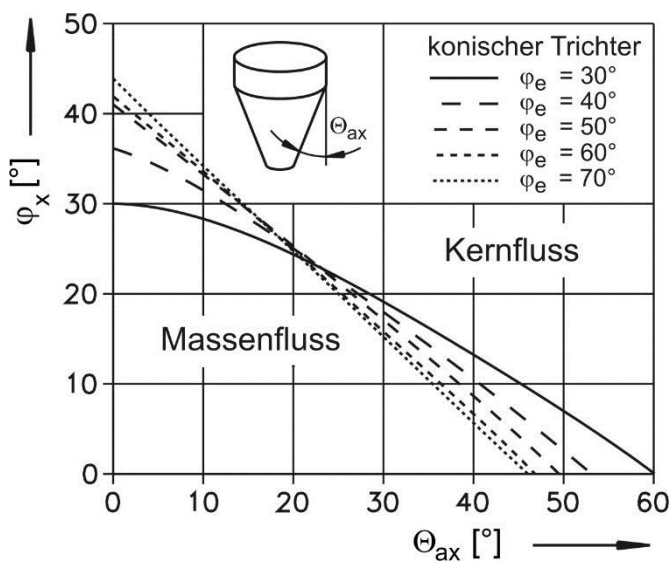
Mit Hilfe von Messungen – beispielsweise mit dem Ringschergerät oder dem Schergerät nach Jenike – werden die genannten Größen für das zu lagernde Schüttgut in Abhängigkeit von der Verfestigungsspannung σ_1 gemessen [3–6].

Unter Verwendung eines von Jenike [3] entwickelten Auslegungsverfahrens, das seine Gültigkeit seit den 1960er Jahren bewiesen hat, lassen sich mit Hilfe der Messwerte die für Massenfluss erforderliche Trichterneigung und die minimale Größe der Auslauföffnung zur Vermeidung von Brückenbildung festlegen.

Die Arbeiten Jenikes [3] befassen sich im Wesentlichen mit den Grundformen "konischer Trichter" und "keilförmiger Trichter" (Bild 4). Am Rande wird auch der asymmetrisch keilförmige Trichter behandelt; dieser hat aber hinsichtlich des Schüttgutflusses oder der Raumnutzung keine Vorteile gegenüber dem symmetrischen keilförmigen Trichter. Für alle keilförmigen Trichter wird vorausgesetzt, dass die Auslaufschlitzlänge L mindestens dreimal so groß ist wie die Auslaufschlitzbreite b ($L > 3b$). Ziel der Auslegung ist es, die notwendige Neigung der Trichterwand für Massenfluss zu ermitteln, und die Auslaufgröße so festzulegen, dass keine Fließprobleme durch Brücken- oder Schachtbildung entstehen.

**Bild 4:** Trichtergrundformen

Die aus den Berechnungen Jenikes [3] resultierenden Grenzen zwischen Massenfluss und Kernfluss sind im Bild 5 für die Trichtergrundformen Keil (keilförmiger Trichter) und Konus (konischer Trichter) dargestellt. Aufgetragen ist der Wandreibungswinkel φ_x über dem Neigungswinkel Θ der Trichterwand, der gegen die Vertikale gemessen wird. Parameter der Grenzkurven ist der effektive Reibungswinkel φ_e , der ein Maß für die innere Reibung des Schüttgutes ist.

**Bild 5.a:** Massenfluss-Kernfluss-Diagramm (konischer Trichter)

Zustände, die innerhalb der Grenzkurven liegen, führen zu Massenfluss, während bei Zuständen außerhalb Kernfluss vorliegt. Sind der Wandreibungswinkel φ_x und der effektive Reibungswinkel φ_e bekannt (aufgrund von Messungen z.B. mit einem Ringschergerät), lässt sich mit Hilfe dieses Diagramms der maximale Neigungswinkel Θ der Trichterwand gegen die Vertikale finden, bei dem Massenfluss erreicht wird. Der Verlauf der Grenzkurven ist derart, dass die Trichterwände für Massenfluss umso steiler (Θ kleiner) sein müssen, desto größer der Wandreibungswinkel φ_x ist. Der keilförmige Trichter erlaubt bei gleichen Stoffeigenschaften (φ_x , φ_e) größere Neigungswinkel Θ gegen die Vertikale, d.h., ein keilförmiger Massenflusstrichter kann flacher sein (meistens etwa 8° bis 10°) als ein konischer Massenflusstrichter [3, 5].

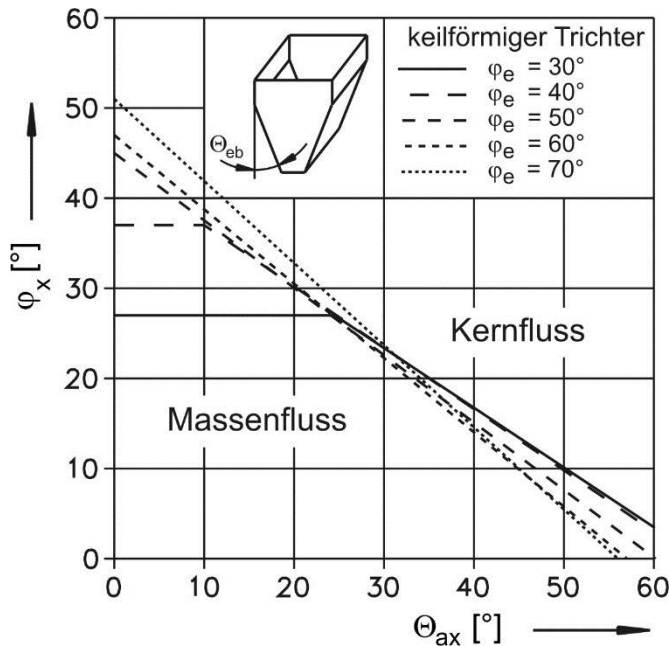


Bild 5.b: Massenfluss-Kernfluss-Diagramm (keilförmiger Trichter)

Wenn Schüttgut aus einem Massenflusssilo abgezogen wird, bildet sich im Trichter das bereits im Abschnitt 1 beschriebene radiale Spannungsfeld aus (Bild 1.c). Die größte Hauptspannung σ_1 ist im Trichter (zumindest in hinreichendem Abstand vom Siloschaft) proportional zum örtlichen Trichterdurchmesser und nimmt zur gedachten Trichterspitze zu Null hin ab (Bild 6). Die größte Hauptspannung σ_1 ist hier auch gleichzeitig die maßgebliche Verfestigungsspannung, d.h., sie bestimmt die örtlichen Eigenschaften des Schüttgutes.

Für ein Schüttgut lässt sich für jede Hauptspannung σ_1 (= Verfestigungsspannung) die dazugehörige Schüttgutfestigkeit σ_c messen (s. [6]). Der Zusammenhang $\sigma_c = f(\sigma_1)$ (Bild 7) heißt Fließfunktion. In der Regel ergibt sich ein Anstieg der Schüttgutfestigkeit mit der Verfestigungsspannung. Entsprechend dieser Abhängigkeit ist im Bild 6 für jede Spannung σ_1 die dazugehörige Schüttgutfestigkeit σ_c eingezeichnet.

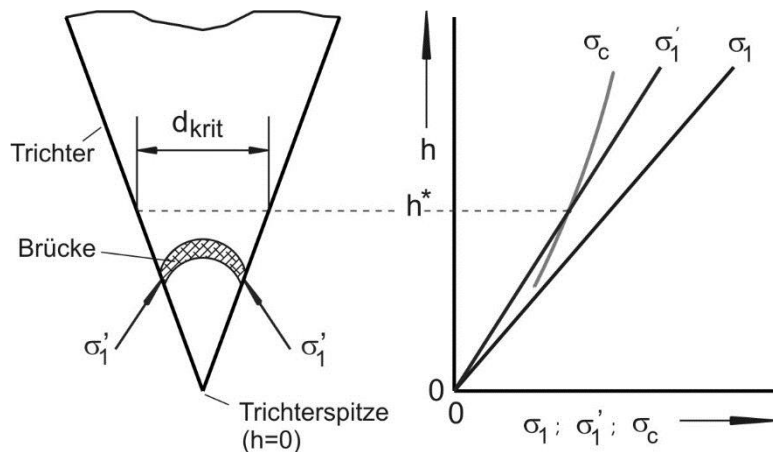


Bild 6: Spannungsverhältnisse im Trichter beim Entleeren

σ_1' ist die im Auflager einer Schüttgutbrücke wirkende Spannung, die man sich ähnlich wie die Auflagerspannung einer Straßenbrücke vorzustellen hat. σ_1' ist wie σ_1 proportional zum örtlichen Trichterdurchmesser. Eine stabile Schüttgutbrücke kann sich nur in dem Bereich des Trichters ausbilden, wo die Schüttgutfestigkeit größer ist als die Brückenaufspannung ($\sigma_c > \sigma_1'$), also unterhalb des Schnittpunktes der σ_c -Kurve mit der σ_1' -Kurve. Oberhalb des

Schnittpunktes ist die Schüttgutfestigkeit kleiner als die Brückenaufspannung, d.h., die Schüttgutfestigkeit ist in diesem Bereich nicht groß genug, um die Spannung im Auflager einer Schüttgutbrücke auszuhalten, und die Brücke wäre nicht stabil. Der gefundene Schnittpunkt gibt die Stelle im Trichter (Höhe h^* , Bild 6) an, wo entweder die Auslauföffnung angebracht werden muss oder, falls eine kleinere Auslauföffnung gewählt wird, bis wohin ausgehend von der Auslauföffnung Austraghilfen eingesetzt werden müssen [5]. Der bei h^* gefundene minimale Auslaufdurchmesser heißt „kritischer Durchmesser“ d_{krit} .

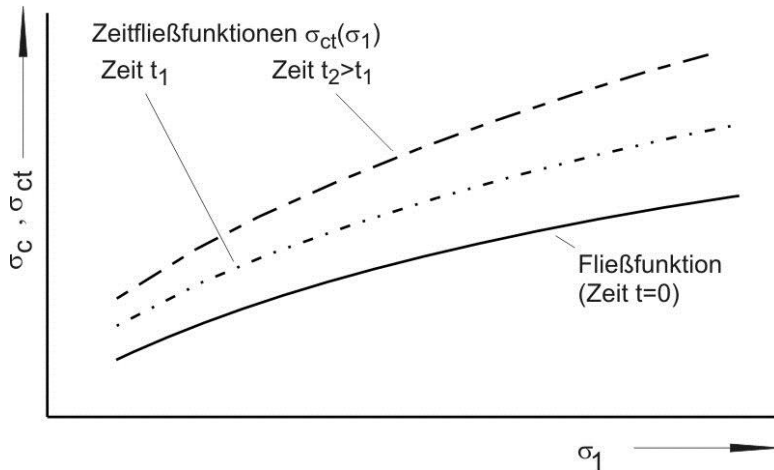


Bild 7: Fließfunktion und Zeitfließfunktion

Manche Schüttgüter neigen dazu, sich unter den Spannungen, wie sie im Silo herrschen, mit zunehmender Lagerzeit in Ruhe zu verfestigen (Zeitverfestigung [5, 6]). Für jede Lagerzeit findet man analog zur Fließfunktion eine Zeitfließfunktion $\sigma_{ct} = f(\sigma_1)$ (Bild 7). Würde man den Verlauf der Zeitfließfunktion in Bild 5 übertragen, so ergäbe sich ein Schnittpunkt der Kurven für σ_1' und σ_{ct} , der weiter oben (bei $h > h^*$, also einem größeren Trichterdurchmesser) wäre als der bereits erläuterte Schnittpunkt der Kurven für σ_c und σ_1' , d.h., mit zunehmender Lagerzeit in Ruhe sind immer größere Auslaufdurchmesser zur Vermeidung von Brückenbildung notwendig.

Für die praktische Auslegung von Silos hat Jenike Diagramme bzw. Gleichungen hergeleitet und publiziert, mit denen σ_1 und σ_1' ermittelt und schließlich die minimalen Abmessungen der Auslauföffnungen bestimmt werden. Damit lassen sich nicht nur konische Trichter, sondern auch keilförmige Trichter auslegen. Ein ähnliches Verfahren gibt es auch für die Berechnung von Auslaufabmessungen zur Vermeidung von Schachtbildung bei Kernfluss [3].

Beispiele zur Vorgehensweise bei der Auslegung sind in [3, 5] gezeigt. Je nach Spannungsabhängigkeit der Fließeigenschaften kann die Auslegung Iterationen erfordern und damit einen gewissen zeitlichen Aufwand. Abhilfe schaffen hier geeignete Programme, z. B. das vom Verfasser erstellte Programm CAHD – Computer-aided hopper design [7].

5 Auswahl der Trichterform

Die Berechnungen Jenikes (s. Auslegungsdiagramme, Bild 5) beziehen sich auf die Grundformen „konischer Trichter“ und „keilförmiger Trichter“, außerdem gibt es einige Ergebnisse zu asymmetrisch-keilförmigen Trichtern (Bild 4). Für diese Geometrien können die maximalen Wandneigungswinkel ϑ (ϑ_{ax} beim konischen, ϑ_{eb} bzw. ϑ_{ea} beim keilförmigen Trichter) für Massenfluss und die Auslaufgrößen d bzw. b zur Vermeidung von Brückenbildung ermittelt werden. Die der Berechnung des keilförmigen Trichters zugrundeliegende Vernachlässigung des Einflusses der Stirnwände ist erst bei einer Mindestlänge des Auslaufschlitzes gleich der dreifachen Auslaufschlitzbreite hinreichend erfüllt, d.h., die Verhältnisse des ebenen

Fließzustands gelten nur dann, wenn die Länge L des Auslaufschlitzes mindestens dreimal so groß ist wie seine Breite b .

Die Ergebnisse können auch auf andere Trichterformen angewendet werden, in denen sich Elemente der Grundformen wiederfinden. Einige Möglichkeiten zur Gestaltung eines Massensilos zeigt Bild 8 [3, 5, 8].

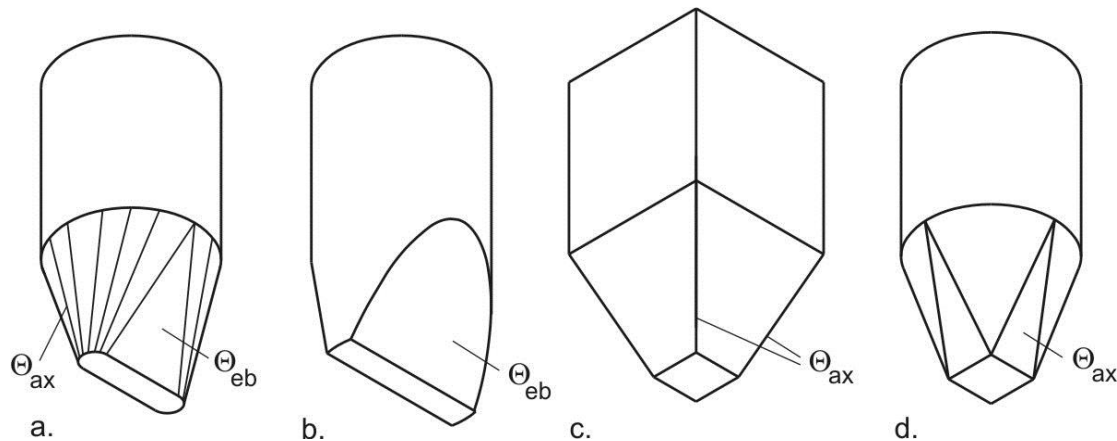


Bild 8: Silogeometrien [8]

Die Varianten a und b sind zum Erzielen von Massenfluss ähnlich günstig wie ein keilförmiger Trichter, wenn die im Bild angegebenen maximalen Neigungswinkel eingehalten werden. Die pyramidenförmige Trichtergeometrie (c) ist ungünstig, da hier das Schüttgut von oben in die Schnittkanten der Trichterwände und in diesen bis zur Auslauföffnung fließen müsste. Dabei wäre Reibung an zwei Seitenflächen zu überwinden. Dies ist schwierig, d.h., die Bildung toter Zonen in diesen Bereichen wird begünstigt. Um in einer solchen Trichterform Massenfluss zu erzielen, wären die Schnittkanten innen auszurunden, und ihre Neigung gegen die Vertikale dürfte maximal Θ_{ax} betragen. Da die Wände eines pyramidenförmigen Trichters immer steiler geneigt sind als ihre Schnittkanten, wäre ein für Massenfluss ausgelegter pyramidenförmiger Trichter immer steiler als ein entsprechender konischer Trichter. Daher ist diese Trichterform grundsätzlich ungünstig, um Massenfluss zu erreichen.

Variante d zeigt einen Übergang von einem zylindrischen Vertikalteil auf einen quadratischen Auslauf. Hier ist die Neigung der Trichterwände so festzulegen, dass der Wert Θ_{ax} an keiner Stelle überschritten wird.

Ein Vergleich der Wandneigungswinkel der einzelnen Formen zeigt, dass zum Erzielen von Massenfluss die Varianten in Bild 8.c/d am steilsten ausgeführt werden müssen. Etwas flacher kann der konische Trichter (Bild 4) ausgeführt werden, und die flachsten Wandneigungen ergeben sich bei den Geometrien in Bild 8.a/b sowie beim keilförmigen Trichter in Bild 4.

Manchmal werden auch heute noch schiefsymmetrische Silos favorisiert (z.B. pyramidenförmige Trichter mit vier unterschiedlich geneigten Wänden). Aus schüttgutmechanischer Sicht spricht nichts für eine derartige Geometrie, da der symmetrische Auslauftrichter unter der Voraussetzung von Massenfluss die geringste Höhe benötigt, um den Übergang vom Siloquerschnitt zum Auslaufquerschnitt herzustellen [9]. Unsymmetrische Trichter sollten daher nur Verwendung finden, wenn aus Platzgründen keine andere Möglichkeit besteht.

6 Anwendungen der Ergebnisse der Siloauslegung

Im Abschnitt 4 wurde in verkürzter Form die Siloauslegung beschrieben. Neben der Festlegung von Trichterneigung und Auslaufgröße können weit mehr Angaben gemacht werden. Einige Beispiele sind im Folgenden stichpunktartig aufgelistet (Weitere Beispiele zur Siloauslegung: [10–13]):

- Angaben der Trichterneigungswinkel und Auslaufgrößen für verschiedene Trichterformen (s. Bild 8) und Wandmaterialien. Damit ist der Vergleich der Herstellungskosten bei unterschiedlichen Trichterformen und -materialien möglich [11, 14]. Beispielsweise kann ausgesagt werden, ob für eine bestimmte Aufgabenstellung eine Auskleidung der Silowände (z.B. mit kaltgewalztem Edelstahlblech) eine kostenmäßig sinnvolle Alternative darstellt.
- Ergibt die Siloauslegung einen sehr steilen Massenflusstrichter, oder soll im Falle einer Sanierung in einem an sich zu flachen Trichter Massenfluss erreicht werden, bietet sich die Verwendung von Einbauten an, die ebenfalls auf der Grundlage der gemessenen Fließeigenschaften dimensioniert werden [15, 16].
- Bei schwankenden Stoffeigenschaften (z.B. unterschiedliche Feuchtigkeit [9, 17]) ist eine Aussage darüber möglich, welcher Zustand zu den ungünstigsten Fließeigenschaften führt. Wird der Silo für den ungünstigsten der möglichen Zustände ausgelegt, ist die Funktion immer gegeben.
- Bei Schüttgütern, die zur Zeitverfestigung neigen, ist eine quantitative Aussage darüber möglich, welche Auslaufgrößen nach welcher Lagerzeit in Ruhe erforderlich ist. So bietet beispielsweise ein Massenflusssilo die Möglichkeit, durch regelmäßiges Abziehen und wieder Einfüllen einer kleinen Menge des gelagerten Schüttgutes (teilweise Rezirkulation) das gesamte Schüttgut im Silo zu bewegen. Dadurch wird die Zeitverfestigung aufgehoben und das Schüttgut besitzt wieder die Eigenschaften ohne Zeitverfestigung. Mit dieser Maßnahme lässt sich die Zeitverfestigung des Schüttgutes und damit die erforderliche Auslaufgröße begrenzen [11].
- Aufgrund der Messung der Fließeigenschaften kann der Einfluss von Zusatzstoffen wie z.B. Fließhilfsmitteln ermittelt werden, um die optimale Zusammensetzung zu finden [11, 18].
- Bei der Lagerung empfindlicher Schüttgüter, bei denen durch die im Silo herrschenden Spannungen die Gefahr der Abriebbildung oder Produktveränderung besteht, kann im Rahmen der Messung der Fließeigenschaften untersucht werden, oberhalb welcher Spannung diese Gefahr besteht. Aufgrund dieser Daten lässt sich ein Silo so gestalten, dass nur Spannungen auftreten, die keinen negativen Einfluss auf die Produktqualität haben [12, 13].
- Zum Verhindern von Erschütterungen oder Schwingungen während des Schüttgutabzugs aus Silos lassen sich aufgrund der Schüttguteigenschaften spezielle Einbauten (Entleerungsröhre) dimensionieren [11, 19].
- Grundsätzlich lassen sich Messungen mit Schergeräten neben der Siloauslegung auch zur Qualitätskontrolle oder für Vergleichsmessungen einsetzen [18].

7 Zusammenfassung

Die verfahrenstechnische Auslegung von Silos ist genau wie die Auslegung anderer verfahrenstechnischer Anlagenkomponenten auf der Grundlage von Stoffeigenschaften und Berechnungsverfahren möglich. Da schlecht dimensionierte Silos zu Betriebsstörungen und zur Verminderung der Produktqualität führen können, ist die Silogeometrie stets auf der Grundlage der Stoffeigenschaften festzulegen. Der Aufwand zur Ermittlung der Schüttguteigenschaften zur verfahrenstechnischen Silodimensionierung ist gering gegenüber den Kosten, die durch Qualitätseinbußen, Stillstände, Nachrüstungen oder Umbauten des Silos entstehen.

8 Literatur

- [1] Janssen, H.A.: Getreidedruck in Silozellen, Ztg. Ver. dt. Ing. 39 (1895), S. 1045-1049
- [2] 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
- [3] Jenike, A.W.: Storage and Flow of Solids, Bull. No. 123, revised edition, Engng. Exp. Station, Univ. Utah, Salt Lake City (1970)
- [4] Schwedes, J.: Fließverhalten von Schüttgütern in Bunkern, Verlag Chemie, Weinheim (1968)
- [5] Schulze, D.: Pulver und Schüttgüter – Fließeigenschaften und Handhabung, 4. Aufl., Springer Verlag (2019)
- [6] Schulze, D.: Fließeigenschaften von Pulvern und Schüttgütern, <https://www.dietmar-schulze.de/pdf/fliesseigenschaften.pdf>
- [7] CAHD Computer-aided hopper design, Programm zur verfahrenstechnischen Siloauslegung, www.dietmar-schulze.de
- [8] Woodcock, C.R.; Mason, J.S.: Bulk Solids Handling, Leonard Hill, Glasgow and London (1987)
- [9] Schulze, D.; Schwedes, J.: Lagern und Fließen von Schüttgütern in Silos und Erkenntnisse für die Planung neuer Anlagen, VGB Kraftwerkstechnik 70 (1990) 9, S. 782-786
- [10] Schulze, D.: Feeders and Flow Promoting Devices, in: Silos – Fundamentals of Theory, Behaviour and Design, edited by C.J. Brown and J. Nielsen, publ. by E & FN Spon, London and New York (1998), S. 200–220 (ISBN 0-419-21580-8)
- [11] Schulze, D.; Schwedes, J.: Beispiele zeitgemäßer Siloauslegung, Zement-Kalk-Gips 44 (1991) 10, S. 497–503
- [12] Schulze, D.; Schwedes, J.; Leonhardt, C.; Kossert, J.: Schüttguttechnische Auslegung eines Silos zur Lagerung von 10.000 t Schwefel, Schüttgut 3 (1997) 3, S. 299–305
- [13] Kwade, A.; Schulze, D.: Proper Silo Design for Food Products - Today Strategies for Avoiding Segregation, Degradation and Hang-ups, PARTEC 98, Preprints „1st Europ. Symp. Process Technology in Pharmaceutical and Nutritional Sciences“, 10.–12.3.98, Nürnberg, S. 157–166
- [14] Schäfer, R.; Schröer, H.; Schwedes, J.: Auslegung einer Großsilo-Anlage für die Einlagerung eines feuchten Schüttgutes und praktische Erfahrungen. Zement Kalk Gips 75 (1986) 11, S. 587–592
- [15] Schulze, D.: Möglichkeiten der Silogestaltung, Schüttgut 1(1995) 1, S. 19–25
- [16] Johanson, J.R.: Controlling flow patterns in bins by use of an insert. Bulk Solids Handling 2 (1983) 3, S. 495–498
- [17] Schulze, D.; Schwedes, J.: Das Fließverhalten und die Silolagerung von REA-Gips, Chem.-Ing.-Techn. 63 (1991) 3, S. 256–257
- [18] Schulze, D.: Vergleich des Fließverhaltens leicht fließender Schüttgüter, Schüttgut 2 (1996) 3, S. 347–356
- [19] Schulze, D.; Schwedes, J.: Tests on the Application of Discharge Tubes, Bulk Solids Handling 12 (1992) 1, S. 33–39