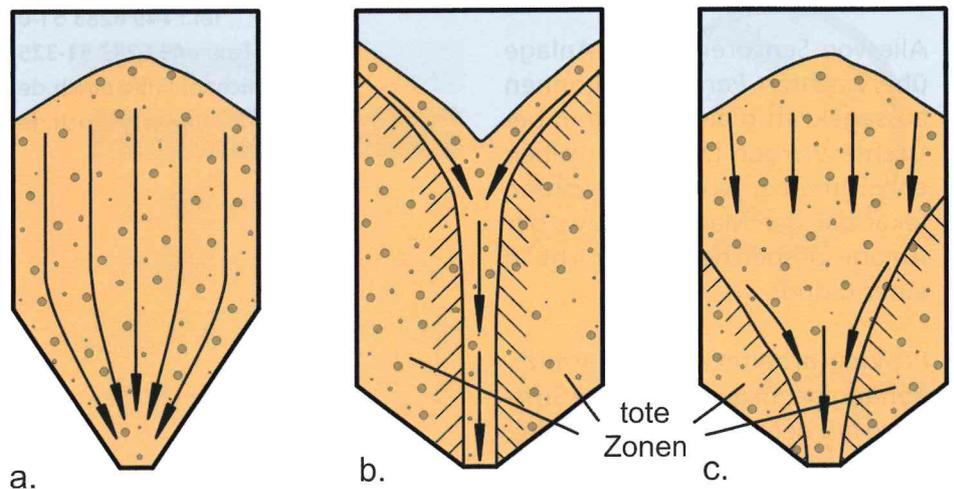


# Wandreibung – Verstehen, Messen und Anwenden

Von Prof. Dr.-Ing. Dietmar Schulze, Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften

Die Reibung zwischen einem Schüttgut und der Wand eines Silotrichters hat einen wesentlichen Einfluss auf die Funktion. Nur wenn die Wandreibung hinsichtlich der Neigung des Trichters klein genug ist, wird das Schüttgut während des Austrags entlang der Trichterwand fließen. So lässt sich Kernfluss mit den gefürchteten toten Zonen, die zu Anbackungen, Entmischung und anderen unerwünschten Ergebnissen führen, vermeiden.



**Bild 1.** a. Massenfluss bei hinreichend steilem Trichter; b./c. Kernfluss bei zu flachem Trichter; die Form der nicht bewegten toten Zonen hängt u. a. vom Schüttgut ab [2].

Im vorliegenden Aufsatz wird ein Überblick über die Auswirkung der Wandreibung, über ihre Messung sowie ihre Anwendung zur Auslegung von Trichtern gegeben. Dazu werden typische Einflussgrößen wie Rauigkeit oder Feuchte und ihre nicht immer allgemeingültige Auswirkung auf die Reibung diskutiert.

## 1. Das Ziel: Störungsfreier Schüttgutfluss

Für einen zuverlässigen Betrieb von Silos und Trichtern ist die Auslegung für Massenfluss Stand der Technik [1, 2]. Massenfluss bedeutet, dass sämtliches Schüttgut im Behälter während des Schüttgutaustrags in Bewegung kommt (Bild 1.a). Treten dagegen tote Zonen auf, in denen das Schüttgut wäh-

rend des Schüttgutabzugs nicht fließt, liegt Kernfluss vor (Bild 1.b/c). Kernfluss ist die Quelle der meisten Probleme, die in Silos und Trichtern entstehen, vor allem Auslaufstörungen durch Schachtbildung, Entmischung, Schießen des Schüttgutes und breite Verweilzeitverteilung. Massenfluss wird erreicht bzw. Kernfluss vermieden, wenn die Trichterwand hinreichend steil ist und das Schüttgut über der gesamten Auslauföffnung abgezogen wird.

Wie steil die Trichterwand sein muss, um Massenfluss zu erzielen, hängt neben der Trichtergrundform (konisch, keilförmig) vor allem von der Wandreibung ab. Wandreibung ist die Reibung zwischen Schüttgut und einer Festkörperoberfläche (z. B. Trichterwand). Sie

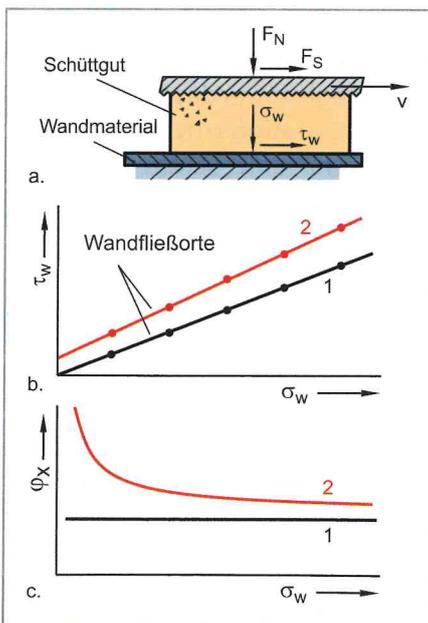
lässt sich wie Reibung allgemein über einen Reibungskoeffizienten ( $\mu$ ) oder durch den in der Schüttguttechnik üblichen Wandreibungswinkel ( $\varphi_x$ ) beschreiben. Der Zusammenhang ist durch die Tangensfunktion gegeben:

$$\mu = \tan(\varphi_x) \quad (1)$$

Größere Wandreibungswinkel erfordern steilere Trichterwände. Der Wandreibungswinkel hängt von der Schüttgut-Wandmaterialkombination ab. Im Folgenden werden einige Erfahrungen und Erklärungen zum Einfluss verschiedener Wandmaterialien und Oberflächen gegeben. Zum Verständnis der Vorgänge muss aber die Messung des Wandreibungswinkels betrachtet werden.

## 2. Messen des Wandreibungswinkels

Die Wandreibung wird üblicherweise mit einem Schergerät gemessen [1, 2]. Das Messprinzip zeigt Bild 2.a. Die Schüttgutprobe befindet sich oberhalb der Wandmaterialprobe. Sie wird von oben her mit einer Normalkraft  $F_N$  belastet, wodurch auf der Wandmaterialprobe die Wandnormalspannung  $\sigma_w$  entsteht. Zur Messung der Wandreibung wird die Schüttgutprobe auf der Wandmaterialprobe verschoben (Geschwindigkeit  $v$ ). Aus der zum Verschieben notwendigen Kraft  $F_S$  folgt die Wandschubspannung  $\tau_w$ . In der Regel stellt sich nach einer gewissen Zeit eine konstante Schubspannung ein (Gleitreibung). Das Wertepaar aus konstanter Schubspannung und angelegter Normalspannung



**Bild 2:**  
 a. Prinzip der Wandreibungsmessung  
 b. Wandfließorte mit Messpunkten  
 c. Wandreibungswinkel

wird in einem Schubspannung-Normalspannung-Diagramm ( $\tau_w$ - $\sigma_w$ -Diagramm, Bild 2.b) aufgetragen. Durch Variation der Normalspannung im gewünschten Messbereich ergeben sich mehrere Punkte im Diagramm.

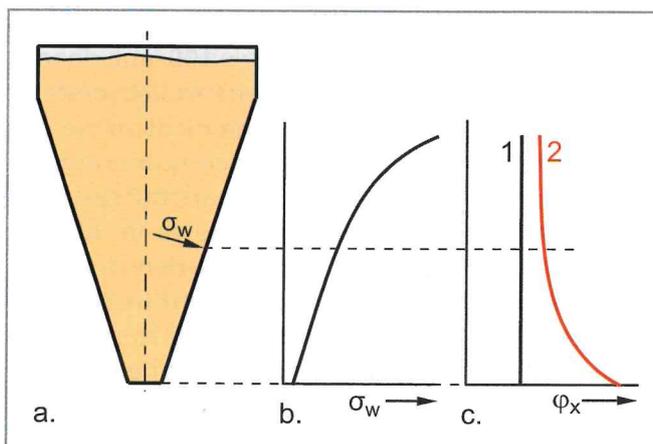
Die Messpunkte werden miteinander verbunden. Die dadurch entstehende Gerade oder Kurve heißt Wandfließort und zeigt an, welche Schubspannung bei einer bestimmten Normalspannung erforderlich ist, um das Schüttgut über die Wand gleiten zu lassen. Der Wandreibungswinkel  $\varphi_x$  folgt aus dem Verhältnis von Schubspannung und Normalspannung:

$$\varphi_x = \arctan(\tau_w/\sigma_w) \quad (2)$$

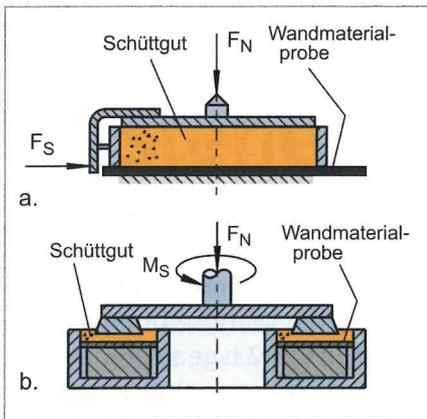
Das Verhältnis ( $\tau_w/\sigma_w$ ) ist der allgemein bekannte Reibungskoeffizient  $\mu$ , s. Gl. (1). Ist der Wandfließort eine Ursprungsgerade (Bild 2.b, Kurve 1), ist der Wandreibungswinkel konstant bzw. unabhängig von der Wandnormalspannung. Häufig ergeben sich Wandfließorte, die die Schubspannungsachse oberhalb des Ursprungs schneiden (Bild 2.b, Kurve 2) oder

gekrümmt sind. In diesen Fällen ist der Wandreibungswinkel für jeden Punkt des Wandfließortes aus Gl. (2) zu berechnen. In Bild 2.c sind die Wandreibungswinkel zu den in Bild 2.b gezeigten Wandfließorten über der Wandnormalspannung aufgetragen. Bei Wandfließorten entsprechend Kurve 2 nimmt der Wandreibungswinkel mit abnehmender Spannung zu.

Die Messung bei unterschiedlichen Wandnormalspannungen ist wichtig, da im unteren Bereich eines Massenflusstrichters die Wandnormalspannung proportional zum örtlichen Trichterdurchmesser ist (Bild 3; Voraussetzung ist der sogenannte Entleerungszustand, der sich einstellt, nachdem das Schüttgut einmal in Bewegung war [1, 2]). Bei spannungsabhängigem Wandreibungswinkel (Kurve 2 in Bild 2.c) ist daher von unterschiedlichen Wandreibungswinkeln über der Trichterhöhe auszugehen. Zur Auslegung des Trichters für Massenfluss ist dann der passende Wandreibungswinkel auszuwählen (mehr dazu folgt am Ende dieses Aufsatzes).



**Bild 3:**  
 a. Massenflusstrichter;  
 b. Wandnormalspannung über der Trichterhöhe (Entleerungszustand);  
 c. Beispielhafte Wandreibungswinkel für Wandfließorte 1 und 2 aus Bild 2.b [1, 2]



**Bild 4: Wandreibungsmessung**  
 a. Jenike-Schergerät  
 b. Ringschergerät [1, 2, 4–6]

Ausgeführte Messgeräte zur Messung der Wandreibung zeigt Bild 4. Das Jenike-Schergerät folgt dem in Bild 2.a gezeigten Prinzip. Die zylindrische Schüttgutprobe befindet sich innerhalb Metallrings (Scherring) und ist oben vom Scherdeckel abgedeckt. Dieser überträgt die vertikal wirkende Normalkraft  $F_N$  als auch die zum Verschieben der Schüttgutprobe notwendige Scherkraft  $F_S$ . Beim in Bild 4.b gezeigten Ringschergerät befindet sich die Wandmaterialprobe innerhalb der ringförmigen Scherzelle. Das Schüttgut liegt auf der Wandprobe und wird von oben vom ebenfalls ringförmigen Scherdeckel belastet ( $F_N$ ). Die Verschiebung des Schüttgutes auf der Wand wird hier erreicht, indem die Scherzelle langsam rotiert, während der Deckel mit dem Schüttgut in seiner Position gehalten wird. Die Schubspannung folgt aus dem gemessenen Moment  $M_S$ . Ein Vorteil dieses Messprinzips ist, dass die Verschiebung in Umfangsrichtung nicht begrenzt ist.

Wichtig für die Messung ist die Anordnung der Wandprobe unterhalb des Schüttgutes, was bei den Geräten in Bild 4 erfüllt ist, und wie es auch bei Trichterwän-

den und Schurren der Fall ist. Viele Schüttgüter neigen zur Entmischung derart, dass sich kleinere Partikel zwischen größeren Partikeln der Schwerkraft folgend nach unten und damit in Richtung zur Wand bewegen. Wäre bei der Messung die Wandprobe oberhalb des Schüttgutes, würde das Feingut von der Wand wegbewegt, was zu kleine gemessene Wandreibungswinkel ergeben kann [2, 3]. Ein auf dieser Grundlage ausgelegter Massenflusstrichter wäre dann nicht steil genug, um tatsächlich zu Massenfluss zu führen.

### 3. Einflüsse auf die Wandreibung

In der praktischen Anwendung stellt sich immer wieder die Frage, wie eine geringe Wandreibung zu erreichen ist, um Massenfluss zu erzielen. Allgemeingültige Regeln sind hierzu kaum zu finden. Es existieren verschiedene Mechanismen, die sich auf die Wandreibung auswirken. Nicht einmal eine Aussage wie „Je glatter die Wand, desto geringer die Wandreibung“ hat Allgemeingültigkeit, wenngleich sie für viele Materialien gilt. Einige Abhängigkeiten werden im Folgenden behandelt.

Ein trockenes, nicht zu feines Schüttgut (z. B.  $> 100 \mu\text{m}$ ), das aus nicht zu weichen Partikeln besteht, wird gegen eine nicht zu weiche Wand meist einen spannungsunabhängigen Wandreibungswinkel aufweisen, so wie es in Bild 2.b anhand des durch den Ursprung verlaufenden Wandfließortes 1 gezeigt ist. Eine glattere Wand lässt in solchen Fällen einen kleineren Wandreibungswinkel erwarten. Der Ausdruck „nicht zu weich“

soll sagen, dass sich Rauigkeitsspitzen der Partikel nicht in die Wand drücken und umgekehrt.

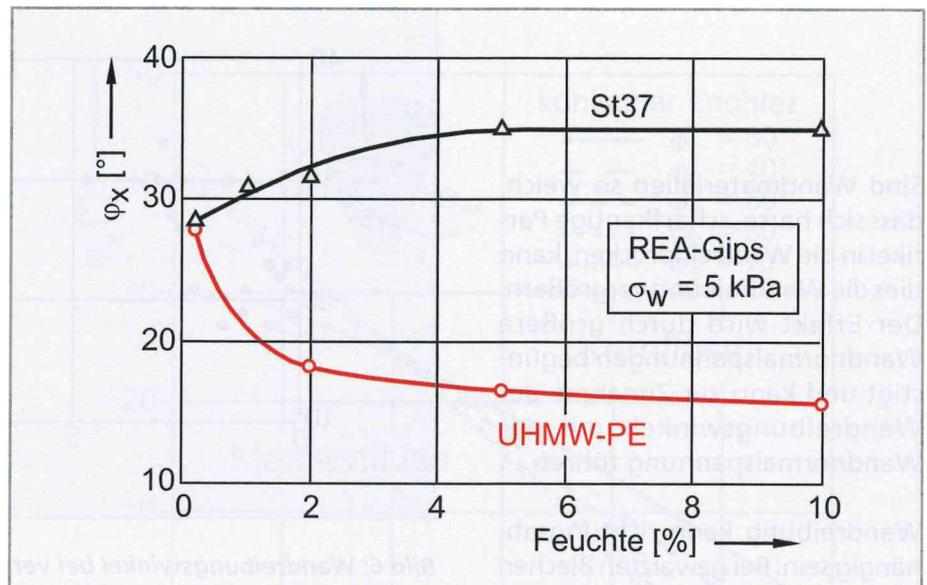
Dagegen wirken sich bei trockenen Schüttgütern mit kleinsten Partikeln im Bereich weniger Mikrometer (oder darunter) die auftretenden Haftkräfte (van-der-Waals-Kräfte) auf die Wandreibung aus. Die Überlagerung der Haftkräfte mit der von außen aufgeprägten Normalspannung lässt sich vereinfacht wie die Vergrößerung der Normalspannung durch eine Zusatzspannung betrachten. Der Wandfließort verschiebt sich dadurch zu größeren Schubspannungen, wie es Wandfließort 2 in Bild 2.b zeigt. Resultat sind größere Wandreibungswinkel vor allem im Bereich kleiner Spannungen (Kurve 2 in Bild 2.c). Der Schnittpunkt des Wandfließortes mit der positiven Schubspannungsachse bedeutet, dass selbst ohne eine von außen aufgeprägte Wandnormalspannung eine Schubspannung übertragen werden kann. Eine solche Situation tritt zum Beispiel auf, wenn eine Schüttgutschicht an einer vertikalen Wand haftet.

Bei feuchten Schüttgütern entstehen Haftkräfte durch Flüssigkeitsbrücken zwischen Partikeln und Wand, sofern Benetzbarkeit vorliegt. Ähnlich wie in einer Kapillare sammelt sich die Flüssigkeit an den Berührstellen zwischen Partikeln und Wand. Die Haftkräfte ergeben sich durch die Oberflächenspannung und gegebenenfalls einen Unterdruck innerhalb der Flüssigkeitsbrücke. Das Ergebnis ist wie bei den van-der-Waals-Kräften ein zu höheren Schubspannungen verschobener Wandfließ-

ort, der spannungsabhängige Wandreibungswinkel ergibt (Kurven 2 in Bild 2.b/c).

Bild 5 zeigt als Beispiel Wandreibungswinkel eines feinen Schüttgutes mit unterschiedlichen Feuchtigkeiten bei konstanter Wandnormalspannung. Die Wandmaterialien waren ein gut benetzbares Stahlblech (St37) und ein schlecht benetzbarer Kunststoff (UHMW-PE), der u. a. als Auskleidungsmaterial für Trichter eingesetzt wird. Deutlich ist zu sehen, wie der Wandreibungswinkel beim Stahlblech mit der Feuchtigkeit zunimmt (Haftkraft durch Flüssigkeitsbrücken), beim UHMW-PE jedoch abnimmt, da sich wegen der schlechten Benetzbarkeit keine haftkraftverstärkenden Flüssigkeitsbrücken bilden, sondern die Flüssigkeit offensichtlich wie ein Schmiermittel wirkt und die Wandreibung verringert. Beim nahezu trockenen Schüttgut zeigen die Wandreibungswinkel dagegen keinen Unterschied, d. h., die Auskleidung wäre für das trockene Schüttgut wirkungslos.

Wie anhand von Bild 5 gezeigt wurde, ist das Wandmaterial von großer Bedeutung, jedoch ist auch die Oberflächenstruktur wichtig. Bei ähnlichen Materialien, z. B. Edelstahlbleche aus 1.4301 oder 1.4404, zeigt die Erfahrung, dass die genaue Zusammensetzung des Edelstahls weniger wichtig ist als die Oberflächenbehandlung. Bleche bis zu einer Stärke von etwa 4 mm sind als kaltgewalztes Material erhältlich (Oberfläche 2B nach DIN EN 10088-2), dickere Bleche sind warmgewalzt (z. B. entzünderte., nicht gebeizte Oberfläche 1E nach DIN EN 10088-2).



**Bild 5: Wandreibungswinkel gegen St37 und UHMW-PE bei REA-Gips [7]**

Die warmgewalzte Oberfläche ist rauer und führt mit den meisten Schüttgütern zu einer größeren Wandreibung als die kaltgewalzte. Daher ist bei der Spezifikation von Materialien z. B. für einen Trichter oder eine Auskleidung nicht nur das Material anzugeben, sondern auch die Oberflächenqualität. Im günstigsten Fall wird die Wandreibung anhand einer Probe des Lieferanten überprüft.

Polieren einer Wandoberfläche kann die Wandreibung verringern. Handelt es sich um ein sehr feines Schüttgut (Partikel im Bereich weniger Mikrometer), kann auch der gegenteilige Effekt eintreten. Die Ursache sind die van-der-Waals-Kräfte. Diese Haftkräfte zwischen Wand und Partikeln nehmen stark zu, wenn sich der Abstand zwischen Partikeln und Wand verringert. Einer Wand, die noch gewisse Rauigkeitsspitzen aufweist, können sich die Partikel aber nicht so stark annähern wie einer polierten Wand mit deutlich kleineren Rauigkeiten. Der kleinere Abstand zur polierten Wand erzeugt größere Haftkräfte, was zur Zunahme der Wandreibung vor allem bei kleinen Span-

nungen führt. Bevor eine Wand poliert wird, z. B. um auftretende Fließprobleme zu bekämpfen, ist es daher sinnvoll, anhand einer Wandreibungsmessung die Wirkung einer solchen Maßnahme zu prüfen.

Vorsicht ist geboten, wenn das Wandmaterial mit einem Rauigkeitskennwert wie  $R_a$  (arithmetischer Mittenrauwert) oder  $R_z$  (gemittelte Rautiefe) beschrieben wird. Diese Kennwerte sagen etwas zur Höhendifferenz zwischen Rauigkeitsspitzen und Vertiefungen auf der Oberfläche. Für die Reibung zum Schüttgut spielen aber u. a. die Form der Rauigkeiten (abgerundete/abgeflachte Rauigkeitsspitzen) und der Abstand zwischen den Rauigkeitsspitzen eine Rolle. Bild 6 zeigt Wandreibungswinkel eines Schüttgutes gegen verschiedene Stahlplatten in Abhängigkeit des Mittenrauwerths  $R_a$ . Es ist zwar eine tendenzielle Abnahme des Wandreibungswinkels mit abnehmender Rauigkeit zu erkennen, jedoch gibt es auch Wandmaterialien mit gleicher Rauigkeit, die stark unterschiedliche Wandreibungswinkel zeigen.

Sind Wandmaterialien so weich, dass sich harte, scharfkantige Partikel in die Wand eindrücken, kann dies die Wandreibung vergrößern. Der Effekt wird durch größere Wandnormalspannungen begünstigt und kann zur Zunahme des Wandreibungswinkels mit der Wandnormalspannung führen.

Wandreibung kann richtungsabhängig sein. Bei gewalzten Blechen ist manchmal eine Richtungsabhängigkeit festzustellen, die aber in der Regel gering ist. Riefen auf Wandoberflächen, die z. B. durch Sägen von Kunststoffplatten (Auskleidungen) oder Schleifen von Metalloberflächen entstehen, zeigen einen stärkeren Richtungseinfluss. In der Regel ist parallel zu den Riefen der kleinste Wandreibungswinkel zu erreichen, der aber schon bei wenigen Grad Abweichung von dieser Richtung deutlich ansteigt. Bild 7 zeigt als Beispiel Wandreibungswinkel, die in verschiedenen Richtungen auf einem geschliffenen Edelstahlblech gemessen wurden [9].

Beim Schleifen einer Trichterwand sollten die Schleifriefen streng vertikal bzw. in Richtung zur Auslauföffnung verlaufen – speziell bei einem konischen Trichter ein nahezu unmögliches Unterfangen. Wird der Wandreibungswinkel der geschliffenen Wand gemessen und für eine Auslegung benutzt, sollte daher nicht darauf vertraut werden, dass der minimale Wandreibungswinkel, der parallel zu den Schleifriefen gemessen wird (bei  $\alpha = 0^\circ$  in Bild 7), für den gesamten Trichter maßgeblich ist. Besser wäre es, eine hinreichend große Winkelabweichung der Schleifriefen

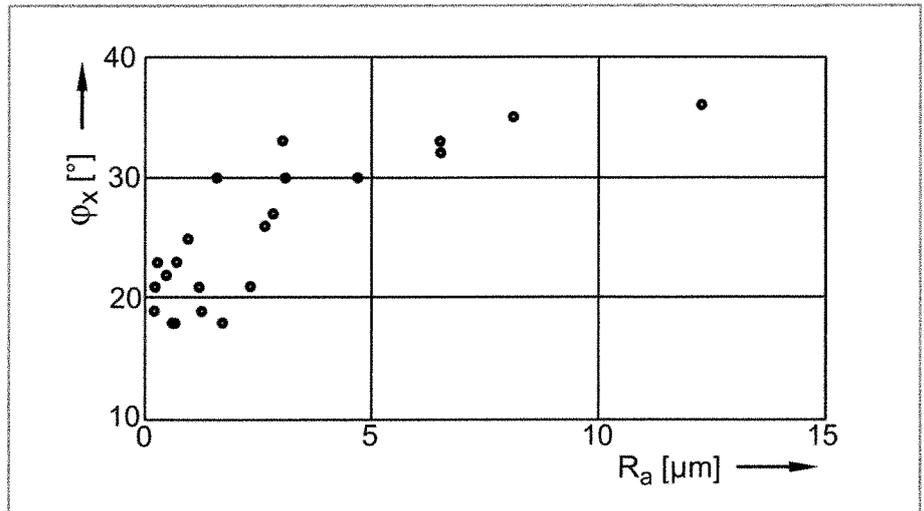


Bild 6: Wandreibungswinkel bei verschiedenen Mittenrauwerten  $R_a$  am Beispiel der Reibung von Rohsalz gegen Stahl- und Edelstahlbleche [8]

tung von der Vertikalen zu berücksichtigen.

Wird die Trichterwand nur lokal geschliffen, z. B. Schweißnähte bei Auskleidung eines Trichters mit Edelstahlblech, sollte nur eine möglichst kleine Fläche geschliffen werden, wobei die Schleifriefen möglichst in Fließrichtung zeigen sollten.

#### 4. Einfluss der Wandreibung auf die Trichtergestaltung (Beispiel)

Die für Massenfluss erforderliche Wandneigung eines Trichters kann mit den von Jenike [1] ermittelten Massenflussgrenzen bestimmt werden (Bild 8). Das Diagramm zeigt Grenzen für konische Trichter. Die gegen die Vertikale gemessene Wandneigung  $\theta$  muss umso kleiner sein, desto größer der Wandrei-

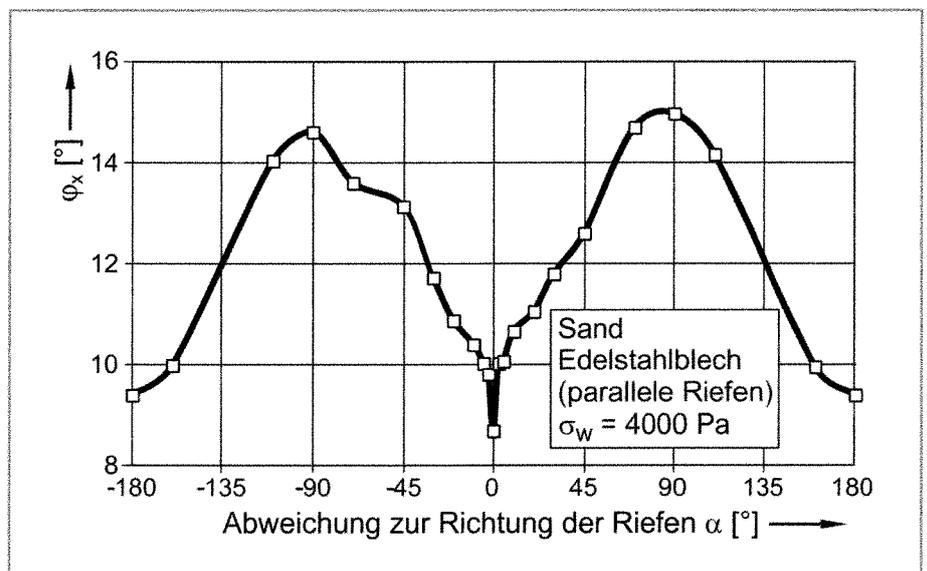
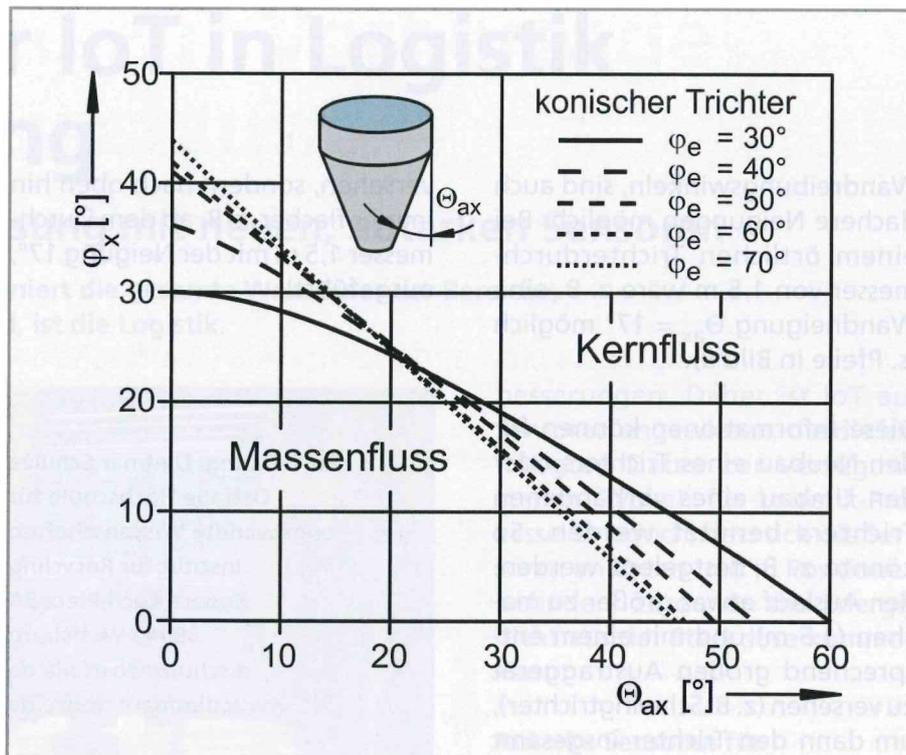


Bild 7: Mittlere Wandreibungswinkel  $\phi_x$  für Sand bei unterschiedlichen Messrichtungen ( $\alpha = 0^\circ$  ist die Richtung parallel zu den Riefen) [9]

**Bild 8: Massenflussgrenzen für konische Trichter [1, 2]**

bungswinkel  $\varphi_x$  ist. Die Grenzkurven hängen etwas von der inneren Reibung des Schüttgutes ab, die hier in Form des (ebenfalls mit dem Schergerät gemessenen) effektiven Reibungswinkels  $\varphi_e$  eingeht.

Etwas kompliziert wird die Auslegung, wenn der Wandreibungswinkel wie im Beispiel von Bild 2.c, Kurve 2, spannungsabhängig ist (was fast immer auch für den effektiven Reibungswinkel gilt). Die über der Trichterhöhe unterschiedliche Spannung (Bild 3.b) sorgt dann für unterschiedliche Reibungsverhältnisse (Bild 3.c) und damit auch unterschiedliche erforderliche Wandneigungswinkel über der Trichterhöhe. Da der Wandreibungswinkel in der Regel mit zunehmender Spannung sinkt (wie Bild 2.c, Kurve 2), und die Spannung im Trichter nach oben zunimmt, kann die Trichterneigung nach oben, also zu größeren Trichterdurchmessern hin, immer flacher werden [10]. Ein Beispiel zeigt das Ergebnis einer Massen-

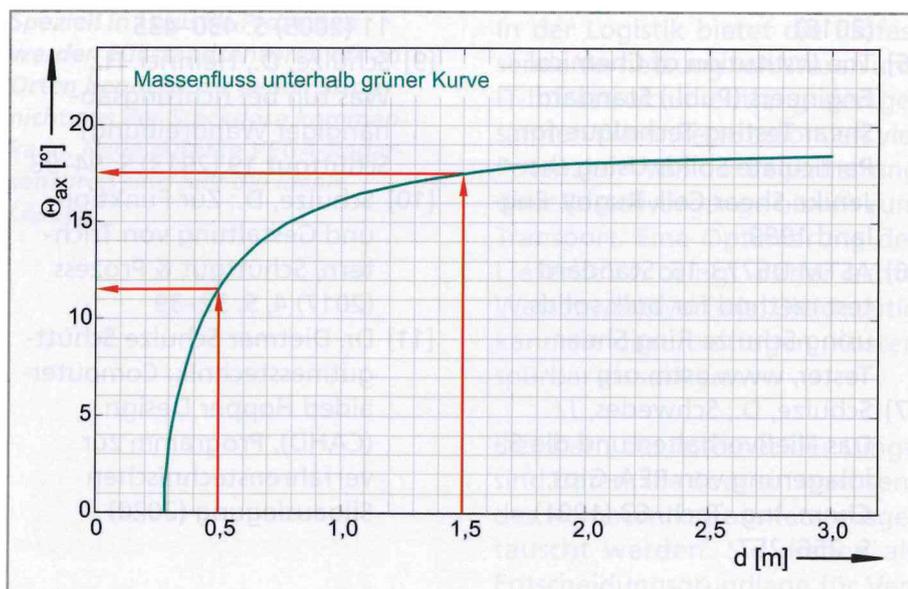


flussauslegung in Bild 9. Das als Beispiel verwendete Schüttgut ist so gut fließend, dass Brückenbildung hier keine Rolle spielt. Massenfluss wird angestrebt, um Entmischung zu vermeiden.

Aus Bild 9 kann abgelesen werden, wie steil der Trichter (Wandneigung  $\Theta_{ax}$ ) sein muss, um Massen-

fluss zu erzielen. Unterhalb eines örtlichen Durchmessers von 0,3 m wäre gar kein Massenfluss möglich, da der Wandreibungswinkel bei den dort herrschenden kleinen Spannungen zu groß wäre, um Massenfluss zu erlauben.

Würde der Trichter mit einer Auslauföffnung mit einem Durchmesser von z. B. 0,5 m enden, wäre an dieser Stelle die maximale Trichterwandneigung  $\Theta_{ax} = 11^\circ$  anzuwenden, um Massenfluss sicherzustellen (s. Pfeile in Bild 9). Weiter oben im Trichter, also bei größeren Spannungen und kleineren



**Bild 9:**  
**Auslegungsbeispiel: Trichterwandneigung  $\Theta$  in Abhängigkeit des Durchmessers  $d$ , berechnet mit [11]. Die roten Pfeile illustrieren die im Text erwähnten Beispiele.**

Wandreibungswinkeln, sind auch flachere Neigungen möglich. Bei einem örtlichen Trichterdurchmesser von 1,5 m wäre z. B. eine Wandneigung  $\Theta_{ax} = 17^\circ$  möglich (s. Pfeile in Bild 9).

Diese Informationen können für den Neubau eines Trichters oder den Umbau eines vorhandenen Trichters benutzt werden. So könnte z. B. festgelegt werden, den Auslauf etwas größer zu machen (1,5 m) und mit einem entsprechend großen Austraggerät zu versehen (z. B. Schwingtrichter), um dann den Trichter insgesamt mit der flacheren Neigung auszuführen. Oder ein kleiner Auslaufdurchmesser (0,5 m) wird gewählt, aber der Trichter wird nicht gänzlich mit der beim Durchmesser 0,5 m erforderlichen Neigung  $11^\circ$

versehen, sondern nach oben hin immer flacher, z. B. ab dem Durchmesser 1,5 m mit der Neigung  $17^\circ$ , ausgeführt.

**Prof. Dr.-Ing. Dietmar Schulze**  
**Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften**  
**Institut für Recycling**  
**Robert-Koch-Platz 8A**  
**38440 Wolfsburg**  
**d.schulze@ostfalia.de**  
**www.dietmar-schulze.de**

### Autorenkurzbiografie

Prof. Dr.-Ing. Dietmar Schulze ist seit 1996 Professor im Institut für Recycling an der Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften (Hochschule Braunschweig/Wolfenbüttel). Er ist Mitbegründer der Schwedes + Schulze Schüttguttechnik GmbH (Siloauslegung, Messen von Schüttguteigenschaften) und Gründer von Dr. Dietmar Schulze Schüttgutmesstechnik (Entwicklung und Herstellung von Ringschergeräten zum Messen von Fließeigenschaften).

### Kurs zum Thema

Die in diesem Aufsatz beschriebenen Themen sind Teil des GVT-Hochschulkurses „Vom Schüttgut zum Silo“ am 17./18. Februar 2020 in Braunschweig. Mehr Informationen unter [www.gvt.org](http://www.gvt.org)

### Literatur

- [1] Jenike, A. W.: Storage and flow of solids. Bull. No. 123, 20th Printing, revised 1980. Engng. Exp. Station, Univ. of Utah, Salt Lake City (1964/1980)
- [2] Schulze, D.: Pulver und Schüttgüter – Fließeigenschaften und Handhabung, 4. Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg (2019)
- [3] van den Bergh, W.J.H., Scarlett, B.: Influence of particle breakage on the wall friction coefficient of brittle particulate solids, part I: Influence of wall inclination, normal load and displacement. Powder Technol. 67 (1991) S. 237–247
- [4] Dr. Dietmar Schulze Schüttgutmesstechnik: Informationsblätter zu Ringschergeräten RST-01.pc und RST-XS.s, [www.dietmar-schulze.de](http://www.dietmar-schulze.de) (2018)
- [5] The Institution of Chemical Engineers (Publ.) Standard Shear Testing Technique for Particulate Solids Using the Jenike Shear Cell. Rugby, England 1989
- [6] ASTM D6773-16: Standard test method for bulk solids using Schulze Ring Shear Tester, [www.astm.org](http://www.astm.org)
- [7] Schulze, D., Schwedes, J.: Das Fließverhalten und die Silolagerung von REA-Gips, Chem.-Ing.-Tech. 63 (1991) S. 256–257
- [8] Heinrici, H., Jacob T.: Die schüttgutmechanische Betrachtung der Siloauslegung und ihre Anwendung auf ein Silo unter Tage, Schüttgut 11 (2005) S. 430–435
- [9] Schulze, D., Heinrici, H.: Was tun bei richtungsabhängiger Wandreibung? Schüttgut 19 (2913) S. 94–98
- [10] Schulze, D.: Zur Funktion und Gestaltung von Trichtern, Schüttgut & Prozess (2017) 4, S. 32–39
- [11] Dr. Dietmar Schulze Schüttgutmesstechnik: Computer-aided Hopper Design (CAHD), Programm zur verfahrenstechnischen Siloauslegung (2020)