



## Diplomarbeit

# Schergeräte zur Ermittlung von Schüttguteigenschaften

Bunker- und Siloauslegung

erstellt für

**Institut für Verfahrenstechnik des industriellen  
Umweltschutzes**

**Vorgelegt von:**

Franz Michael Dobay  
0130117

**Betreuer/Gutachter:**

O.Univ.Prof.Dipl.-Ing.Dr.mont. Werner L. Kepplinger

Leoben, 28. Februar 2008

## **EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG**

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Diplomarbeit/Bakkalaureatsarbeit selbständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche erkenntlich gemacht habe.

## DANKSAGUNG

Die nachfolgende Diplomarbeit wurde am Institut für Verfahrenstechnik des industriellen Umweltschutzes an der Montanuniversität Leoben erarbeitet. An dieser Stelle möchte ich mich bei all jenen bedanken, die direkt oder indirekt zur Entstehung dieser Diplomarbeit in Form fachlicher oder anderweitiger Unterstützung beigetragen haben.

Besonderer Dank gebührt dabei O.Univ.Prof.,Dipl.-Ing.,Dr.mont. W. L. Kepplinger für die Betreuung meiner Arbeit. Trotz Zeitmangels hatte er immer ein offenes Ohr für Wünsche und Anliegen und stand mir mit Rat und Tat zur Seite. Weiters bedanke ich mich bei allen Mitarbeitern des Institutes für ihre große Hilfsbereitschaft und unermüdliche Unterstützung. Ihre zahlreichen wissenschaftlichen Ratschläge waren für mich sehr wertvoll und haben stets zur Verbesserung dieser Arbeit beigetragen. Durch das familiäre Klima am Institut fühlt man sich als Student niemals als einer von Vielen, sondern als Wichtigster von Wenigen.

Da diese Diplomarbeit auch den Abschluss meines Studiums bildet, möchte ich die Gelegenheit nutzen auch meinen Eltern und meiner Schwester Elisabeth zu danken. Ein herzliches Dankeschön richtet sich auch an meine Lebensgefährtin Sandra, sowie meinen Studienkollegen und Freunden. Durch eure persönliche Unterstützung und so manch aufbauendes Wort in schwierigen Zeiten während meines Studiums, habt ihr wesentlich zum Erfolg beigetragen.

All diesen Personen gebührt mein aufrichtiger Dank.

# **Kurzfassung**

## **Schergeräte zur Ermittlung von Schüttguteigenschaften**

### **Bunker- und Siloauslegung**

Schüttgüter bzw. die Schüttguttechnik ist ein wesentlicher Bestandteil der mechanischen Verfahrenstechnik. Vor allem die Kenntnis der Schüttguteigenschaften ist notwendig für eine problemlose und reibungsfreie Handhabung der Schüttgüter bei Transport und Lagerung.

Der erste Teil meiner Diplomarbeit befasst sich mit den Schüttguteigenschaften, insbesondere mit den Fließeigenschaften von Schüttgütern. Es werden geeignete Schergeräte zur Ermittlung von Schüttguteigenschaften vorgestellt und miteinander verglichen. Auch das Messprinzip und die richtige Handhabung der Schergeräte werden vermittelt.

Im zweiten Teil der Arbeit wird aufbauend auf den ermittelten Schüttguteigenschaften ein Rechenmodell zur Auslegung von Silos mit Massenfluss erarbeitet. Dabei werden auch die Möglichkeiten einer Automatisierung der Auswertung mittels Rechner vorgestellt.



## **Abstract**

### **Shear testers for the determination of bulk solid properties layout of silos and bunkers**

Bulk solids or rather the technology of bulk solids are a substantial component of mechanical process technology. For a problem-free and frictionless handling of the bulk solids by transport and storage, it is important to know the properties of the bulk solids.

The first part of my diploma thesis deals with these bulk solid properties, in particular the flow properties of the bulk solids. For measurement of flow properties of bulk solids various types of shear testers are listed and compared with one another. Also the measurement principle and the correct handling of the shear testers are presented.

In the second part of this work based on the determined bulk solid properties, a calculation model for the layout of mass flow silos was elaborated. Also the possibility of automation and the computerized layout of mass flow silos is presented.

# Inhaltsverzeichnis

	<b>Seite</b>
<b>1 EINLEITUNG .....</b>	<b>3</b>
1.1 Problemstellung .....	3
1.2 Zielsetzung .....	4
<b>2 GRUNDLAGEN ZU SCHÜTTGUTEIGENSCHAFTEN UND SCHERGERÄTEN .5</b>	
2.1 Fließeigenschaften von Schüttgütern.....	6
2.1.1 Das Modell des einachsigen Druckversuches .....	7
2.1.1.1 Verfestigung von Schüttgütern .....	7
2.1.1.2 Zeitverfestigung .....	9
2.1.1.3 Darstellung durch Spannungskreise.....	10
2.1.1.4 Kennzahlen der Fließfähigkeit.....	11
2.1.2 Das Messprinzip mit Schergeräten .....	13
2.1.2.1 Messprozedur .....	13
2.1.2.2 Fließort und Fließeigenschaften .....	18
2.1.2.3 Zeitverfestigung .....	27
2.1.3 Wandreibung .....	30
2.2 Einflüsse auf das Messergebnis .....	32
2.2.1 Verfestigungsprozedur .....	33
2.2.2 Anisotropie.....	35
2.2.3 Spannungen in der Messebene/Spannungsverteilung .....	37
2.2.4 Anforderung an ein Messgerät zur Ermittlung von Fließeigenschaften.....	38
2.3 Schergeräte .....	40
2.3.1 Direkte Schergeräte .....	41
2.3.2 Indirekte Schergeräte.....	46
2.3.3 Der Aufbau eines Jenike Schergerätes .....	47
2.3.4 Der Aufbau eines Ringschergerätes .....	52
2.3.5 Vergleich der Schergeräte .....	55
2.3.6 Jenike Schergerät versus Ringschergerät.....	59
<b>3 PRAKTISCHES MESSEN VON FLIEßEIGENSCHAFTEN .....</b>	<b>63</b>

3.1	Messungen mit Schergeräten .....	63
3.1.1	Fließortmessung mittels Jenike Scherzelle .....	63
3.1.2	Fließortmessung mittels Ringscherzelle .....	69
3.1.3	Messung der Zeitverfestigung .....	71
3.1.4	Messung der Wandreibung .....	73
3.2	Festlegen der Spannungen .....	75
3.2.1	Fließorte (Fließfähigkeit) .....	75
3.2.1.1	Auswahl des Spannungsniveaus .....	75
3.2.1.2	Normalspannungen beim An- und Abscheren .....	77
3.2.2	Zeitfließorte (Fließfähigkeit bei Zeitverfestigung) .....	79
3.2.3	Wandfließorte .....	80
3.3	Messung von Fließeigenschaften bezogen auf die Anwendung .....	81
3.3.1	Vergleichsmessungen .....	81
3.3.2	Verfahrenstechnische Siloauslegung .....	81
<b>4</b>	<b>AUSWERTUNG DER MESSDATEN .....</b>	<b>83</b>
4.1	Die Jenike Scherzelle am VTIU Institut .....	84
4.2	Normal- und Schubspannungen bei Scherversuchen .....	88
4.2.1	Normal- und Schubspannungen bei der Fließortmessung .....	88
4.2.2	Normal- und Schubspannungen bei der Wandfließortmessung .....	91
4.3	Kennzahlen zur Fließfähigkeit eines Schüttgutes .....	92
4.4	Bunker- bzw. Siloauslegung .....	95
4.4.1	Ermittlung der Trichterwandneigungswinkel .....	95
4.4.2	Kritische Größen der Auslauföffnungen bei Bunker .....	97
<b>5</b>	<b>ERGEBNISSE / DISKUSSION .....</b>	<b>103</b>
<b>6</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG .....</b>	<b>105</b>
<b>7</b>	<b>VERZEICHNISSE .....</b>	<b>106</b>
7.1	Literatur .....	106
7.2	Abkürzungsverzeichnis .....	108
7.3	Tabellen .....	114
7.4	Abbildungen .....	114
<b>ANHANG</b>	<b>.....</b>	<b>I</b>

# 1 Einleitung

Der Anteil von Schüttgütern in der stoffverarbeitenden Industrie ist enorm hoch. Der Präsident der EFCE (European Federation of Chemical Engineering) bezifferte vor einigen Jahren den Anteil von Schüttgütern auf 60% aller in der chemischen Industrie Europas hergestellten Produkte. Bei weiteren 20% waren Schüttgüter bei der Herstellung beteiligt. Angesichts dieser großen Mengen bereits in nur einem Industriezweig, welche auch gelagert und transportiert werden müssen, ist es nicht verwunderlich, dass die Kenntnis der Eigenschaften eines Schüttgutes schon aus rein technischen und auch wirtschaftlichen Gründen eine unumgängliche Notwendigkeit geworden ist.

Im Ingenieurwesen wird die Handhabung von Pulvern und Schüttgütern als Schüttguttechnik bezeichnet, welche ein Bestandteil der Mechanischen Verfahrenstechnik ist. D.h., die Schüttgutmechanik beschäftigt sich mit Lager- und Transportbedingungen von Schüttgütern wie Schüttwinkel, Ausflussverhalten von Silos, Fluidisierung, Schüttdichte usw.. Dabei stellt ein einzelner Silo, in dem Schüttgut zwischengelagert wird, meist nur ein einzelnes, unbedeutendes Element zur Verwirklichung eines größeren Prozesses dar. Kontinuierlich oder auch diskontinuierlich wird Schüttgut dabei in einen Silo eingefüllt, das dann zu bestimmten Zeiten in vorgegebenen Mengen wieder abgezogen wird. Vorgänge wie Brücken- oder auch Schachtbildung sollten dabei vermieden werden. Eine exakte Silodimensionierung und –auslegung ist notwendig, was aber nur durch die Ermittlung der relevanten Schüttguteigenschaften erfolgen kann. Diese müssen aber an repräsentativen Proben direkt gemessen werden, da sie von zu vielen Größen beeinflusst werden. Zu diesem Zweck werden in der Praxis Schergeräte eingesetzt. Die Voraussetzung ist jedoch, dass Scherversuche korrekt durchgeführt werden müssen, da sonst mit Daten zu rechnen ist, auf denen aufbauend eine gesicherte Silodimensionierung nicht ermöglicht wird. Das Jenike Schergerät, welches bereits am Beginn des zwanzigsten Jahrhunderts entwickelt wurde, ist dabei noch immer das Standardschergerät zur Ermittlung der notwendigen Schüttguteigenschaften.

## 1.1 Problemstellung

Auch das Institut für Verfahrenstechnik des Industriellen Umweltschutzes beschäftigt sich mit Schüttgütern und deren Eigenschaften. Dazu wurde von den Mitarbeitern des Institutes ein Jenike Schergerät angefertigt. Zum Einen wird diese Scherzelle für Lehrzwecke, zum Anderen aber auch um Anfragen seitens der Industrie erfüllen zu können, eingesetzt. Dabei steht die Ermittlung von Schüttguteigenschaften, im Speziellen der Fließeigenschaften von Schüttgütern bei Lagerung und Transport, im Vordergrund. Aufbauend auf den ermittelten Fließeigenschaften eines Schüttgutes kann dann eine Siloauslegung erfolgen. Weitere Messungen die mit dieser Scherzelle durchgeführt werden dienen dem qualitativen Vergleich von Schüttgütern hinsichtlich ihrer Fließeigenschaften und der Bestimmung des Schüttgutverhaltens bei längerer Lagerungszeit.

Die Messungen mit diesem Schergerät sind aber nicht unproblematisch. Eine große fachliche Kompetenz, sowie Erfahrungswerte sind notwendig um repräsentative Ergebnisse für ein Schüttgut ermitteln zu können. Die Erfassung der Messwerte erfolgt oft recht umständlich durch Abwiegen von Wassermassen. Noch dazu nimmt die Messung eines Schüttgutes mit dieser Scherzelle sehr viel Zeit in Anspruch.

Auch die nach den Messungen folgende Methode zur Auslegung von Silos ist sehr kompliziert. Sie wird zusätzlich noch erschwert, indem im Zuge dieses Auslegungsverfahrens aus Diagrammen Größen per Hand abgelesen werden müssen. Dies erzeugt zusätzlich eine mögliche Fehlerquelle und erhöht den Zeit- und Arbeitsaufwand bei der Siloauslegung.

## 1.2 Zielsetzung

In dieser Arbeit soll nun, neben der Ermittlung der theoretischen Grundlagen zu Schüttgütern und den Eigenschaften von Schüttgütern auch näher auf die Schergeräte selbst eingegangen werden. Die Arten und Typen von Schergeräten, welche zur Verfügung stehen um Schüttguteigenschaften ermitteln zu können, sollten rehergiert werden. Dabei ist besonders auf die Eignung der Schergeräte hinsichtlich der bereits oben angeführten Anforderungen (Ermittlung der Schüttguteigenschaften bzw. Fließeigenschaften, Möglichkeit zur Bunker- und Siloauslegung, Möglichkeit zum qualitativen Vergleich von Schüttgütern, Möglichkeit zur Ermittlung des Verhaltens bei längerer Lagerungszeit) einzugehen. Auch die richtige Handhabung der Schergeräte, im Besonderen auch der Jenike Scherzelle am Institut für Verfahrenstechnik des Industriellen Umweltschutzes, sollte erarbeitet werden.

Ein weiteres Ziel dieser Arbeit soll die Optimierung des Verfahrens zur Silo- und Bunkerauslegung sein. Dabei ist ein Rechenmodell zur Auslegung zu erarbeiten. Auch auf die Möglichkeit einer voll automatisierten Auslegung mittels Rechenprogramm und Computer ist einzugehen.

## 2 Grundlagen zu Schüttguteigenschaften und Schergeräten

In fast allen verfahrenstechnischen Industriezweigen werden Schüttgüter verwendet, die transportiert und gelagert werden müssen. Unter Schüttgüter versteht man Haufwerke aus körnigen oder pulverigen Feststoffen. Eine Lagerung kann auf Halden, sowie in Bunker und Silos erfolgen. Einige typische Formen von Silos sind in nachfolgender Abbildung 1 dargestellt [24]:

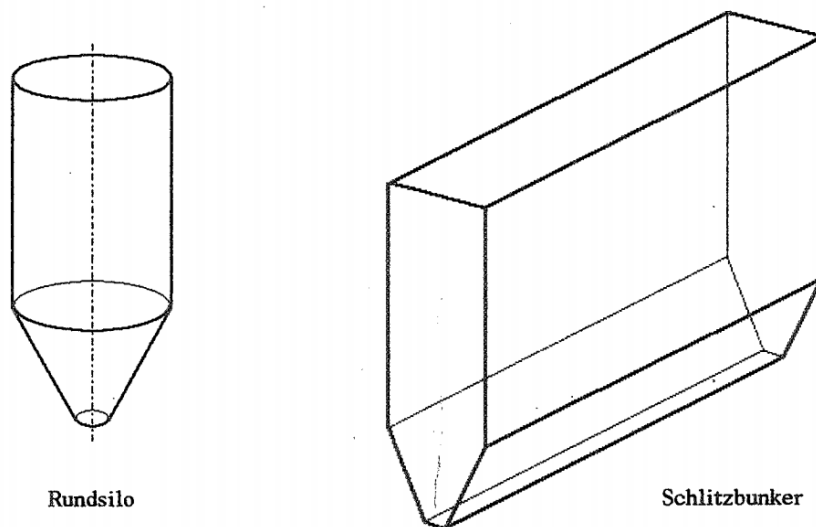


Abbildung 1: Einfache Bauformen von Silos bzw. Bunkern

Für einen funktionierenden Ablauf der einzelnen Arbeitsschritte (Befüllung, Lagerung und Entnahme von Schüttgütern) bei Bunkern/Silos ist eine physikalisch sinnvolle Beschreibung des Fließverhaltens des Schüttgutes erforderlich. Es dürfen also keine Fließprobleme (z.B. Fließstörung, Entmischung usw.) auftreten. Auch wird es immer wichtiger die Fließfähigkeit eines Produktes zu beurteilen z.B. im Rahmen von Vergleichsmessungen (z.B. Aussagen zur Auswirkung von Fließhilfsmitteln oder anderen Beimengungen auf das Fließverhalten), Produktüberwachung und Qualitätssicherung. Jenike [11], [12] übertrug als erster die kontinuumsmechanischen Methoden der Bodenmechanik auf Schüttgüter in Silos. Er entwickelte dazu ein Schergerät (Jenike-Schergerät – noch immer Standardmessgerät der Schüttguttechnik) mit dem Messungen der Fließeigenschaften eines Schüttgutes möglich sind. In weiterer Folge entwickelte er auch ein Verfahren (Jenike-Verfahren) zur Auslegung von Bunkern und Silos. [15], [22]

## 2.1 Fließeigenschaften von Schüttgütern

Wenn ein Schüttgut zum „Fließen“ gebracht wird, bedeutet dies, dass es sich aufgrund einer wirkenden Belastung plastisch verformt (z.B. beim Bruch einer vorher verfestigten Schüttgutprobe). Ein „gutes Fließverhalten“ bedeutet demnach, dass sich das Schüttgut ohne Aufwand zum Fließen bringen lässt (z.B. wenn es sich nicht verfestigt und allein aufgrund der Schwerkraft aus einem Silo ausfließt). Schüttgüter die sich bei Lagerung oder Transport verfestigen oder zu Auslaufstörungen neigen bezeichnet man als „schlecht fließend“. Unter Auslaufstörungen versteht man z.B. Brückenbildung oder Schachtbildung in Bunkern. [19], [21]

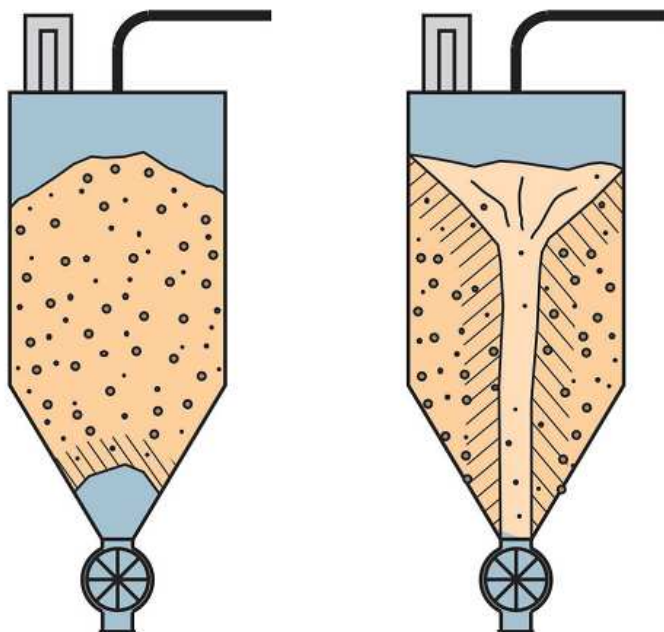


Abbildung 2: links: Brückenbildung, rechts: Schachtbildung

Grundsätzlich hängen Fließeigenschaften von Schüttgütern von vielen Parametern ab. Einige sind nachfolgend aufgezählt [21]:

- Partikelgrößenverteilung,
- Partikelform,
- chemische Zusammensetzung der Partikel,
- Feuchtigkeit,
- Temperatur,

Da es nicht möglich ist die Abhängigkeit der Fließfähigkeit eines Schüttgutes von all diesen Parametern theoretisch und allgemeingültig zu beschreiben müssen Messgeräte verwendet werden. Man benötigt für eine quantitative Aussage zur Fließfähigkeit einen objektiven Kennwert. Dieser muss all die physikalischen Eigenschaften des Schüttgutes beinhalten, die für das Fließverhalten verantwortlich sind. Dies soll nun anhand eines einachsigen Druckversuches dargestellt werden. [21], [22]

### 2.1.1 Das Modell des einachsigen Druckversuches

Die nachfolgende Abbildung zeigt solch einen einachsigen Druckversuch [19]:

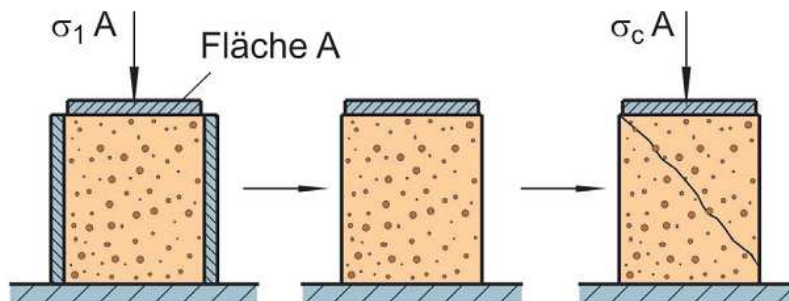


Abbildung 3: einachsiger Druckversuch

#### 2.1.1.1 Verfestigung von Schüttgütern

In Abbildung 3 ist ein Hohlzylinder, welcher mit feinkörnigem Schüttgut gefüllt ist und eine Querschnittsfläche von  $A$  aufweist, zu sehen. Die Innenwand des Hohlzylinders wird als reibungsfrei angenommen. In vertikaler Richtung wird das Schüttgut nun durch die Spannung  $\sigma_1$ , der **Verfestigungsspannung** bzw. größten Hauptspannung, belastet. Je nach dem wie stark sich das Schüttgut verdichten lässt, nimmt dessen Volumen dabei ab. Die Schüttgutdichte nimmt bei gut fließendem, trockenem Schüttgut mit groben, harten Partikeln, wie z.B. Getreidekörner oder Glaskugeln, kaum zu. Bei feinem und/oder feuchtem Schüttgut, wie z.B. Mehl oder Sand, wird eine stärkere Zunahme der Schüttgutdichte die Folge sein. Auch die Festigkeit der Schüttgutprobe nimmt durch die Verfestigungsspannung zu. Es erfolgt also ein Verdichten und Verfestigen des Schüttgutes durch die Verfestigungsspannung. [21]

Nach der Verfestigung wird in der Reihenfolge die Verfestigungsspannung und der Hohlzylinder entfernt und das Schüttgut einer erneuten vertikalen Belastung (Druckspannung) ausgesetzt bis es zum Bruch der Probe bei einer bestimmten Spannung ( $\sigma_c$  bzw.  $f_c$ ...**Schüttgutfestigkeit** bzw. **Druckfestigkeit**) kommt. In der Schüttguttechnik wird



dieser Bruch als „**beginnendes Fließen**“ bezeichnet. Dabei handelt es sich um ein plastisches Fließen unter Dichteabnahme (Auflockerung im Bereich der Bruchfläche). Da der Bruch erst bei einer bestimmten Vertikalspannung, der Druckfestigkeit, eintritt existiert eine schüttgutspezifische Fließgrenze. Die Fließgrenzen von Schüttgütern sind von der Vorgeschichte, der vorangegangenen Verfestigung, abhängig. Trägt man nun Wertepaare ( $\sigma_c$  über  $\sigma_1$ , bzw.  $\rho_b$  über  $\sigma_1$ ) von mehreren solchen Versuchen in Diagrammen ein und verbindet diese so erhält man folgende Verläufe [21], [22]:

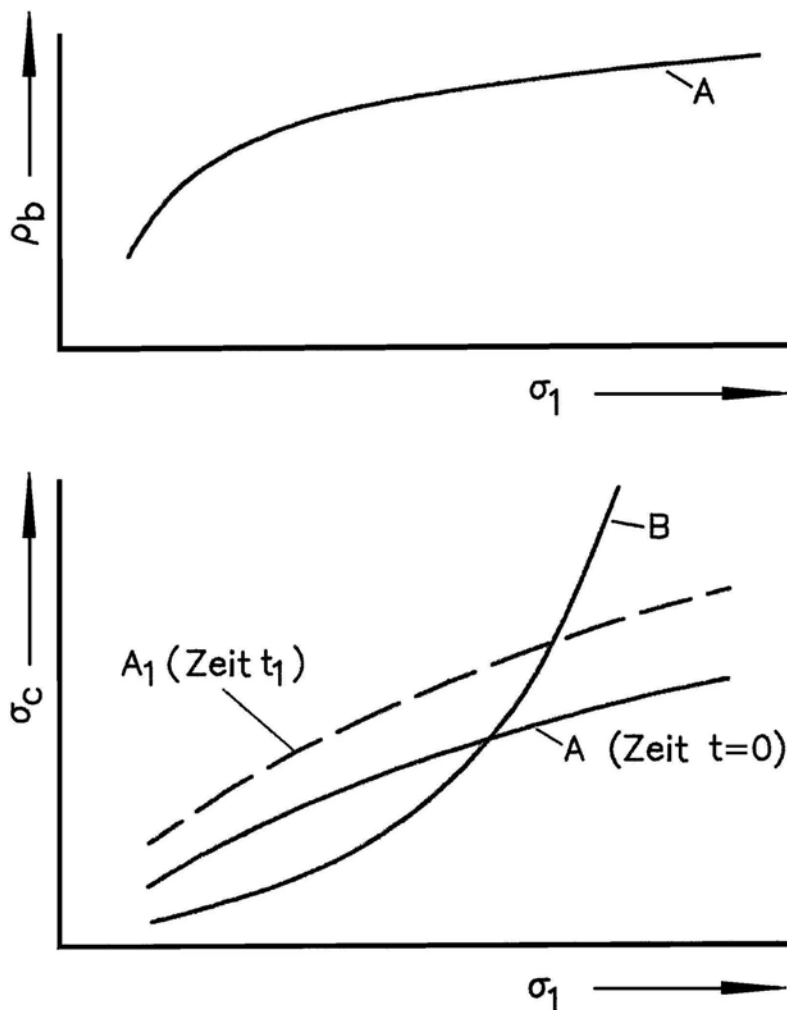


Abbildung 4: Schüttgutedichte  $\rho_b$  und Druckfestigkeit  $\sigma_c$  in Abhängigkeit von der Verfestigungsspannung  $\sigma_1$

Die Funktion A ist ein für Schüttgüter typischer Verlauf während Funktion B (progressiv steigender Verlauf) eher selten und meist auch nur in einem begrenzten Spannungsbereich anzutreffen ist. Der Kurvenverlauf  $\sigma_c(\sigma_1)$  wird **Fließfunktion** genannt. [21]

### 2.1.1.2 Zeitverfestigung

Manche Schüttgüter verfestigen sich, wenn sie längere Zeit in Ruhe unter Druckspannung (z.B. in Silos oder Transportbehälter) gelagert werden. Dieser Effekt wird als **Zeitverfestigung** bzw. Verklumpung oder auch als Caking bezeichnet. Dabei wachsen Haftkräfte zwischen benachbarten Partikeln im Inneren des Schüttgutes stark an. Bewegt man nun diese Partikel gegeneinander, verschwinden diese Haftkräfte wieder. Sie bilden sich jedoch erneut, wenn das Schüttgut wieder in Ruhe gelagert wird. [21]

Eine umfassende Übersicht über die verschiedenen Haftmechanismen der Feststoffpartikel in gasförmiger Umgebung hat Rumpf gegeben. In vereinfachter Form nach Schubert ist sie in nachfolgender Abbildung 5 dargestellt. Unterschieden wird dabei zwischen stofflichen Kraftübertragungen über feste oder flüssige Brücken und immaterielle Kraftübertragungen aufgrund von Feldern. Magnetfeld und Schwerfeld sind weggelassen, weil sie in diesem Zusammenhang keine Rolle spielen. Schließlich ist auch die formschlüssige Verbindung von Partikeln möglich, insbesondere bei faserigen und sehr flachen Teilchenformen (Verhaken, Verknäueln, Falten usw.) [24].

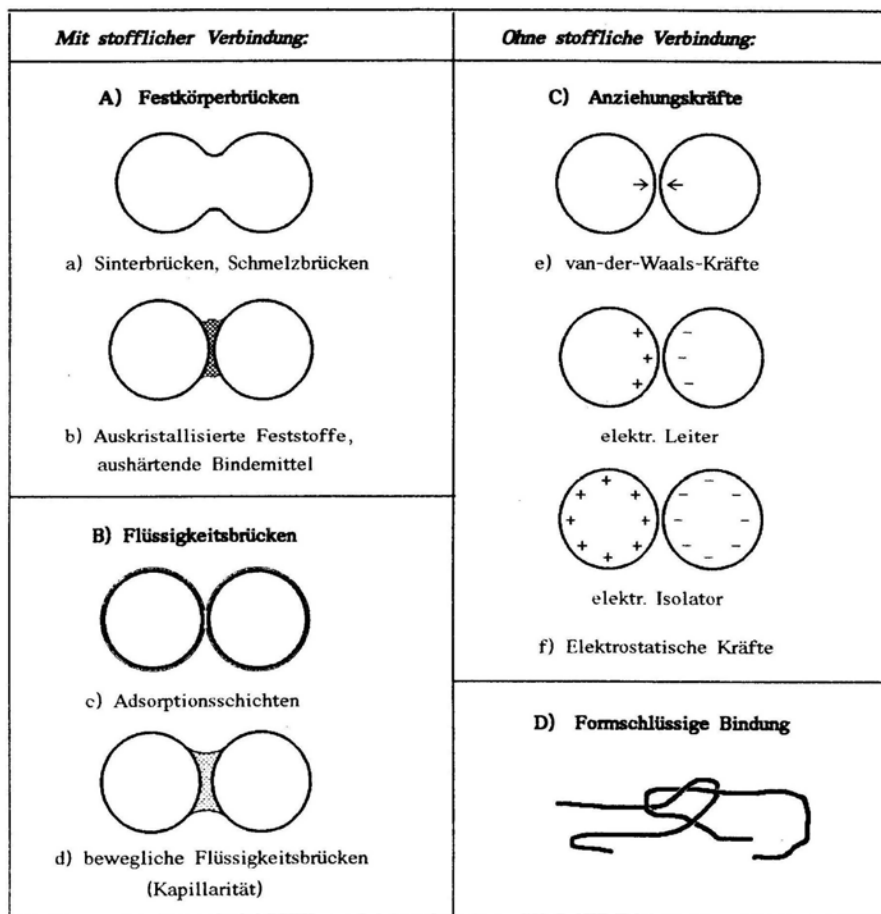


Abbildung 5: Haftmechanismen zwischen Feststoffteilchen nach Rumpf und Schubert

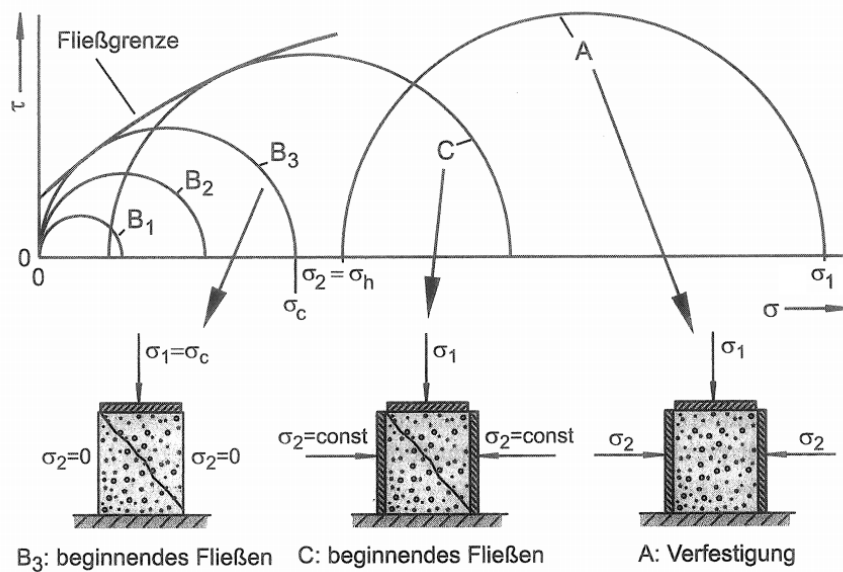
Die Zeitverfestigung lässt sich ebenfalls mit Hilfe des einachsigen Druckversuches bestimmen. Die Verfestigungsspannung  $\sigma_1$  lässt man dann eine bestimmte Zeitspanne  $t_1$  auf das Schüttgut einwirken und erst danach bestimmt man die Schüttgutfestigkeit. Es werden also die Verhältnisse bei einer Langzeitlagerung simuliert. Für das Schüttgut A ist so ein Kurvenverlauf beispielhaft für eine Lagerzeit von  $t_1 > 0$ , dargestellt (Kurve  $A_1$  in Abbildung 4). Solche Kurven werden **Zeitfließfunktionen** genannt. [22]

Für das Beispiel des Schüttgutes A ergeben sich mit zunehmender Lagerzeit immer größere Druckfestigkeiten  $\sigma_c$ . Dies ist aber nicht immer der Fall. Es gibt Schüttgüter (z.B.: trockener Quarzsand), bei denen mit zunehmender Lagerzeit kein Anstieg von  $\sigma_c$  erfolgt. Diese Schüttgüter unterliegen somit keiner oder nur einer geringen Zeitverfestigung. Andere Schüttgüter hingegen verzeichnen schon nach wenigen Stunden Lagerzeit einen Anstieg der Druckfestigkeit. Werden sie aber noch länger gelagert, so erfolgt oft keine weitere Zunahme der Druckfestigkeit mehr. Diese Unterschiede können auf verschiedene physikalische, chemische oder biologische Effekte (z.B.: chemische Prozesse, Kristallbildung zwischen den Partikeln, Vergrößerung der Kontaktflächen durch plastisches Fließen der Partikel, Kapillarkondensation oder biologische Prozesse wie z.B. Pilzwachstum) zurückgeführt werden. Eine Zeitraffer-Messung ist bei Versuchen zur Zeitverfestigung nicht möglich, da die Schüttgutprobe über genau einer bestimmten Zeitspanne unter der Verfestigungsspannung lagern muss. Der Grund ist, dass die genannten Prozesse wie z.B. das Kristallisieren Zeit benötigen um den Effekt der Zeitverfestigung hervorzurufen. Nur mit diesen entsprechenden Messungen lassen sich Aussagen über die Zeitverfestigung machen. [21]

### 2.1.1.3 Darstellung durch Spannungskreise

Der vorangegangene einachsige Druckversuch kann nun in einem  $\sigma$ ,  $\tau$ -Diagramm dargestellt werden. Dabei kann angenommen werden, dass im gesamten Schüttgut der gleiche Spannungszustand vorherrscht, weshalb sich eine Beschreibung mit den Mohrschen Spannungskreisen eignet. [21]

Während der Verfestigung wirkt von oben die Normalspannung  $\sigma_1$  auf die Schüttgutprobe. Entsprechend dem vorhandenen Horizontallastverhältnis wirkt auch eine kleinere Horizontalspannung  $\sigma_2$ . Dabei sind  $\sigma_1$  und  $\sigma_2$  Hauptspannungen, da weder an der als reibungsfrei angenommenen Zylinderwand noch an der Ober- sowie Unterseite der Probe Schubspannungen ( $\tau=0$ ) wirken. Diese Punkte liegen im  $\sigma$ ,  $\tau$ -Diagramm auf der x-Achse und bilden die Hauptspannungen des Mohrkreises A (Mohrkreis der Verfestigung). [21]

Abbildung 6: Messung der Druckfestigkeit im  $\sigma$ ,  $\tau$ -Diagramm

Auch bei nachfolgendem, beginnendem Fließen sind die Horizontal- und Vertikalspannungen Hauptspannungen. Bei ansteigender, vertikaler Belastung werden dabei auch die Spannungskreise größer ( $B_1$  bis  $B_3$ ), wobei die Horizontalspannung  $\sigma_2$  stets Null ist, da keine seitliche Abstützung durch den Hohlzylinder mehr erfolgt. Beim Spannungskreis  $B_3$  kommt es nun zum Bruch (Fließen) der Probe, weshalb Spannungskreis  $B_3$  die Fließgrenze nun erreicht hat. Eine mögliche Fließgrenze ist in Abbildung 6 eingezeichnet. Spannungskreise, unterhalb von  $B_3$  (Spannungskreis des Bruches) führen dabei nur zu einer elastischen Verformung, und Spannungskreise größer als  $B_3$  (über der Fließgrenze) können nicht existieren, da die Probe vorher schon fließen würde. [21]

Im Spannungskreis  $C$  der Abbildung 6 wird eine Messung der Druckfestigkeit gezeigt, bei der die Probe einer Vertikal- und auch einer konstanten Horizontalspannung, größer Null, ausgesetzt wird. Solch ein Spannungskreis würde ebenfalls zum Bruch der Probe führen und die Fließgrenze tangieren. [21]

#### 2.1.1.4 Kennzahlen der Fließfähigkeit

Zur Kennzeichnung der Fließfähigkeit eines Schüttgutes eignet sich gegebenenfalls die Lagerzeit, sowie die Abhängigkeit der Druckfestigkeit  $\sigma_c$  von der Verfestigungsspannung  $\sigma_1$ . Dazu wird üblicherweise das Verhältnis  $ff_c$  von Verfestigungsspannung  $\sigma_1$  zur Druckfestigkeit  $\sigma_c$  gebildet. [21]

$$ff_c = \frac{\sigma_1}{\sigma_c} \tag{1}$$

Je größer  $ff_c$  ist desto kleiner ist die Druckfestigkeit im Verhältnis zur Verfestigungsspannung und desto besser fließt ein Schüttgut. Eine übliche Einteilung ist dabei [19], [22]:

Tabelle 1: Einteilung der Schüttgüter nach der Fließfähigkeit

Einteilung der Schüttgüter nach der Fließfähigkeit	
$ff_c < 1$	nicht fließend
$1 \leq ff_c < 2$	sehr kohäsiv (bis nicht fließend)
$2 \leq ff_c < 4$	kohäsiv
$4 \leq ff_c < 10$	leicht fließend
$10 \leq ff_c$	frei fließend

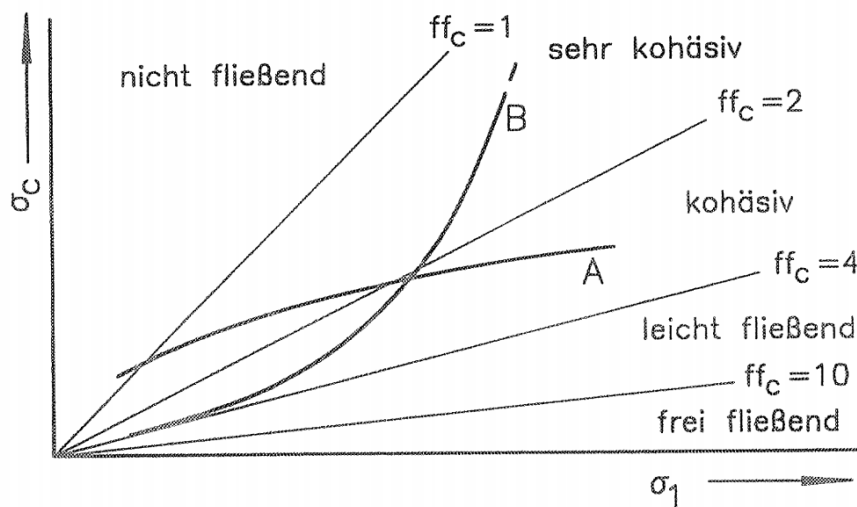


Abbildung 7: Bereiche unterschiedlicher Fließfähigkeiten

Die Einteilung erfolgt hier anhand einer Tabelle, sowie der daraus folgenden graphischen Abbildung inklusive einer möglichen Fließfunktion A oder B. Daraus sieht man auch, dass sich das Verhältnis  $ff_c$  mit steigender Verfestigungsspannung  $\sigma_1$  ändert. **Die Fließfähigkeit eines Schüttgutes ist somit vom Spannungsniveau abhängig** und wird meist auch mit zunehmender Verfestigungsspannung größer. Somit ist es nicht möglich mehrere Schüttgüter alleine mittels  $ff_c$ -Werten quantitativ zu vergleichen, sofern sie bei unterschiedlichen Verfestigungsspannungen ermittelt wurden. Fast jedes Schüttgut kann eine gute Fließfähigkeit erreichen sofern es nur stark genug verfestigt wurde. So kann ein an

sich gut fließendes Schüttgut, bei sehr geringen Verfestigungsspannungen gemessen, sehr kleine  $ff_c$ -Werte annehmen und augenscheinlich als schlechter fließend gelten, während ein schlecht fließendes Schüttgut, bei hohen Verfestigungsspannungen gemessen, hohe  $ff_c$ -Werte erreicht (Abbildung 7). Eine vergleichende Beurteilung der beiden Schüttgüter kann nur mit  $ff_c$ -Werten erfolgen die aus Messungen mit gleichen Verfestigungsspannungen stammen. Es ist also immer wichtig neben der Angabe des  $ff_c$ -Wertes auch die Verfestigungsspannung und gegebenenfalls auch die Verfestigungszeit anzugeben. Daraus folgt, dass stets bei den Verfestigungsspannungen und Lagerzeiten zu messen ist, die bei der aktuellen Problemstellung auftreten (z.B. Schüttgutspannungen und Lagerzeit bei Lagerung in Säcken auf Paletten). [21], [22]

## 2.1.2 Das Messprinzip mit Schergeräten

Die Messung mittels einachsigen Druckversuch ist in einigen Punkten problematisch (zu geringe, systembedingte, gemessene Druckfestigkeiten; Reibung bei Hohlzylinder; keine Ermittlung von weiteren wichtigen Größen wie innere Reibung des Schüttgutes sowie Wandreibung) weshalb meist Schergeräte zur Messung von Schüttgütern verwendet werden. [21]

### 2.1.2.1 Messprozedur

Die Messung erfolgt, wie beim einachsigen Druckversuch, in zwei Schritten. Zuerst wird eine Schüttgutprobe verfestigt und anschließend ein Punkt der Fließgrenze ermittelt. Diese beiden Schritte werden als „**Anscheren**“ bzw. „**Abscheren**“ bezeichnet. [21]

Das Prinzip einer Scherverformung wird in nachfolgender Grafik dargestellt [21]:

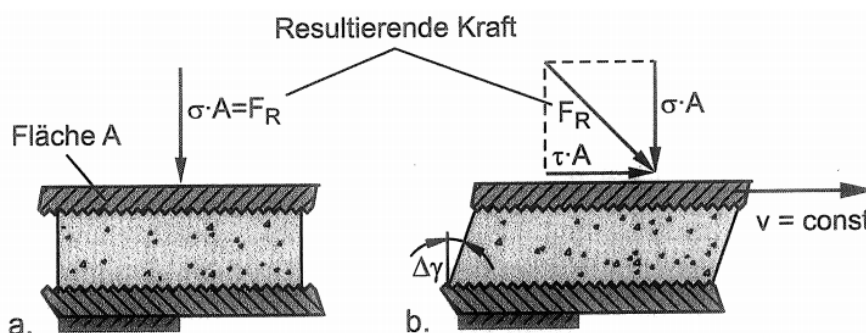


Abbildung 8: a) Erstbelastung der Schüttgutprobe mit der vertikalen Normalspannung  $\sigma$ ; b) Scherverformung

Nachdem die Schüttgutprobe über die Querschnittsfläche  $A$  mit der Normalspannung  $\sigma$  vertikal belastet wurde, wird sie einer Scherverformung unterzogen. Dabei werden Ober- und Unterseite der Schüttgutprobe mit der Geschwindigkeit  $v$  horizontal gegeneinander verschoben. Die auftretende Schubspannung  $\tau$ , welche durch die innere Reibung des Schüttgutes entsteht, wird gemessen. [21]

Durch die Belastung einer sehr lockeren Schüttgutprobe mit der Normalspannung  $\sigma$  verdichtet sich das Schüttgut zu Beginn nur ein wenig und die Schüttgutdichte steigt an. Die nun folgende Scherverformung bewegt Partikel gegeneinander und führt zum Auftreten der Schubspannung  $\tau$ . Da die Partikel am Anfang bei einer sehr lockeren Schüttgutprobe nicht sehr dicht beieinander liegen und somit die Haftung wegen der großen Abstände von Partikel zu Partikel gering ist, wird die Reibung zwischen den Partikeln zunächst noch sehr klein sein. Die nötige Schubspannung zur Verformung ist zu Beginn also noch gering. Durch zunehmende Scherverformung verdichtet und verfestigt sich das Schüttgut mehr und mehr, so dass die Haftkräfte und die Reibungskräfte zwischen den Partikeln zunehmen. Beim weiteren Scheren führt dies zur Zunahme der Schubspannung  $\tau$  und der Schüttgutdichte  $\rho_b$ . Es findet eine plastische Verformung (bleibende Verformung die nach Wegnahme der Belastung nicht wieder verschwindet) des Schüttgutes mit Zunahme der Schüttgutdichte  $\rho_b$  (**Volumenabnahme**) statt. Ein lockeres Schüttgut, welches zu Beginn mit einer dementsprechend hohen Normalspannung  $\sigma$  belastet wird, so dass bei einem nachfolgenden Schervorgang eine plastische Verformung unter Volumenabnahme erfolgt, nennt man **unterverfestigte Probe**. Das Schüttgut ist also durch die Belastung mit der Normalspannung  $\sigma$  vor dem Schervorgang unterverfestigt und nicht etwa schon kritisch verfestigt wie es im Schrifttum zuweilen behauptet wird. [15] Der Kurvenverlauf von  $\tau$  und  $\rho_b$  solch einer Scherverformung wird in der nachfolgenden Abbildung dargestellt [21]:

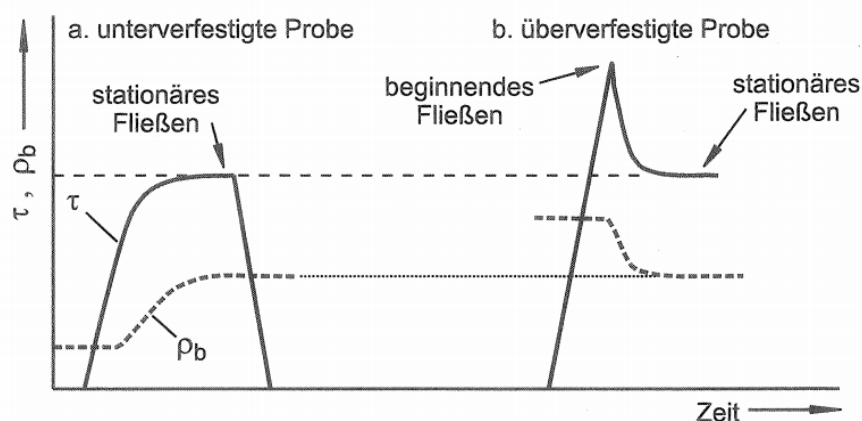


Abbildung 9: Verlauf der Schubspannung  $\tau$  und Schüttgutdichte  $\rho_b$  in Abhängigkeit der Zeit beim Scheren einer a) unterverfestigten Probe; b) überverfestigten Probe mit jeweils der gleichen Normalspannung  $\sigma$



Während man zu Beginn des Scherens noch von einer elastischen Verformung sprechen kann, erreicht man mit verstärktem Anstieg der Schüttguldichte  $\rho_b$  den Bereich der plastischen Verformung. Nun flacht bei weiterem Scheren der Anstieg der Schubspannung  $\tau$  und Schüttguldichte  $\rho_b$  immer mehr ab. Ist keine Steigung der Kurven mehr gegeben spricht man nun von einem **stationären Fließen**, bei dem die Reibung zwischen den Partikeln ihren größten Wert erreicht hat und die Schubspannung  $\tau$ , die Schüttguldichte  $\rho_b$  und die Festigkeit konstant bleiben. Dieser Zustand des stationären Fließens sollte beim Anschervorgang erreicht werden und man bezeichnet das Schüttgut dann als **kritisch verfestigt** bezüglich der angelegten Normalspannung  $\sigma$ , die während des gesamten Anscherens konstant gehalten wird. [21]

Im zweiten Schritt wird nun ein Schervorgang mit einer vorher sehr stark verfestigten (**überverfestigten Probe**) durchgeführt. Es wird zur besseren Erklärung, vorerst noch dieselbe Normalspannung  $\sigma$  über den gesamten Schervorgang wieder konstant gehalten. Die Probe wurde aber vorher mit einer größeren Normalspannung belastet und geschert (z.B. durch Anschervorgang), und dadurch überverfestigt. Die Partikel liegen dadurch sehr nahe beieinander, was eine große Schüttguldichte  $\rho_b$  der Probe und große Haftkräfte zwischen den Partikeln zur Folge hat. Beim Scheren einer überverfestigten Probe müssen aber die aneinander haftenden Partikel gegeneinander verschoben werden um ein Fließen der Probe zu erhalten. Die Fließgrenze muss also erreicht werden und dies erfordert starke Schubspannungen. Am Beginn des Scherens wird die Schubspannung  $\tau$  zunehmen und eine zunächst elastische Verformung des Schüttgutes (noch kein Fließen) bewirken (siehe auch Abbildung 9 b). Erst wenn die Schubspannung  $\tau$  groß genug ist wird es zum Bruch (**beginnendes Fließen**) im Schüttgut kommen. Dieser Bruch beschränkt sich im Regelfall nur auf eine Zone mit geringer Dicke (Scherzone), in der sich nun die Partikel gegeneinander verschieben und die Abstände zwischen den Partikeln zunehmen, die Schüttguldichte  $\rho_b$  abnimmt (**Volumenzunahme**) und die Haftkräfte zwischen den Partikeln sich verringern. Eine Abnahme der Festigkeit des Schüttgutes und eine Verringerung der aufzubringenden Schubspannung  $\tau$  (Abfall der Schubspannung  $\tau$  nach dem Bruch – siehe Abbildung 9 b) sind die Folge. Wird das Schüttgut nach dem Bruch weiter geschert so lockert es sich mehr und mehr auf bis schließlich **stationäres Fließen** erreicht wird. [21]

In diesem Punkt stellt sich dann dieselbe konstante Schubspannung  $\tau$  und Schüttguldichte  $\rho_b$  ein (bei überverfestigten Proben allerdings nur in der Scherzone), die man auch beim Scheren einer unterverfestigten Probe im Zustand des stationären Fließens erhalten würde (vergleiche Abbildung 9 a und b). Demnach ist stationäres Fließen ein Prozess, der das Schüttgut in einen reproduzierbaren, definierten Zustand hinsichtlich Schüttguldichte und Festigkeit bringt. Deshalb verwendet man das stationäre Fließen zur definierten Verfestigung bei der Messung von Schüttguteigenschaften. Eine Messung beginnt man aber immer mit einer unterverfestigten Schüttgutprobe, um durch das Anscheren eine homogenere Probe für das nachfolgende Abscheren zu erhalten. Bei Beginn eine Messung mit einer überverfestigten Probe würde man eine homogenere Probe nur für den begrenzten Bereich



der Scherzone erhalten. Der andere Bereich würde die ursprüngliche größere Schüttgutedichte aufweisen. [21]

Beim Anscheren wird nun eine unterverfestigte Probe mit der Normalspannung des Anscherens  $\sigma = \sigma_{an}$  belastet und anschließend geschert, bis sich stationäres Fließen einstellt. Die Schüttgutprobe ist nun kritisch verfestigt bezüglich der Anschernormalspannung  $\sigma_{an}$ , welche man nun auch kritische Normalspannung nennt. Die Schüttgutedichte  $\rho_b$  und die Anscherschubspannung  $\tau_{an}$  sind bei stationärem Fließen konstant und charakteristisch für die aufgebrachte Anschernormalspannung  $\sigma_{an}$ . Auch kann dieser identische Verfestigungszustand mit der gleichen Probe und derselben Normalspannung wieder reproduziert werden. Das Anscheren dient demnach dem Erreichen eines definierten und reproduzierbaren Verfestigungszustandes. Ob dieser bereits erreicht ist kann durch den Kurvenverlauf (konstante Schubspannung = stationäres Fließen) kontrolliert werden. Dies stellt einen großen Vorteil der Schergeräte gegenüber dem einachsigen Druckversuch dar. Das Wertepaar  $\sigma_{an}/\tau_{an}$  wird für die Auswertung der Messung notiert und in ein  $\sigma, \tau$ -Diagramm (Abbildung 10) eingetragen (Anscherpunkt). Nach der Zurücknahme der Schubspannung ( $\tau=0$ ) kann der Abschervorgang beginnen. Dies erfolgt bei einer geringeren Normalspannung  $\sigma_{ab} < \sigma_{an}$  als beim Anscheren, was ein Scheren einer überverfestigten Probe bezüglich  $\sigma_{ab}$  entspricht (Kurvenverlauf wie in Abbildung 9 b). Wäre die Probe beim Abschervorgang unter der geringeren Normalspannung  $\sigma_{ab}$  geschert worden hätte sie jetzt eine geringere Schüttgutedichte und Festigkeit und wäre bezüglich der Normalspannung  $\sigma_{ab}$  auch nicht überverfestigt. Wie in der Abbildung 9 b ersichtlich ist kommt es nun im Laufe des Scherens zu einem Maximum der Schubspannung (beginnendes Fließen bzw. Bruch der Probe). Diese Spitze legt das Wertepaar Abschernormalspannung/Abscherschubspannung ( $\sigma_{ab}/\tau_{ab}$ ) fest und kann im  $\sigma, \tau$ -Diagramm (Abbildung 10) als ein Punkt der Fließgrenze bzw. Abscherpunkt eingezeichnet werden. [21]

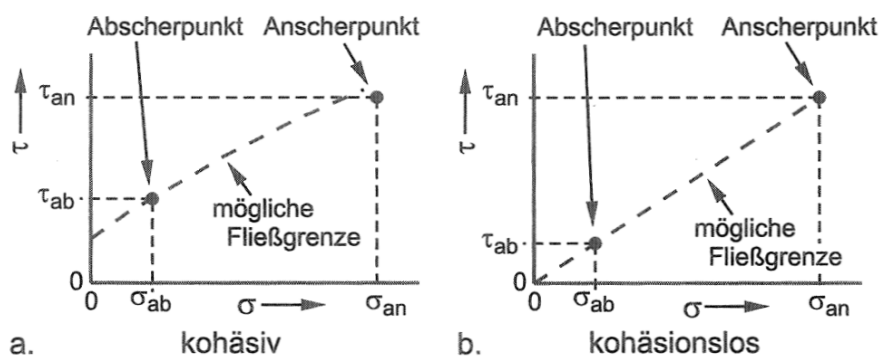


Abbildung 10: Anscherpunkt und Abscherpunkt im  $\sigma, \tau$ -Diagramm für a) kohäsives und b) kohäsionsloses Schüttgut

An dieser Stelle sei auch der Unterschied von zwei verschiedenen Schüttgütern angeführt. Man unterscheidet dabei kohäsive und kohäsionslose Schüttgüter. Unter kohäsiven

Schüttgütern versteht man Schüttgüter deren Festigkeit sich durch das Aufbringen einer Verfestigungsspannung vergrößert. Die Haftkräfte innerhalb des Schüttgutes beeinflussen dabei wesentlich die Lage der Fließgrenze im  $\sigma, \tau$ -Diagramm. Je stärker die Haftkräfte wirken, desto höher liegt der gezeigte Abscherpunkt in Abbildung 10 a. Haben hingegen die Haftkräfte keinen Einfluss lässt sich das Schüttgut nicht verfestigen und man erhält im Laufe des Abschervorganges kein Maximum der Schubspannungskurve. Man spricht dann von kohäsionslosen Schüttgütern. Die Fließgrenze bildet dann eine Gerade durch den Ursprung der Koordinatenachsen des  $\sigma, \tau$ -Diagrammes (Abbildung 10 b). Auf der Gerade der Fließgrenze liegt dann der Abscherpunkt und Anscherpunkt. [21]

Wird der Abschervorgang nun zu Ende geführt fällt die Schubspannungskurve durch die Entfestigung (Dichteabnahme, Auflockerung in der Scherzone) wieder etwas ab um danach bei stationärem Fließen konstant zu bleiben. Der konstante Wert der Schubspannung beim Abschervorgang (bei stationärem Fließen) ist diesmal aber nicht mit dem Wert der Schubspannung beim Anschervorgang (bei stationärem Fließen) vergleichbar. Dies ergibt sich aufgrund der niedrigeren Abschernormalspannung  $\sigma_{ab} < \sigma_{an}$  und der daraus folgenden niedrigeren Schüttgutdichte sowie Festigkeit. [21]

Da nun diese Messungen (Anscheren, Abschereen) mehrere Male durchgeführt werden müssen um zu einer Fließgrenze zu kommen ist es wichtig vor jedem Abschervorgang ein Anschereen mit jeweils der gleich großen Anschernormalspannung  $\sigma_{an}$  durchzuführen. Nur so ist gewährleistet, dass vor jedem Abschereen (immer unter verschiedenen Normalspannungen  $\sigma_{ab}$ ) ein genau definierter, kritischer, immer identer Verfestigungszustand eingestellt wird. Ein Vorgehen von mehreren Abschervorgängen hintereinander nach nur einem Anschervorgang würde, aufgrund der Abhängigkeit des definierten Verfestigungszustandes von der Normalspannung, zu falschen Messwerten führen. [21]

Jede einzelne Messung liefert zwar einen immer gleich bleibenden Anscherpunkt aber immer unterschiedliche Abscherpunkte. Ein zeitlicher Verlauf mehrerer Messungen ist in der nachfolgenden Abbildung dargestellt [21]:

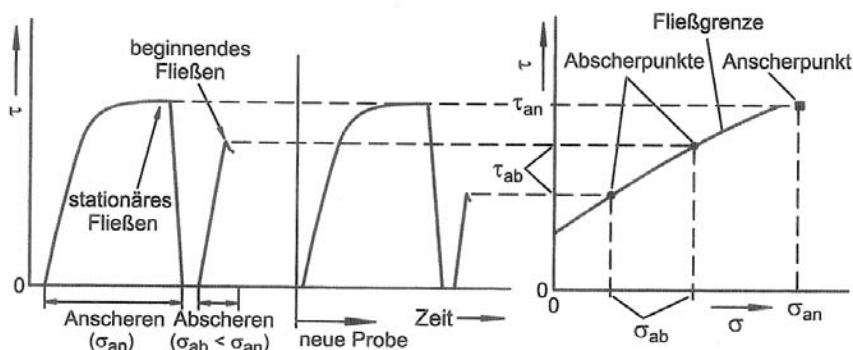


Abbildung 11: Ermittlung der Fließgrenze aus den gemessenen Schubspannungen

Die Fließgrenze selbst ergibt sich aus der Kurve, welche durch alle Abscherpunkte im  $\sigma$ ,  $\tau$ -Diagramm gelegt wird. Eine Extrapolation der Fließgrenze nach rechts zeigt, dass diese immer oberhalb des Anscherpunktes liegt (Ausnahme bei kohäsionslosen Schüttgütern – hier liegt der Anscherpunkt auf der Fließgrenze). Steht für die Messungen ein ausreichend langer Verformungsweg zur Verfügung (z.B. bei einem Ringschergerät), muss nicht wie in Abbildung 11 nach jeder Abschermessung eine neue Schüttgutprobe verwendet werden. Jedoch gilt auch in diesem Falle, vor jedem Abschervorgang kommt ein Anscheren mit jeweils derselben Normalspannung. [21]

### 2.1.2.2 Fließort und Fließeigenschaften

Eine Fließgrenze, auch als Fließort bezeichnet, gilt für exakt eine spezifische Anschernormalspannung  $\sigma_{an}$ , mit der man durch das Anscheren bis zum stationären Fließen einen genau definierten Verfestigungszustand (auch spezifische Schüttgutdichte) hergestellt hat. Da man die Anschernormalspannung beim Anscheren variieren kann gibt es auch unendlich viele Fließorte für ein Schüttgut. Üblicherweise ist ein Fließort leicht nach außen gekrümmt (je kleiner die Normalspannung desto stärker). Bei frei fließenden Schüttgütern erhält man nahezu geradlinige Fließorte. Aus den Fließorten lassen sich Schüttguteigenschaften, wie Verfestigungsspannung, Druckfestigkeit, Fließfähigkeit aber auch innere Reibung usw. bestimmen. Dazu verwendet man die Mohrschen Spannungskreise. [21]

### Verfestigungsspannung und Druckfestigkeit

Jeder Punkt eines Mohrschen Spannungskreises steht für die wirkenden Normal- und Schubspannungen in einer bestimmten Schnittebene einer Schüttgutprobe. Außerdem liegt der Mittelpunkt von jedem Mohrschen Spannungskreis (laut Herleitung) auf der  $\sigma$ -Achse. Aus der Messung erhält man das Wertepaar  $(\sigma_{an}/\tau_{an})$  des Anschervorganges (stationäres Fließen), welches den Anscherpunkt bildet. Dieser Punkt liegt auf dem Mohrschen Spannungskreis für das stationäre Fließen, da er die vorherrschende Normal- und Schubspannung beim Anscheren in einer Schnittebene (horizontale Schnittebene) des Schüttgutes angibt. Damit ist ein Punkt des Mohrschen Spannungskreises für das stationäre Fließen bekannt. D.h. der größte Mohrsche Spannungskreis in der Abbildung 12 repräsentiert die Spannungen in der Schüttgutprobe am Ende der Verfestigungsprozedur (stationäres Fließen). Um die Lage dieses Spannungskreises genau festlegen zu können nimmt man an, dass er den Fließort bei einer Normalspannung von  $\sigma < \sigma_{an}$  tangiert. Dieser Tangentialpunkt (Berührungspunkt) liegt meist links (selten aufeinander) vom Anscherpunkt und wird als Endpunkt E bezeichnet. Außerdem ist diese Annahme auch nur eine Näherung, die aber praktisch, durchaus brauchbare Ergebnisse liefert. Meist muss der Fließort nach rechts extrapoliert werden (gestrichelte Linie in Abbildung 12) um als Tangente an den Mohrschen Spannungskreis für das stationäre Fließen dienen zu können. Die gemessenen Abscherpunkte liegen meist links vom Endpunkt E. Die **größte** und kleinste **Hauptspannung**



des Spannungskreises ( $\sigma_1$  und  $\sigma_2$ ) ist festgelegt durch den rechten und linken Schnittpunkt mit der  $\sigma$ -Achse. Die größte Hauptspannung  $\sigma_1$  des Spannungskreises ist die größte wirkende Normalspannung (in allen Schnittebenen der Schüttgutprobe) beim Anscheren (stationäres Fließen). Sie ist die maßgebliche Verfestigungsspannung für den Fließort und entspricht der Verfestigungsspannung beim einachsigen Druckversuch. Die übrigen Fließeigenschaften (z.B. Schüttguldichte  $\rho_b$ ) werden in Abhängigkeit der Verfestigungsspannung  $\sigma_1$  angegeben. [21]

Eine weitere wichtige Schüttguteigenschaft ist die **Druckfestigkeit  $\sigma_c$** . Diese wird beim einachsigen Druckversuch direkt gemessen. Im Zuge eines Scherversuches kann sie nicht direkt gemessen werden, jedoch ist es möglich sie mittels Mohrschen Spannungskreis zu ermitteln. Solch ein Spannungskreis zeigt die Spannungen in einem Schüttgut, die bei einer bestimmten Belastung in verschiedenen Ebenen wirken. Wie beim einachsigen Druckversuch wirkt auch hier, im Moment des beginnenden Fließens (Bruch), auf die Oberseite des Schüttgutes nur die Normalspannung  $\sigma$  aber keine Schubspannung  $\tau$  ( $\sigma=\sigma_c$ ,  $\tau=0$ ). Auf die Seiten der Schüttgutprobe wirken keine Spannungen ( $\sigma=0$ ,  $\tau=0$ ). Dies bedeutet, dargestellt durch einen Mohrschen Spannungskreis, dass dieser Spannungskreis durch den Ursprung ( $\sigma=0$ ,  $\tau=0$ ) des  $\sigma$ ,  $\tau$ -Diagramms verläuft (Abbildung 12). Der zweite Schnittpunkt des Spannungskreises mit der  $\sigma$ -Achse liegt bei der Normalspannung  $\sigma=\sigma_c$ . Wenn eine verfestigte Schüttgutprobe (nach Anscheren) zum Fließen gebracht wird, muss in der Schüttgutprobe die Fließgrenze erreicht werden. Dies ergibt sich wenn der Spannungskreis, der die Belastung der Probe kennzeichnet, den Fließort berührt. Die Druckfestigkeit  $\sigma_c$  kann also durch das Konstruieren eines Spannungskreises, welcher den Fließort tangiert, ermittelt werden. Aus der Verfestigungsspannung  $\sigma_1$  und der Druckfestigkeit  $\sigma_c$  kann nun (wie weiter oben beschrieben) die Fließfähigkeit  $ff_c$  berechnet werden. [21]

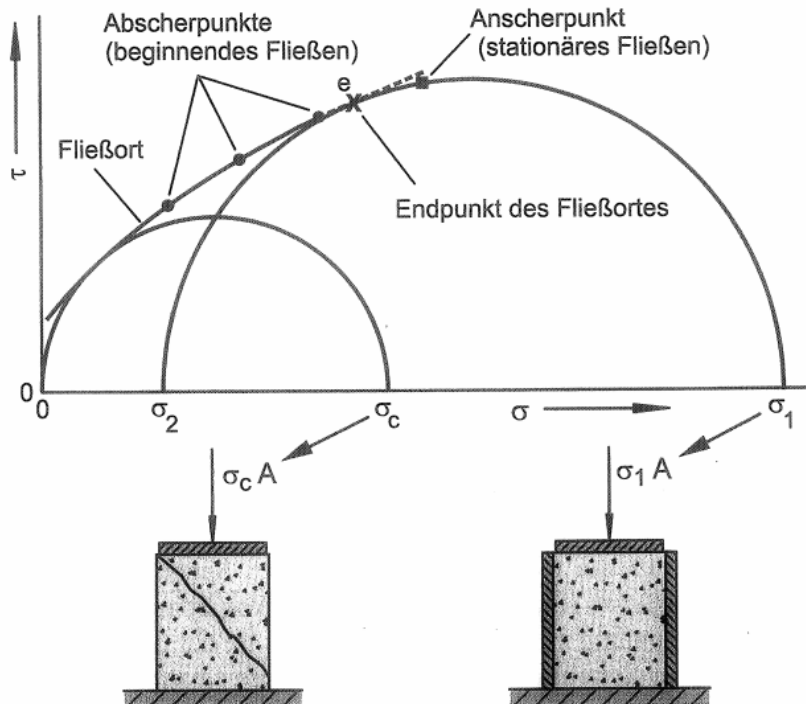


Abbildung 12: Fließort sowie Spannungskreise für die Druckfestigkeit  $\sigma_c$  und die Verfestigungsspannung  $\sigma_1$

In der Abbildung 12 sind hier das  $\sigma$ ,  $\tau$ -Diagramm und parallel dazu die Verfestigungs- sowie Messprozedur des einachsigen Druckversuches dargestellt. Dies soll verdeutlichen, dass die mit Hilfe des Fließortes ermittelten Schüttguteigenschaften (Verfestigungsspannung  $\sigma_1$ , Druckfestigkeit  $\sigma_c$ ) den entsprechenden Größen beim einachsigen Druckversuch entsprechen. [21]

Ein **Fließort** ist also die Fließgrenze eines Schüttgutes im  $\sigma$ ,  $\tau$ -Diagramm, gilt für eine bestimmte Verfestigungsspannung  $\sigma_1$  und liefert einen Wert für die Druckfestigkeit  $\sigma_c$ . Dieses Wertepaar ( $\sigma_1 / \sigma_c$ ) legt wiederum einen Punkt auf der **Fließfunktion** fest, bei der die Druckfestigkeit  $\sigma_c$  in Abhängigkeit der Verfestigungsspannung  $\sigma_1$  dargestellt wird. [21]

### Die Spannungskreise für Anscheren und Abscheren

Im Nachfolgenden sollen die einzelnen Messschritte des Schervorganges (Anscheren und Abscheren) anhand von Spannungskreisen etwas genauer dargestellt werden. Dazu ist vorerst einmal ein  $\sigma$ ,  $\tau$ -Diagramm mit Fließort und mehreren Spannungskreisen für stationäres Fließen (Anscheren) in nachfolgender Abbildung dargestellt. [21]

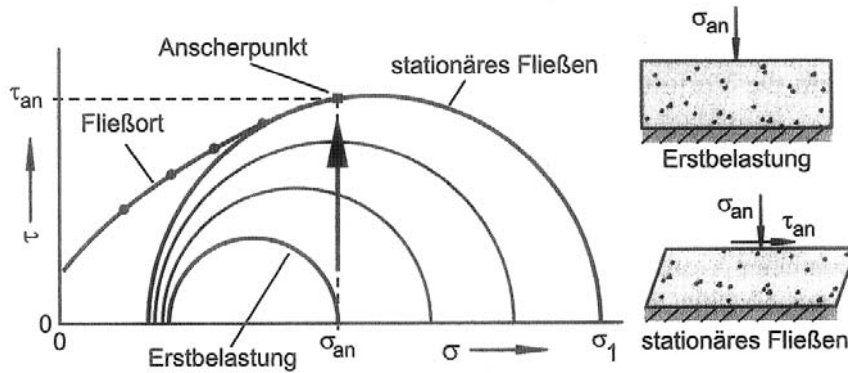


Abbildung 13: Fließort sowie Spannungskreise beim Anscheren

Zusätzlich zum  $\sigma, \tau$ -Diagramm sieht man noch rechts eine Schüttgutprobe, welche einem Anschervorgang (Belastung mit Normalspannung  $\sigma_{an}$  und nachfolgende Scherverformung) unterzogen wird. Wird das Schüttgut bei der Erstbelastung nur mit der Normalspannung  $\sigma_{an}$  belastet entspricht die größte Hauptspannung des Spannungskreises dieser Normalspannung  $\sigma_{an}$  und es wird sich senkrecht zur Normalspannung eine kleinere Spannung (Horizontalspannung mit ca. 40-50 % der Normalspannung  $\sigma_{an}$ ) einstellen. Dies ändert sich wenn das Schüttgut einer Scherverformung unterzogen wird. Die aufgebrachte Normalspannung  $\sigma_{an}$  ist nun keine Hauptspannung mehr, da in der horizontalen Schnittebene nun auch eine Schubspannung wirkt. Mit der Zunahme der Schubspannung (Pfeil in Abbildung 13) nimmt nun auch die größte Hauptspannung immer mehr zu, bis schlussendlich stationäres Fließen erreicht ist. Die größte Hauptspannung ist nun konstant und entspricht der maßgeblichen Verfestigungsspannung  $\sigma_1$  für den Fließort. Zwei mögliche Spannungskreise zwischen dem Zustand der Erstbelastung und dem stationären Fließen sind in Abbildung 13 dargestellt. [21]

Das Abschern einer verfestigten Schüttgutprobe ist nun in nachfolgender Abbildung dargestellt. [21]

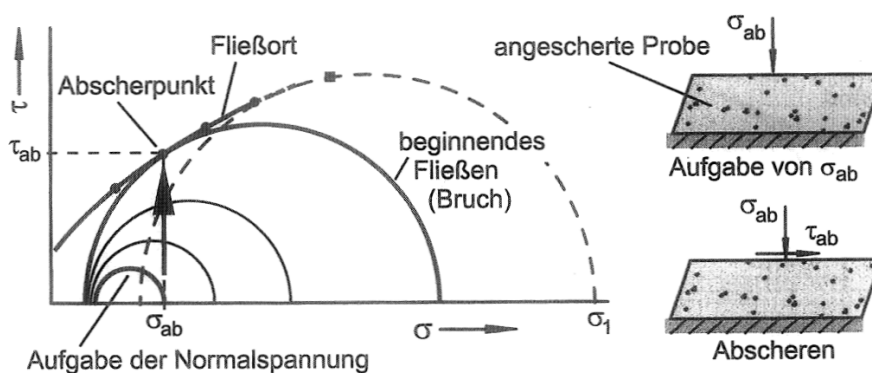


Abbildung 14: Fließort sowie Spannungskreise beim Abschern



Auch hier wird zuerst eine Schüttgutprobe (zuvor verfestigt durch Scheren bis zum stationären Fließen) mit einer Normalspannung  $\sigma_{ab}$  belastet. Wie in der Abbildung 14 ersichtlich ist, ist nun die aufgebrachte Normalspannung  $\sigma_{ab}$  die größte Hauptspannung. Danach wird nun wieder die Schüttgutprobe einer Scherverformung unterzogen, wodurch eine immer mehr steigende Schubspannung, (Pfeil in Abbildung 14) in der horizontalen Schnittebene, entsteht. Die aufgebrachte Normalspannung  $\sigma_{ab}$  ist nun keine Hauptspannung mehr. Mit steigender Schubspannung kommt es nun zum beginnenden Fließen (Bruch) der Probe (Spannungskreis berührt nun den Fließort). Eine, im Anschluss dazu, Auflockerung der Schüttgutprobe in der Schnittebene und dadurch sinkende Schubspannung ist in der Abbildung 14 nicht dargestellt. Jedoch sieht man zwei weitere Spannungskreise welche mit ansteigender Schubspannung möglich wären. Auch ist der Spannungskreis des stationären Fließens beim Anscheren (strichlierter Spannungskreis) dargestellt. [21]

### Weitere Fließigenschaften

Neben der Verfestigungsspannung  $\sigma_1$  und der Druckfestigkeit  $\sigma_c$  gibt es noch weitere Fließigenschaften, welche aus dem Fließort bestimmt werden können (siehe Abbildung 15) [21]:

- Innerer Reibungswinkel bei beginnendem Fließen  $\varphi_i$
- Steigungswinkel des linearisierten Fließortes  $\varphi_{lin}$
- Effektiver Reibungswinkel  $\varphi_e$
- Innerer Reibungswinkel bei stationärem Fließen  $\varphi_{sf}$
- Schüttgutdichte  $\rho_b$
- Kohäsion  $\tau_c$
- Einachsige Zugfestigkeit  $\sigma_t$

Der **Innerer Reibungswinkel bei beginnendem Fließen  $\varphi_i$**  ist die örtliche Neigung des Fließortes gegen die  $\sigma$ -Achse. Da ein Fließort in der Regel gekrümmt ist, variiert der innere Reibungswinkel entlang des Fließortes. Meist ist es jedoch ausreichend einen einzigen Wert für den inneren Reibungswinkel anzugeben. Dieser ist dann die **Neigung  $\varphi_{lin}$  des linearisierten Fließortes** (Tangente an die beiden Mohrschen Spannungskreise - Abbildung 15) gegen die  $\sigma$ -Achse. [21]

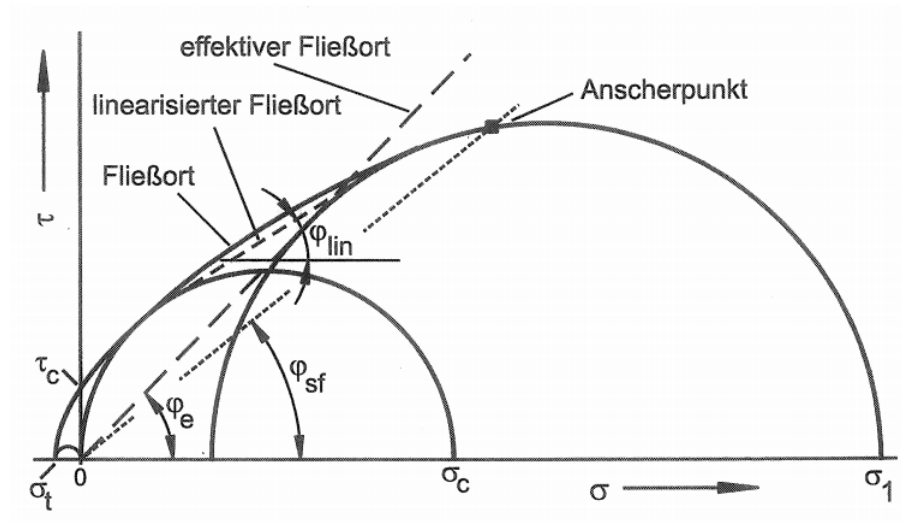


Abbildung 15: Weitere wichtige Fließigenschaften

Wie man sieht ist weder  $\varphi_i$  noch  $\varphi_{lin}$  ein Reibungswinkel im eigentlichen Sinn. Dieser würde aus dem Arcustangens des Verhältnisses von Schubspannung zu Normalspannung errechnet. Der Reibungswinkel wäre somit ein Reibungskoeffizient, ein Maß für das Verhältnis von Schubspannung zu Normalspannung. Will man nun wissen welche Schubspannung bei einer gegebenen Normalspannung nötig ist, um ein vorher verfestigtes Schüttgut zum Fließen zu bringen, zeichnet man sich den Fließort (entsprechend der Verfestigung) auf und liest die Schubspannung bei der jeweiligen Normalspannung ab. Der tatsächliche innere Reibungswinkel bei beginnendem Fließen errechnet sich dann aus dem Arcustangens des Verhältnisses von Schubspannung zu Normalspannung und ist natürlich von der Normalspannung abhängig. [21]

Als effektiven Fließort bezeichnet man die Tangente an den größten Mohrschen Spannungskreis, welche auch durch den Ursprung des  $\sigma, \tau$ -Diagrammes geht. Den Winkel zwischen dieser Geraden und der  $\sigma$ -Achse nennt man **effektiven Reibungswinkel  $\varphi_e$** . Er ist ein Maß für die Beurteilung der inneren Reibung bei stationärem Fließen und legt das Verhältnis der größten zur kleinsten Hauptspannung, des Spannungskreises für stationäres Fließen, fest. [21]

$$\sin \varphi_e = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{\sigma_1 + \sigma_2} \quad (2)$$

$$\frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \frac{1 - \sin \varphi_e}{1 + \sin \varphi_e} \quad (3)$$



Der **innere Reibungswinkel bei stationärem Fließen**  $\varphi_{sf}$  errechnet sich aus dem Verhältnis von Schubspannung  $\tau_{an}$  zur Normalspannung  $\sigma_{an}$  (bei stationärem Fließen) und ist ein Maß für die innere Reibung bei stationärem Fließen in der Schnittebene. [21]

$$\varphi_{sf} = \arctan\left(\frac{\tau_{an}}{\sigma_{an}}\right) \quad (4)$$

Im  $\sigma$ ,  $\tau$ -Diagramm ist es der Winkel zwischen der  $\sigma$ -Achse und der Geraden, welche durch den Koordinatenursprung und den Anscherpunkt ( $\sigma_{an}$ ,  $\tau_{an}$ ) verläuft. [21]

Viele Fließeigenschaften sowie auch der Fließort beziehen sich auf den Verfestigungszustand der vorverfestigten Schüttgutprobe. Aus diesem Grund muss auch die **Schüttguldichte**  $\rho_b$  (ermittelt aus Masse und Volumen des verfestigten Schüttgutes nach dem Anscheren) ermittelt werden. [21]

Fließorte im Bereich von sehr kleinen und negativen Spannungen lassen sich kaum messen. Außerdem treten in der Schüttguttechnik fast ausschließlich Druckspannungen auf, weshalb die beiden Fließeigenschaften **Kohäsion**  $\tau_c$  und **Einachsige Zugfestigkeit**  $\sigma_t$  nur am Rande eine Bedeutung haben. [21]

Wird unter verschiedenen Normalspannungen angeschert erhält man auch unterschiedliche Fließorte mit unterschiedlichen Verfestigungsspannungen  $\sigma_1$  (Abbildung 16). Jeder Fließort besitzt seine größte Hauptspannung  $\sigma_1$  (Verfestigungsspannung). Je stärker man ein Schüttgut verfestigt, desto größere Schubspannungen müssen aufgebracht werden um es zum Fließen zu bringen. D.h., je größer die Verfestigungsspannung  $\sigma_1$  ist, desto höher sind die Schubspannungswerte eines Fließortes. Jeder Verfestigungsspannung  $\sigma_1$  eines Fließortes kann eine Schüttguldichte  $\rho_b$ , eine Druckfestigkeit  $\sigma_c$ , und die Reibungswinkel  $\varphi_{lin}$ ,  $\varphi_e$ , und  $\varphi_{sf}$  zugeordnet werden. In der nachfolgenden Abbildung sind  $\sigma_1$  und der Spannungskreis für  $\sigma_c$  nur für den kleinsten Fließort eingezeichnet. [21]

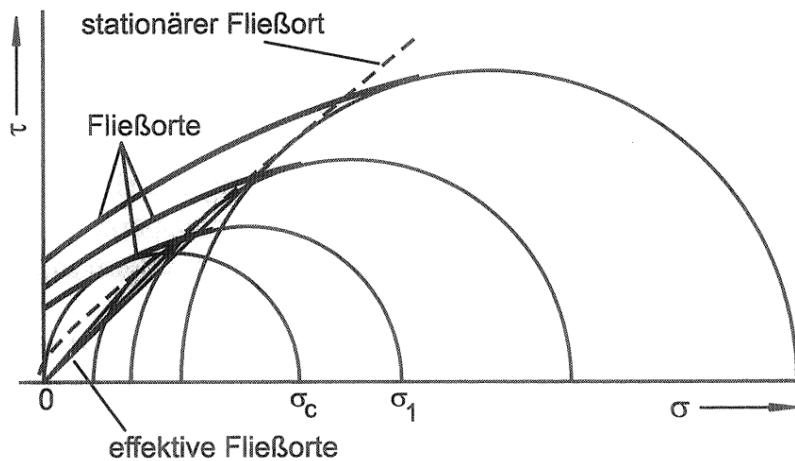


Abbildung 16: Drei unterschiedliche Fließorte eines Schüttgutes, effektive Fließorte und stationäre Fließorte

Für jeden Fließort findet man auch einen effektiven Fließort. Nimmt die Verfestigungsspannung  $\sigma_1$  zu, so nimmt der effektive Reibungswinkel  $\varphi_e$  üblicherweise ab. Bei kohäsionslosen (frei fließenden) Schüttgütern ist der effektive Reibungswinkel  $\varphi_e$  von der Verfestigungsspannung  $\sigma_1$  unabhängig. Damit fällt der effektive Fließort und der stationäre Fließort zusammen und beide verlaufen durch den Ursprung des  $\sigma, \tau$ -Diagrammes. Im Allgemeinen gilt jedoch, dass der effektive Fließort nicht mit dem stationären Fließort verwechselt werden darf (Abbildung 16). Während der effektive Fließort die Tangente (Gerade) an den Spannungskreis für stationäres Fließen ist und durch den Ursprung des  $\sigma, \tau$ -Diagrammes verläuft, ist der stationäre Fließort die Tangente an alle Spannungskreise für stationäres Fließen für unterschiedliche Spannungsniveaus. Vor allem für kohäsive Schüttgüter bildet der stationäre Fließort keine Gerade und neigt sich bei geringeren Spannungen eher nach unten. [21]

In der nachfolgenden Abbildung soll noch ein paar Abhängigkeiten von verschiedenen Fließeigenschaften von der Verfestigungsspannung  $\sigma_1$  dargestellt werden. [21]

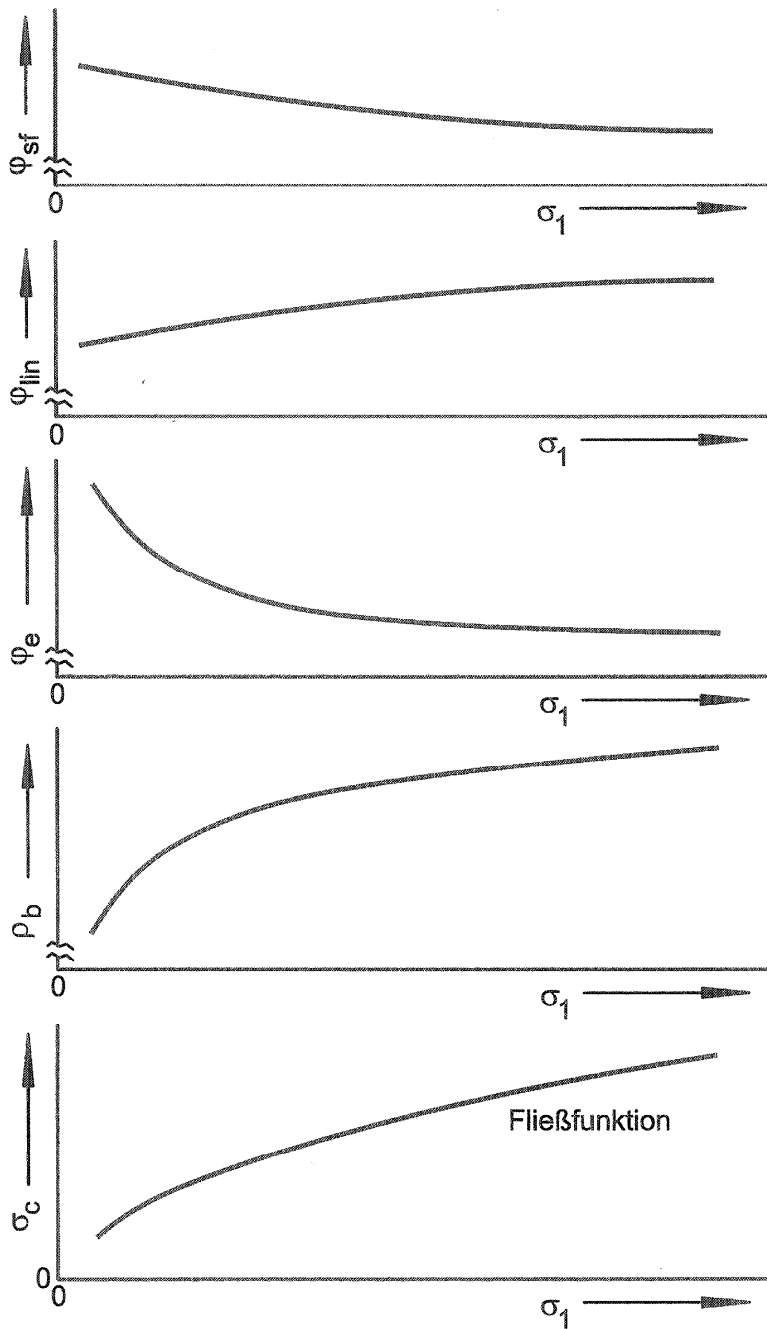


Abbildung 17: Fließeigenschaften in Abhängigkeit der Verfestigungsspannung (kohäsives Schüttgut)

Die Druckfestigkeit  $\sigma_c$  und Schüttgutedichte  $\rho_b$  zeigen einen ansteigenden Verlauf mit steigender Verfestigungsspannung  $\sigma_1$ . Dabei nimmt der Anstieg der Druckfestigkeit  $\sigma_c$  mit steigender Verfestigungsspannung  $\sigma_1$  ab und in ganz seltenen Fällen kann die Druckfestigkeit  $\sigma_c$  (in Teilbereichen) auch einen progressiven Verlauf zeigen. In den Bereichen von sehr kleinen Verfestigungsspannung  $\sigma_1$  überschreitet die Fließfunktion nur sehr selten die Gerade  $\sigma_c = \sigma_1$  nach oben. Es sind dann  $ff_c$ -Werte ( $ff_c = \sigma_1 / \sigma_c$ ) von ca. 1 zu erwarten. [21]

Da die Reibungswinkel  $\varphi_e$  und  $\varphi_{sf}$  stark von den Haft- und Reibungskräften zwischen den Partikeln abhängen nehmen sie im Normalfall bei zunehmender Verfestigungsspannung  $\sigma_1$  ab. Da sich die Haftkräfte bei zunehmenden Spannungen nicht in dem Ausmaß wie die Reibungskräfte vergrößern, nimmt deren Wirkung im Verhältnis zu den Reibungskräften bei größeren Spannungen immer mehr ab.  $\varphi_{lin}$ , der Neigungswinkel des linearisierten Fließortes, nimmt mit zunehmender Verfestigungsspannung  $\sigma_1$  in der Regel leicht zu. Dies ergibt sich, da der Anstieg der Druckfestigkeit  $\sigma_c$  mit steigender Verfestigungsspannung  $\sigma_1$  immer geringer wird. Dadurch wird der kleinste Mohrsche Spannungskreis, welcher die Druckfestigkeit bestimmt, immer kleiner im Verhältnis zum Spannungskreis für stationäres Fließen. Die Neigung des Fließortes gegen die  $\sigma$ -Achse wird damit immer größer. [21]

### 2.1.2.3 Zeitverfestigung

Die theoretische Grundlage zum Effekt der Zeitverfestigung wurde bereits im Abschnitt 2.1.1.2 besprochen. Möchte man eine Messung zur Zeitverfestigung durchführen, so ist zuvor eine Messung unter derselben Verfestigungsspannung notwendig. [21]

Die Messung der Zeitverfestigung mit dem Schergerät erfolgt ähnlich wie die Messung von Fließorten. Dazu wird die Schüttgutprobe nach dem Anscheren für eine bestimmte Zeit  $t$  unter der vertikal wirkenden Normalspannung  $\sigma = \sigma_1$ , die durch eine entsprechende Normalkraft eingestellt wird, gelagert. Es ist üblich, als Normalspannung  $\sigma$  während der Lagerung die Verfestigungsspannung  $\sigma_1$  des dazugehörigen Fließortes zu benutzen. Dadurch wirkt während der Verfestigungszeit die gleiche größte Hauptspannung (= Verfestigungsspannung  $\sigma_1$ ) auf die Schüttgutprobe wie beim Anscheren. Ihre Richtung ist jedoch gegenüber dem Anscheren um etwa  $45^\circ$  gedreht. [21]

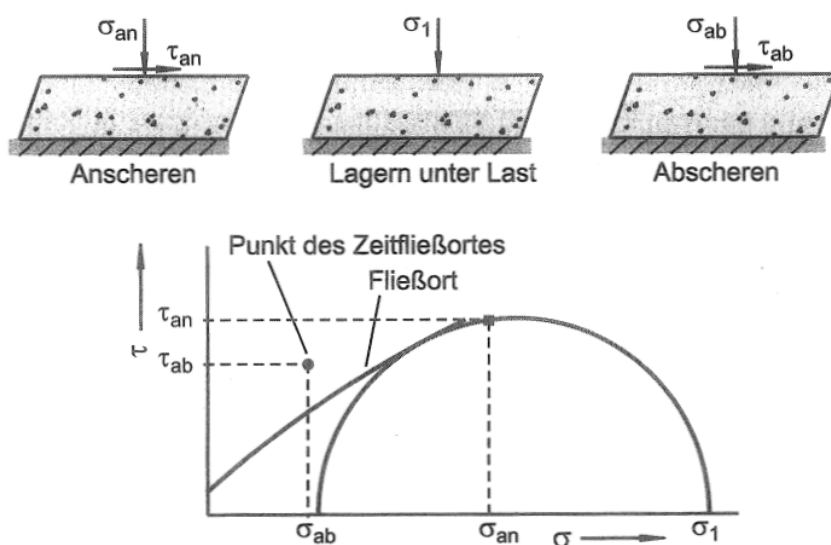


Abbildung 18: Prinzip der Zeitverfestigungsmessung mit dem Schergerät

Zum Verfestigen wird die Schüttgutprobe also geschert bis zum stationären Fließen mit einer konstanten Schubspannung  $\tau_{an}$ . Neben dieser Schubspannung wirkt beim Anscheren in der Scherebene auch noch die Anschernormalspannung  $\sigma_{an}$ . Aus den beiden Spannungen kann nun ein Spannungskreis konstruiert werden, aus dem man die größte Hauptspannung (= Verfestigungsspannung  $\sigma_1$ ) ermitteln kann (Abbildung 18). Diese größte Hauptspannung  $\sigma_1$  ist deutlich größer als  $\sigma_{an}$ . Während der Lagerung der Schüttgutprobe (Verfestigungszeit) findet keine Scherverformung mehr statt. Es wirkt demnach auch keine Schubspannung, weshalb die größte Hauptspannung gleichzusetzen ist mit der vertikal aufgetragenen Normalspannung. Eine Lagerung der Probe nur unter der Anschernormalspannung  $\sigma_{an}$  würde zu einer geringeren Belastung des Schüttgutes führen als dies beim Anscheren der Fall ist. Die vertikale Normalspannung des Schüttgutes bei der Lagerung muss demnach gleich groß sein wie die wirkende Verfestigungsspannung  $\sigma_1$  beim Anscheren. [21]

Erst nach dem Verstreichen der gewählten Lagerzeit  $t$  wird unter der Normalspannung  $\sigma_{ab} < \sigma_1$  abgeschert. Identisch wie beim Abscheren ohne Zeitverfestigung wird man auch ein Maximum  $\tau_{ab}$  im Schubspannungsverlauf messen, dass, sofern das Schüttgut einer Zeitverfestigung unterliegt, größer sein wird als das Maximum bei der Fließortmessung ohne Lagerzeit. Die maximale Schubspannung  $\tau_{ab}$  ist ein Punkt der Fließgrenze, die bei der Zeitverfestigungsmessung als Zeitfließort bezeichnet wird. Mehrere Messungen mit jeweils identischer Verfestigungsspannung und identischer Lagerzeit, aber mit unterschiedlichen Normalspannungen beim Abscheren ( $\sigma_{ab}$ ) ergeben mehrere Punkte des Zeitfließortes. Analog zum Fließort kann mit diesen Messwerten der Zeitfließort konstruiert werden. Sofern das Schüttgut einer Zeitverfestigung unterliegt ist dieser Zeitfließort gegenüber dem Fließort zu höheren Schubspannungen verschoben und besitzt demnach auch eine größere Schüttgutfestigkeit  $\sigma_c$ . Diese Druckfestigkeit  $\sigma_c$  wird wie beim Fließort durch einen Spannungskreis ermittelt. [21], [22]

Zeitfließorte kann man bei unterschiedlichen Lagerzeiten messen. Jeder Zeitfließort gilt genau für eine Lagerzeit und eine Verfestigungsspannung. Wenn die Druckfestigkeit mit der Lagerzeit zunimmt sind die Zeitfließorte umso weiter nach oben verschoben, desto länger die Lagerzeit  $t$  ist. In der nachfolgenden Abbildung sind ein Fließort und zwei verschiedene Zeitfließorte mit unterschiedlichen Lagerzeiten dargestellt. Auch hier ist ersichtlich: Die Druckfestigkeit ( $\sigma_c(t_1) < \sigma_c(t_2)$ ) steigt mit der Lagerungszeit. [21]

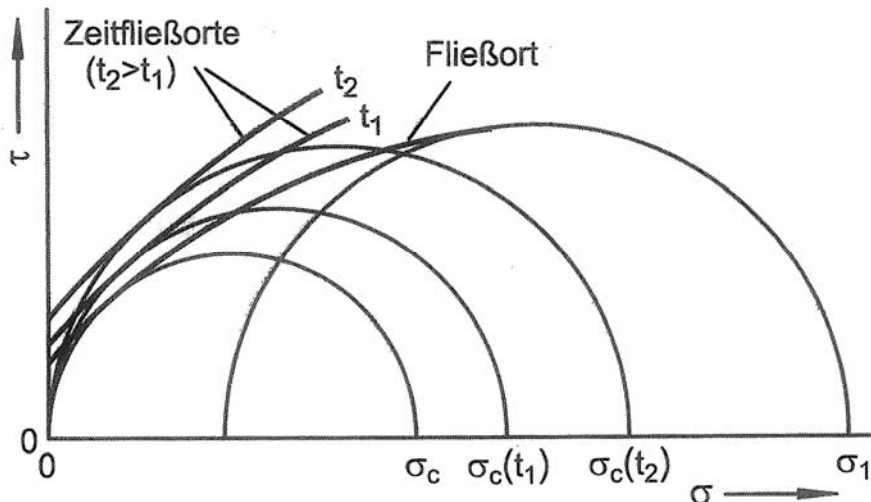


Abbildung 19: Fließort und Zeitfließort

Wenn die Verfestigungsspannung dividiert wird durch die zum jeweiligen Zeitfließort gehörige Druckfestigkeit  $\sigma_c$  erhält man die Fließfähigkeit  $ff_c$  für den Zeitfließort. Dabei ist ersichtlich, dass die Fließfähigkeit  $ff_c$  aufgrund der zunehmenden Druckfestigkeit  $\sigma_c$  mit zunehmender Lagerzeit abnimmt. [21]

Bei starker Zeitverfestigung ist es möglich, dass der Wert für  $\sigma_c$  größer ist als die Verfestigungsspannung  $\sigma_1$  beim Anscheren. Der Wert für die Fließfähigkeit  $ff_c$  würde dann  $< 1$  sein. In diesem Fall wird ein Schüttgut als verhärtet bezeichnet. [23]

Auch der innere Reibungswinkel  $\varphi_t$  bei beginnendem Fließen nach einer bestimmten Lagerzeit kann ermittelt werden. Er ist die örtliche Neigung des Zeitfließortes gegen die  $\sigma$ -Achse und kann entlang des Zeitfließortes variieren. Dies ergibt sich, da auch der Zeitfließort (wie auch der Fließort) gekrümmt sein kann. Meist genügt es jedoch einen Wert für den inneren Reibungswinkel anzugeben. Dies ist dann der Steigungswinkel der Geraden die an den Zeitfließort angenähert wird. Für  $\varphi_t$  ist die Neigung des Zeitfließortes an dessen Berührungspunkt mit dem zugehörigen Spannungskreis für die Druckfestigkeit zu benutzen. Bei Annäherung des Zeitfließortes als Gerade ist dieser Wert identisch mit der Steigung des gesamten Zeitfließortes. Zu beachten ist noch, dass weder der sogenannte innere Reibungswinkel  $\varphi_t$  noch der Steigungswinkel des Fließortes  $\varphi_i$  (bzw. der Winkel  $\varphi_{lin}$ ) keine Reibungswinkel im eigentlichen Sinn sind (siehe auch Abschnitt 2.1.2.2). [21]

Die Zeitverfestigungsmessungen sind sehr aufwendig, weshalb man oft nur einen Punkt jedes Zeitfließortes misst. Die Zeitfließorte werden dann als Parallelen zum linearisierten Fließort durch die Abscherpunkte angenommen. Die Steigungen des linearisierten Fließortes und der Zeitfließorte sind somit identisch, und auch der innere Reibungswinkel  $\varphi_t$  bei beginnendem Fließen nach einer bestimmten Lagerzeit entspricht dann der Steigung des linearisierten Fließortes  $\varphi_{lin}$ . Allerdings müssen die Ergebnisse für quantitative Anwendungen (z.B. Siloauslegung) bei solchen Vereinfachungen auf der sicheren Seite liegen. [21]

### 2.1.3 Wandreibung

Als Wandreibung bezeichnet man die Reibung zwischen einem Schüttgut und einem Festkörper, wie z.B. der Wand eines Silos. Mit ihr kann z.B. entschieden werden, ob ein Schüttgut an einer Wand abgleitet oder nicht. Bei der Messung der Wandreibung wird das Schüttgut mit einer definierten Normalspannung (Wandnormalspannung  $\sigma_w$ ) in vertikaler Richtung belastet und anschließend mit einer Geschwindigkeit  $v$  horizontal über eine Wandoberfläche geschoben. Man spricht auch hier vom Scheren. Die Wandschubspannung  $\tau_w$  steigt während des Scherens entlang der Wandprobe mit der Zeit zunächst an. Mit fortlaufendem Scheren flacht der Anstieg ab und die Wandschubspannung  $\tau_w$  bleibt schließlich konstant. Wie auch beim Anscheren bei der Fließortmessung wird dieser Zustand stationäres Fließen genannt. Die konstante Wandschubspannung  $\tau_w$  ist dabei charakteristisch für die aufgebrauchte Wandnormalspannung  $\sigma_w$  und das erhaltene Wertepaar  $\sigma_w, \tau_w$  kann notiert werden. Da nun die Wandreibung von der Wandnormalspannung  $\sigma_w$  abhängt führt man diese Messung mit verschiedenen Wandnormalspannungen durch und trägt die dabei erhaltenen Messpunkte (Wertepaare  $\sigma_w, \tau_w$ ) in ein  $\sigma, \tau$ -Diagramm ein. Die Kurve, welche durch diese Messpunkte gelegt wird (meist annähernd eine Gerade), nennt man **Wandfließort**. Der Aufbau des Messvorganges, sowie der Verlauf der Wandschubspannung in Abhängigkeit der Zeit und der Wandfließort sind in den nachfolgenden Abbildungen dargestellt. [21]

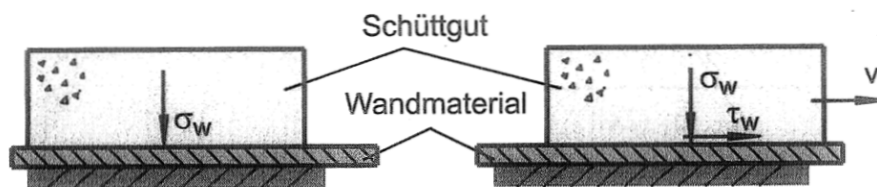


Abbildung 20: Aufbau zum Messen der Wandreibung

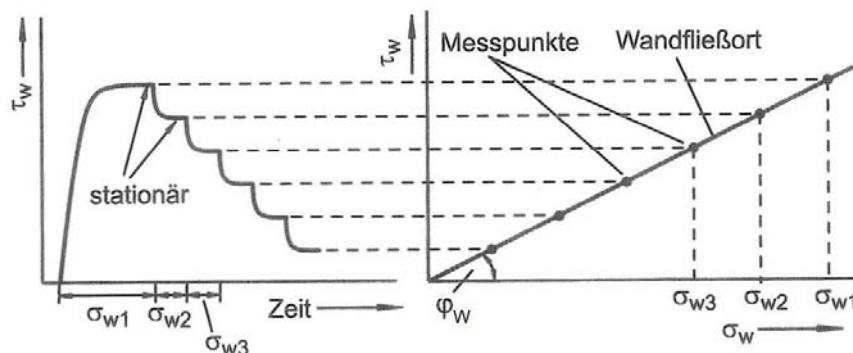


Abbildung 21: Verlauf der Wandschubspannung  $\tau_w$  in Abhängigkeit der Zeit, Wandfließort



Der Wandfließort (wie der Fließort auch eine Fließgrenze) gibt an welche Wandschubspannung  $\tau_w$  notwendig ist um bei vorgegebener Wandnormalspannung  $\sigma_w$  ein Schüttgut auf einer Wandoberfläche zu verschieben. Da die Wandschubspannung  $\tau_w$  bei der gezeigten Messprozedur für stationäres Gleiten des Schüttgutes auf der Wandprobe gemessen wird spricht man auch vom kinematischen Wandfließort. Der Wandfließort beschreibt somit die Gleitreibung des Schüttgutes auf der Wandprobe. Zahlenmäßig kann eine Wandreibung mit Wandreibungswinkel  $\varphi_w$  oder Wandreibungskoeffizient  $\mu$  beschrieben werden. [21]

$$\varphi_w = \arctan\left(\frac{\tau_w}{\sigma_w}\right) \quad (5)$$

$$\mu = \frac{\tau_w}{\sigma_w} \quad (6)$$

Der Wandreibungswinkel  $\varphi_w$  ist der Winkel zwischen der  $\sigma_w$ -Achse und einer Geraden, welche durch den Koordinatenursprung und einen Punkt des Wandfließortes verläuft. Der Wandreibungskoeffizient  $\mu$  errechnet sich aus dem Verhältnis von Wandschubspannung  $\tau_w$  zur Wandnormalspannung  $\sigma_w$ . Je größer  $\varphi_w$  und  $\mu$  sind desto größer ist auch die Wandreibung. Der Wandfließort selbst kann zwei verschiedene Verläufe haben (Abbildung 22). Er kann eine Gerade (meist bei metallischen Oberflächen) bilden durch den Koordinatenursprung (Abbildung 22 a). In diesem Falle ist das Verhältnis von Wandschubspannung  $\tau_w$  zu Wandnormalspannung  $\sigma_w$  für jeden Punkt des Wandfließortes konstant. Damit bleibt auch der Wandreibungswinkel  $\varphi_w$  und Wandreibungskoeffizient  $\mu$  für den gesamten Wandfließort gleich und beide sind somit unabhängig von der Wandnormalspannung  $\sigma_w$ . Abhängig von der Wandnormalspannung  $\sigma_w$  sind Wandreibungswinkel  $\varphi_w$  und Wandreibungskoeffizient  $\mu$  wenn der Wandfließort gekrümmt (oft bei Kunststoffen und Lackierungen) und nicht durch den Koordinatenursprung verläuft (Abbildung 22 b). Für unterschiedliche Punkte des Wandfließortes ergeben sich dadurch auch unterschiedliche Werte für  $\varphi_w$  und  $\mu$  (z.B.  $\varphi_{w1}$  und  $\varphi_{w2}$  in Abbildung 22 b). Der Wandreibungswinkel ist in diesem Fall auch nicht gleich mit dem örtlichen Steigungswinkel des Wandfließortes. Wird ein Wandreibungswinkel für ein Schüttgut ermittelt, so ist es wichtig diesen auch für die entsprechende Wandnormalspannung (jene die in der Praxis auch relevant ist) zu ermitteln. Die Wandnormalspannung  $\sigma_w$  muss also vorher abgeschätzt werden damit man aus dem Wandfließort den entsprechenden Wandreibungswinkel  $\varphi_w$  ablesen kann. Der Schnittpunkt des Wandfließortes mit der  $\tau_w$ -Achse wird als Adhäsion  $\tau_{ad}$  bezeichnet. Er gibt an, welche Schubspannung übertragen werden kann bei einer Wandnormalspannung von:  $\sigma_w=0$ . [21]



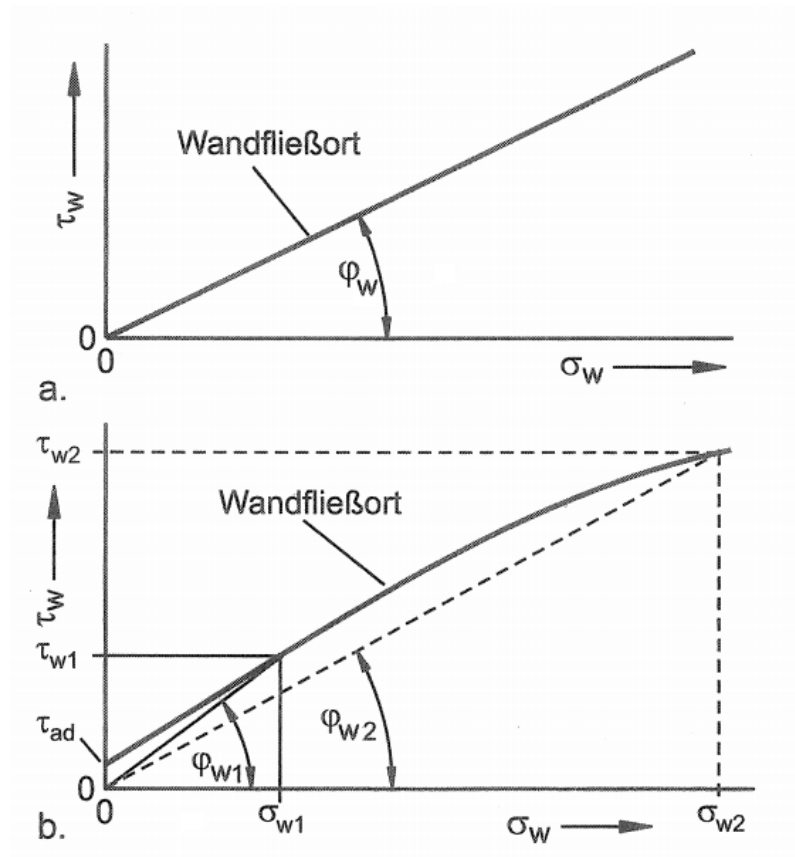


Abbildung 22: Wandfließorte; a) bei konstantem Wandreibungswinkel  $\varphi_w$ ; b) Wandreibungswinkel  $\varphi_w$  abhängig von der Wandnormalspannung  $\sigma_w$

## 2.2 Einflüsse auf das Messergebnis

Da es vielfältige Einflüsse auf das Messergebnis gibt sollte stets ein Messverfahren mit definierten Bedingungen verwendet werden. Auch sollten einige Grundregeln für das Messen von Fließeigenschaften (z.B. die bei der Siloauslegung und die Fließfähigkeitsbestimmung wichtige Druckfestigkeit bzw. Schüttgutfestigkeit  $\sigma_c$ ) beachtet werden [21]:

- Um den Einfluss der Vorgeschichte (Füllen, vorangegangene Verformung) möglichst zu eliminieren sollte die Verfestigungsprozedur immer mit dem stationären Fließen enden. Außerdem erhält man so bei gegebener Verfestigungsspannung die größte Festigkeit (größer als bei einachsiger oder zweiachsiger Verdichtung) und stellt sicher, dass das Schüttgut überall hinreichend verdichtet ist. Durch die Beobachtung der Spannungen während der Verdichtung kann der Verfestigungszustand überwacht werden.
- Im Verlauf des Anscherens steigen die Spannungen (bei Schergeräten die Schubspannung) beim Erreichen des stationären Fließens nicht weiter an. Die Probe sollte nicht so lange verformt werden, bis die Spannungen aufgrund der Lokalisation auf niedrigem Niveau konstant bleiben. Die Folgen wären eine zu kleine

Schubspannung beim Abscheren und damit ein zu kleiner Wert für die Druckfestigkeit.

- Bei der Verfestigung (Anscheren) und bei der Messung der Festigkeit (Abscheren) sollten die größten Hauptspannungen in die gleiche Richtung weisen.
- Die Verformungsgeschwindigkeit (z.B. die Schergeschwindigkeit bei Schergeräten) sollte möglichst konstant gehalten werden und darf sich während der Messung nicht schlagartig verändern.

Durch Schergeräte können diese Bedingungen weitgehend erfüllt werden. [21]

Hier werden nun einige wichtige Einflüsse genauer besprochen.

### 2.2.1 Verfestigungsprozedur

Durch den Anschervorgang (Verfestigen) im Schergerät erreicht man das stationäre Fließen. Der dazugehörige Spannungskreis wird dargestellt in der Abbildung 12 in Form des größten Spannungskreises, und in der Abbildung 23 als Spannungskreis SF. Bei gleich großer Hauptnormalspannung  $\sigma_1$  (Verfestigungsspannung) erhält man hingegen bei einachsiger Verdichtung (Abbildung 3) einen kleineren Spannungskreis (Spannungskreis EV in Abbildung 23) und damit verbunden auch kleinere Schubspannungen  $\tau$ . Auch kleinere Schüttgutdichten  $\rho_b$  und kleinere Schüttgutfestigkeiten  $\sigma_c$  sind bei gleicher Verfestigungsspannung  $\sigma_1$  mit einachsiger Verdichtung im Vergleich zum stationären Fließen zu erwarten. D.h., dass die Verfestigungsprozedur einen wesentlichen Einfluss auf das Messergebnis hat. Alleine durch die Gleichheit der Verfestigungsspannung  $\sigma_1$  können keine identischen Ergebnisse bei zwei unterschiedlichen Verfestigungsprozeduren erwartet werden. [22]

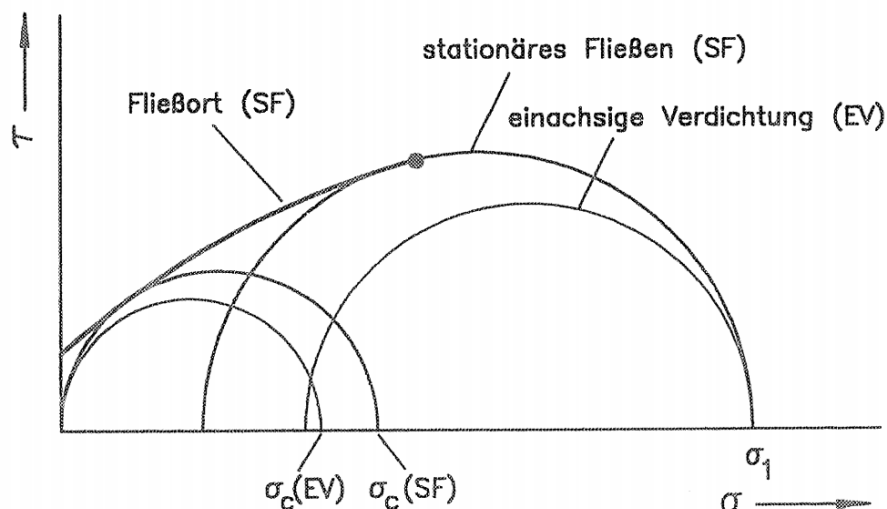


Abbildung 23: Spannungskreise bei stationärem Fließen (SF) und bei einachsigem Verdichten (EV)

Der Vorteil der Verfestigung durch Scheren bis zum Erreichen des stationären Fließens gegenüber der einachsigen Verdichtung ist, dass die zu erwartenden Messergebnisse eine geringere Streuung aufweisen. Auch besteht eine indirekte Kontrolle über den aktuellen Verfestigungszustand. Die Probe wird beim Anscheren so lange geschert bis die gemessene Schubspannung konstant ist. Eventuell vorhandene Inhomogenitäten (z.B. kleine Hohlräume), welche durch den Einfüllvorgang des Schüttgutes in die Scherzelle entstehen, könne so in einem gewissen Umfang durch die aufgeprägte Verformung (Relativbewegung der Partikel innerhalb der Schüttgutprobe) beim Anscheren ausgeglichen werden. [21], [22]

Die Bedingung der definiert, verfestigten Schüttgutprobe bedeutet auch, dass die Probe nach dem Messen der Festigkeit (Abscheren) erst wieder definiert verfestigt werden muss, bevor man ihre Festigkeit erneut messen kann. Bei Schergeräten bedeutet dies, dass nach jedem Abschervorgang ein Anscheren erfolgt, bevor man wieder erneut abschert. [21]

In der Literatur findet man nun Prozeduren die diese Bedingung nicht erfüllen. Bei der Messprozedur nach Enstad et al. (weitere Informationen dazu siehe auch: [6]) wird die Probe mit einem Jenike Schergerät nur einmal angeschert und dann hintereinander bei verschiedenen Normalspannungen abgeschert, ohne zwischendurch wieder angeschert zu werden (Abbildung 24 a). Da durch das Abscheren ein Bruch bzw. eine Auflockerung des Schüttgutes erfolgt, ist der Zustand der Probe nicht mehr derselbe wie vor dem Abscheren. Außer beim ersten Abscheren werden dadurch tendenziell zu geringe Abscherschubspannungen gemessen und der Fließort verschiebt sich dadurch in Richtung zu kleine Schubspannungen. [21]

Ähnliche Messfehler sind bei einem Verfahren zu erwarten, dass mit einem Translationsschergerät durchgeführt wird. Dabei wird die Schüttgutprobe einmal angeschert und nach Erreichen des stationären Fließens beginnt der Abschervorgang, indem die Normalspannung kontinuierlich verringert wird (Abbildung 24 b). Ziel ist es, auf dem Fließort in Richtung abnehmender Normalspannung entlangzufahren. Dafür müsste aber der Zustand der Schüttgutprobe beim Erreichen des Bruches (beginnendes Fließen) konserviert werden. In Wirklichkeit erfolgt aber eine dauernde Ausdehnung des Schüttgutes während des Abscherens. Der Zustand der Schüttgutprobe entfernt sich also immer mehr vom ursprünglichen, nach dem Anscheren bestehenden, Verfestigungszustand. [21]

Um nun das Problem der Auflockerung des Schüttgutes während des Abscherens bei solchen Verfahren zu verhindern entwickelte Haaker et al. (weitere Informationen dazu siehe auch: [7], [8]) eine Scherzelle (ähnlich der Jenike Scherzelle), bei der das Volumen während dem Abscheren konstant gehalten werden kann. Dadurch behält die Probe näherungsweise die Eigenschaften, die sie nach der Verfestigung hatte. Die Messergebnisse zeigen gute Übereinstimmungen mit denen aus normalen Messverfahren. Der Messaufwand ist im Vergleich zu einem Jenike Schergerät aber deutlich größer. [21]

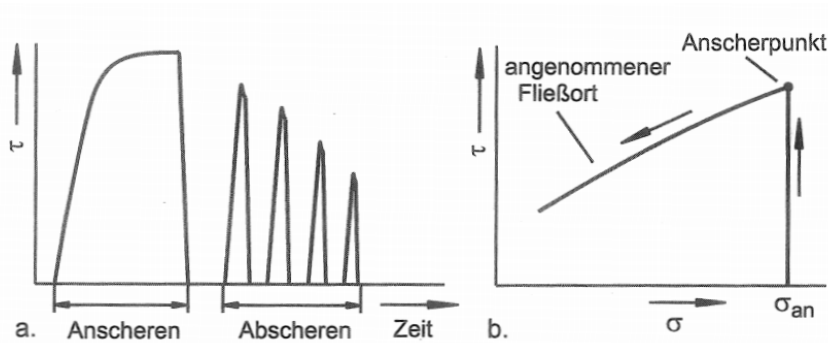


Abbildung 24: a) Verlauf der Schubspannungen über der Zeit beim Messen mehrerer Abscherpunkte ohne zwischenzeitliches Anscheren; b) Spannungsverlauf in einem  $\sigma$ ,  $\tau$ -Diagramm wenn nach dem Erreichen des stationären Zustandes die Normalspannung kontinuierlich verringert wird (Abschervvorgang)

### 2.2.2 Anisotropie

Auch die Richtung der größten Hauptspannung beim Verfestigen und bei der Messung der Schüttgutfestigkeit hat einen Einfluss auf das Messergebnis. Beim einachsigen Druckversuch (Abbildung 3) wird die Schüttgutfestigkeit in der gleichen Richtung gemessen, in der zuvor die Verfestigungsspannung gewirkt hat. In der nachfolgenden Abbildung 25 wird ein Schergerät nach Peschl (weitere Informationen dazu siehe auch: [17], [18]) dargestellt. Bei diesem Schergerät ist ersichtlich, dass die Richtungen nicht übereinstimmen. Während zu Beginn (Abbildung 25 a) eine einachsige Verdichtung in vertikaler Richtung erfolgt (unter der aufgebrachten Verfestigungsspannung  $\sigma_1$ ), wird anschließend, nach Wegnahme der oberen Beladungsplatte, die Druckfestigkeit in horizontaler Richtung gemessen (Abbildung 25 b). D.h., dass die Richtung der größten Hauptspannung beim Verfestigen und bei der Messung der Schüttgutfestigkeit nicht übereinstimmt. Bei einer Messung nach dieser Methode (Abbildung 25) erhält man deutlich niedrigere Werte für die Druckfestigkeit als beim einachsigen Druckversuch (Abbildung 3). Die Ursache dafür ist, dass sich Schüttgüter oft anisotrop verhalten. Die gemessene Schüttgutfestigkeit ist umso kleiner, je weiter die Beanspruchungsrichtungen beim Verfestigen und beim Messen der Druckfestigkeit voneinander abweichen. [22]

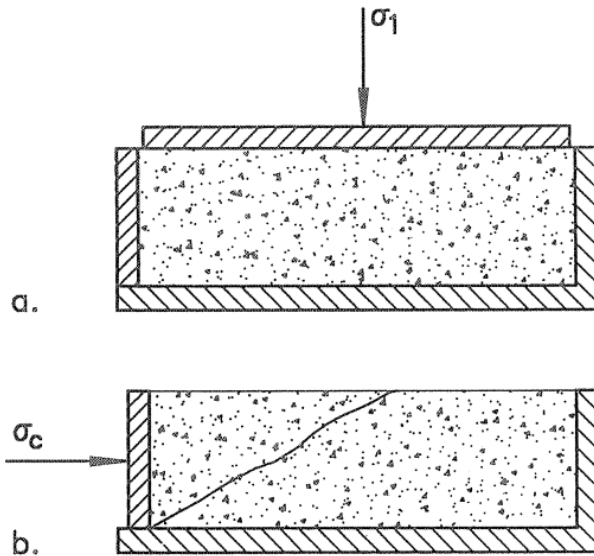
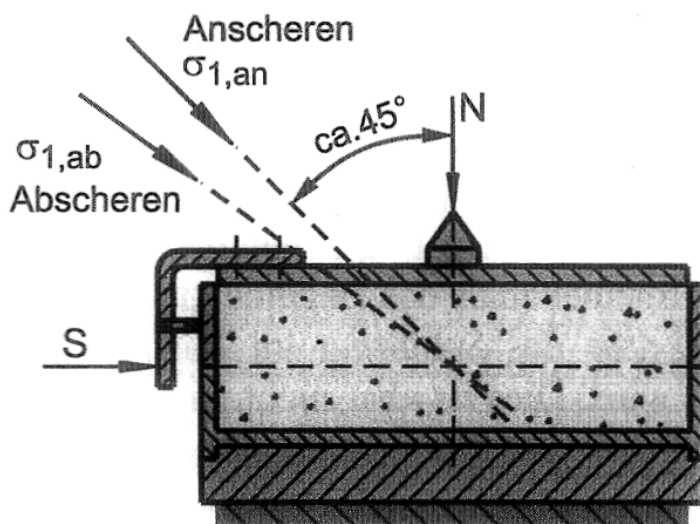


Abbildung 25: Schergerät nach Peschl

Für Schergeräte gilt, dass die Richtungen der Hauptspannungen beim An- und Abscheren nur gering voneinander abweichen sofern nicht zu kleine Spannungen für das Abscheren gewählt werden. Betrachtet man die Richtungen der Hauptspannungen in einer Jenike Scherzelle (Abbildung 26), so sieht man, dass die Abweichung zwischen Anscheren und Abscheren nur gering ist. Solch eine geringe Richtungsabweichung hat nur einen sehr kleinen Einfluss auf das Messergebnis und kann somit vernachlässigt werden. [21]

Abbildung 26: Richtungen der Hauptspannung beim Anscheren ( $\sigma_{1,an}$ ) und Abscheren ( $\sigma_{1,ab}$ ) in einer Jenike Scherzelle (qualitativ)

### 2.2.3 Spannungen in der Messebene/Spannungsverteilung

Damit quantitative Aussagen möglich sind müssen die Spannungen in der Messebene bekannt sein. Beim Jenike Schergerät ist die Messebene die Trennfläche zwischen oberem Ring und dem Bodenring (siehe auch Abschnitt 2.3.3). Damit die gemessene Scherkraft auch in der Messebene wirkt und nicht durch Reibung zwischen den beiden Ringen verfälscht wird dürfen sich diese nicht berühren. Dies wird durch Anheben des oberen Ringes gegenüber dem unteren Ring gewährleistet. Wichtig ist dies auch für die Normalspannung. Mit dieser Maßnahme sind zumindest die mittlere Normalspannung und die mittlere Schubspannung in der Messebene eindeutig bekannt. [22]

Anzustreben ist auch eine homogene Spannungsverteilung in der Messebene. D.h., dass die Spannung an jeder Stelle in der Messebene möglichst gleich groß sein sollte. Ist dies nicht der Fall so wird das Schüttgut beim Verfestigen (Anscheren) an unterschiedlichen Stellen unterschiedlich stark verfestigt. Dies führt dazu, dass beim nachfolgenden Abscheren die mittlere Festigkeit der unterschiedlich stark verfestigten Bereiche des Schüttgutes gemessen wird. [22]

Auch beim Jenike Schergerät gibt es Inhomogenitäten bei der Spannungsverteilung. Vor allem unmittelbar an den Wänden, die die Schüttgutprobe umgeben (in Scherrichtung gesehen vor allem vorne und hinten), können solche Inhomogenitäten auftreten. Da sie sich aber auf nur sehr kleine Bereiche beschränken sind die Ergebnisse, welche man mit dem Jenike Schergerät ermittelt, ausreichend verlässlich. [21]

Zu Problemen mit Messgeräten kann es auch kommen wenn Spannungen nicht genau bekannt sind. Dies soll nun anhand des Johanson Hang-up Indicizer (weitere Informationen dazu siehe auch: [13], [14]) verdeutlicht werden (Abbildung 27). Dieses Messgerät besteht aus einem Zylinder der im Inneren abgestuft ist, sowie aus einem oberen und unteren Stempel. Der obere Stempel besteht aus zwei konzentrischen Teilflächen (Innenteil und Außenteil). Zunächst wird eine zylindrische Schüttgutprobe in axialer Richtung durch den inneren und äußeren Teil des oberen Stempels verdichtet. Anschließend wird der untere Stempel entfernt, und der innere Teil des oberen Stempels drückt auf die Schüttgutprobe, bis es zum Bruch der Probe kommt. Aus der zum Bruch erforderlichen Kraft wird nun die Schüttgutfestigkeit  $\sigma_c$  ermittelt. [22]

Durch die Reibung entlang der Zylinderwände sinkt die Vertikalspannung  $\sigma_1$  (= Verfestigungsspannung) nach unten hin ab (Abbildung 27). Dies erfolgt je nach Schüttguteigenschaften (Horizontallastverhältnis, Wandreibungswinkel) mehr oder weniger stark. Dadurch ist weder der Spannungsverlauf noch der Mittelwert der Spannungen in der Schüttgutprobe eindeutig bekannt. [22]

Nach unten hin nimmt die Vertikalspannung bei der Messung der Schüttgutfestigkeit sogar bis auf Null (freie Schüttgutoberfläche) ab, und die Probe wird über ihrer Höhe unterschiedlich stark beansprucht. Deswegen ist die Schüttgutfestigkeit, die mit dem Johanson Hang-up Indicizer gemessen wird, ein Mittelwert. Dieser Mittelwert ergibt sich aus den verschiedenen, nicht klar definierten Spannungszuständen bei beginnendem Fließen für



verschieden stark (ebenfalls nicht klar definiert) verfestigte Bereiche der Schüttgutprobe. Abhängig ist dieser Mittelwert von den Schüttguteigenschaften (u.a. Wandreibungswinkel) und auch vom Höhe-/Durchmesser-Verhältnis des Messgerätes. Dies kann anhand des Spannungsverlaufes über der Höhe in Abbildung 27 gut dargestellt werden. Festgestellt wurde auch, dass diese Messwerte für die Schüttgutfestigkeit im Vergleich zum Jenike-Schergerät deutlich kleiner sein können. [22]

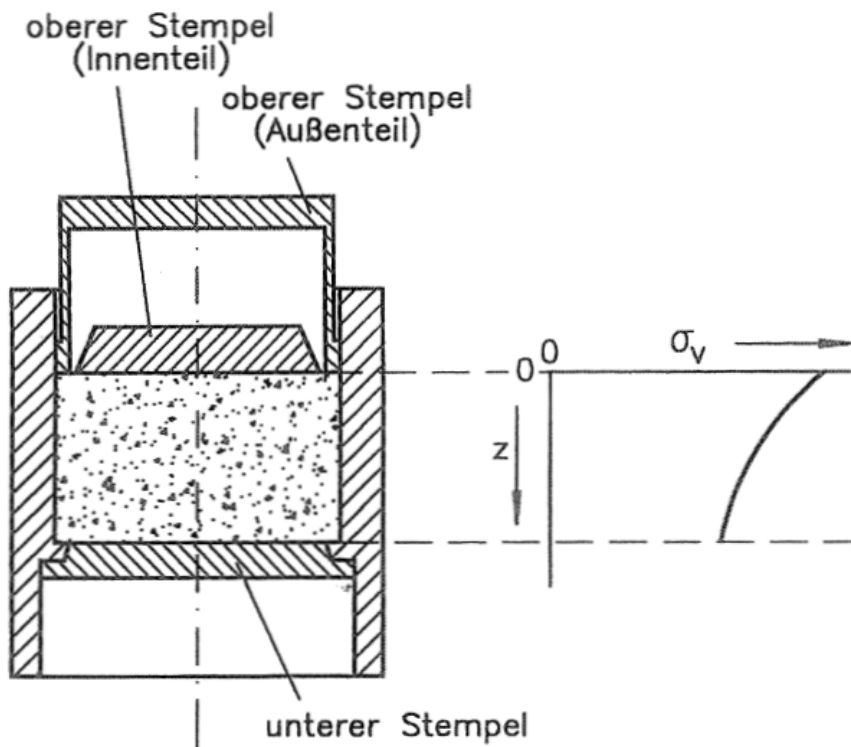


Abbildung 27: Johanson Hang-up Indicizer und Verlauf der Vertikalspannung beim Verdichten (qualitativ)

## 2.2.4 Anforderung an ein Messgerät zur Ermittlung von Fließeigenschaften

Eine definierte Messung der Schüttgutfestigkeit von einer zuvor definiert verfestigten Probe ist erforderlich, wenn man eine quantitative Aussage über die Fließfähigkeit eines Schüttgutes, wie im Abschnitt 2.1.1.4 beschrieben wurde, erhalten möchte. Nur so kann eine Vergleichbarkeit der Messergebnisse unabhängig vom Messgerät gewährleistet werden. Ist keine quantitative Aussage notwendig, so genügt im Prinzip jeder Versuch, bei dem eine Schüttgutprobe in irgendeiner Art verfestigt und danach in irgendeiner Art die Festigkeit bestimmt wird. Da es aber durch Einflüsse (z.B. Wandreibung, Anisotropie) zu einer Verminderung der Aussagefähigkeit kommen kann (wie oben schon beschrieben), verwendet man Messgeräte die ganz bestimmte Kriterien erfüllen. Diese Kriterien wurden nach den oben bereits beschriebenen Einflüssen, und den daraus folgenden Anforderungen

an Messgeräte, abgeleitet. Ein Messgerät muss umso mehr diesen Kriterien entsprechen, wenn damit quantitative Informationen über die im Abschnitt 2.1.1.4 definierte Fließfähigkeit und weitere Fließigenschaften ermittelt werden. Hier folgen nun diese Kriterien nach denen man Messgeräte zur Fließfähigkeitsmessung einteilen kann [22]:

1. Verfestigungsprozedur mit anschließender Messung der Festigkeit
2. Verfestigung der Schüttgutprobe bis zum Erreichen des stationären Fließens
3. Gleiche Beanspruchungsrichtungen (gleiche Richtungen der größten Hauptspannungen) beim Verfestigen und beim Messen der Festigkeit
4. Reproduzierbare Beanspruchung der Probe bei der Verfestigung (4a) und beim Messen der Festigkeit (4b)
5. Bekannte mittlere Spannungen in der Messebene bei möglichst homogener Spannungsverteilung beim Verfestigen (5a) und beim Messen der Festigkeit (5b)
6. Möglichkeit zur Variation der Verfestigungsspannung (Anpassung der Messung an die Spannungen bei denen das Schüttgut gehandhabt oder gelagert wird – Die Messung wird so noch aussagekräftiger)
7. Möglichkeit zur Messung der Zunahme der Schüttgutfestigkeit mit der Zeit (Zeitverfestigung)

Für Vergleichsmessungen bzgl. der Fließfähigkeit laut Abschnitt 2.1.1.4 sind vor allem die Kriterien 1 sowie 4a/4b und 7 (bei Bedarf) wichtig. Je mehr aber auch die übrigen Kriterien berücksichtigt werden umso größer wird die Aussagesicherheit. Für die Fließfähigkeitsbestimmung alleine sind die beiden letzten Kriterien (6 und 7) wünschenswerte Eigenschaften aber nicht unbedingt erforderlich. [21], [22]

Häufig entstehen Probleme dann, wenn das Schüttgut längere Zeit in Ruhe lagert, z.B. im Silo, BigBag oder auch einem kleineren Behälter. Klumpenbildung sowie Probleme beim Ausfließen des Schüttgutes aus der Lagerungseinrichtung können die Folge von längeren Lagerzeiten sein. Die Zeitverfestigung kann nicht aus dem Verhalten des Schüttgutes ohne Zeiteinfluss abgeschätzt und beurteilt werden. Bei einigen Messverfahren (z.B. Jenike Schergerät) ist es möglich mehrere Schüttgutproben gleichzeitig unter Belastung außerhalb des eigentlichen Messgeräts zu lagern. Dies ist vor allem dann sinnvoll wenn häufig Zeitverfestigungsmessungen durchgeführt werden. [21], [22]

Eine gute und sehr umfangreiche Sammlung über verschiedene Messgeräte und Messverfahren, welche vor allem in der Praxis auch zum Einsatz kommen, ist in der Literatur [21] und [22] zu finden. Dazu zählen das Messverfahren mittels Trichter, die Messung des Böschungswinkels, der Imse-Test, der Powder Tester, der Rührer, der Verdichtbarkeitstest, der Flowability Test, der Penetrations Test, der einachsige Druckversuch, der monoaxial shear Test, der Powder Bed Tester, der Johanson Hang-up Indicizer, der Quality Control Tester, das Jenike Schergerät, das Torsionsschergerät und das Ringschergerät. Die Messgeräte und -verfahren werden hier nach genau diesen





Kriterien (siehe oben) eingeteilt und bewertet. Aber nicht jedes dieser Messgeräte und Messverfahren ist geeignet zur Ermittlung der Fließfähigkeit  $ff_c$ , wie sie im Abschnitt 2.1.1.4 definiert wurde. Es sind auch Messgeräte angeführt mit denen das Fließverhalten auf eine andere Art beurteilt werden kann. In dieser Arbeit sollen aber geeignete Messgeräte (Schergeräte) gefunden werden, mit denen man Fließeigenschaften von Schüttgütern für die Bunker- und Siloauslegung bzw. Bunker- und Silodimensionierung ermitteln kann. Drei, als geeignet erscheinende, Kandidaten kommen für diese Aufgabe in Frage [21] [22]:

- Jenike Schergerät
- Torsionsschergerät
- Ringschergerät

## 2.3 Schergeräte

Bevor hier aber näher auf diese drei Messgeräte eingegangen wird, soll hier noch ein Überblick über die verschiedenen, grundlegenden Scherprinzipien bzw. den jeweiligen, dazugehörigen Schergeräten gegeben werden [23]:

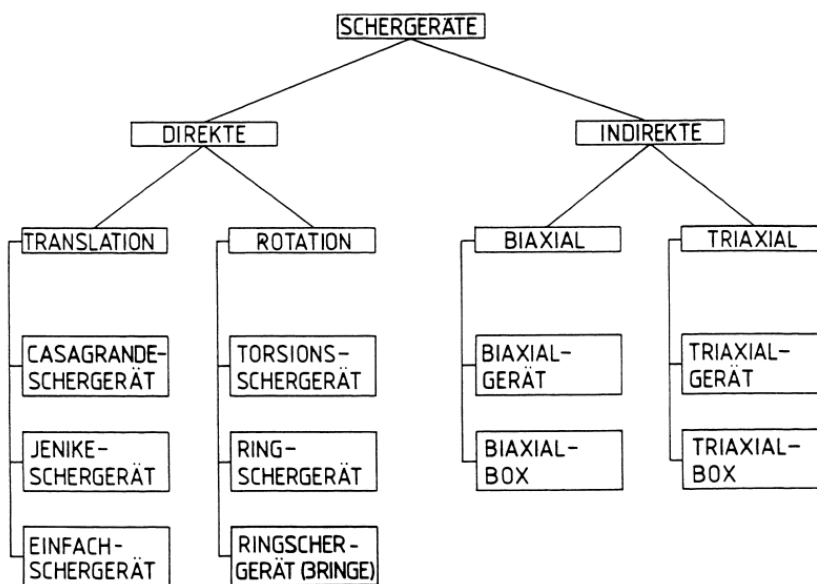


Abbildung 28: Übersicht über Schergeräte

Es ist dabei zwischen direkten und indirekten Schergeräten zu unterscheiden. Während bei direkten Schergeräten die Richtung der Scherzone durch die Konstruktion festgelegt ist, ist die Richtung bei indirekten Schergeräten, aufgrund des anliegenden Spannungszustandes, frei einstellbar. Auch rotiert die Richtung der größten Hauptspannung während des

Scherversuches bei direkten Schergeräten (z.B. beim Jenike Schergerät). Vor der Aufbringung der Scherkraft ist die Richtung der größten Hauptspannung mit der Richtung der Normalkraft identisch. Mit steigender Scherkraft weicht die Hauptspannungsrichtung mehr und mehr von der vertikalen Richtung der Normalkraft ab. Bei indirekten Schergeräten dagegen werden die Richtungen der Hauptspannungen vorgegeben und bleiben während des Versuches erhalten. [23]

### 2.3.1 Direkte Schergeräte

Der Schervorgang kann durch eine **translatorische** oder rotatorische Bewegung herbeigeführt werden. Prinzipiell ergeben sich beim Scheren einer Probe zwei verschiedene Extremfälle in der Scherzone. Zum Einen kann es sich um eine reine Coulombsche Festkörperreibung ohne Volumenänderung handeln (Abbildung 29 a). Es kommt dabei zu einem Kontaktverlust zwischen jenen Teilchen, die vor dem Scheren in Kontakt waren, sich jedoch auf verschiedenen Seiten der Scherebene befinden. Jene Teilchen die sich weiter entfernt von der Scherebene befinden bleiben auch weiterhin in Kontakt zueinander, und sind vom Schervorgang nicht betroffen. Im anderen Extremfall findet der Schervorgang homogen über die gesamte Probenhöhe statt (Abbildung 29 b). Auf sämtliche Teilchen wirkt die gleiche Schubspannung und sie verschieben sich dadurch relativ zueinander. Im Wesentlichen bleiben sie untereinander jedoch in Kontakt. Auch kann es bei diesem Vorgang zu einer Volumenänderung kommen, wie sie auch bei der Bewegung von Schüttgütern meist auftritt. [23]

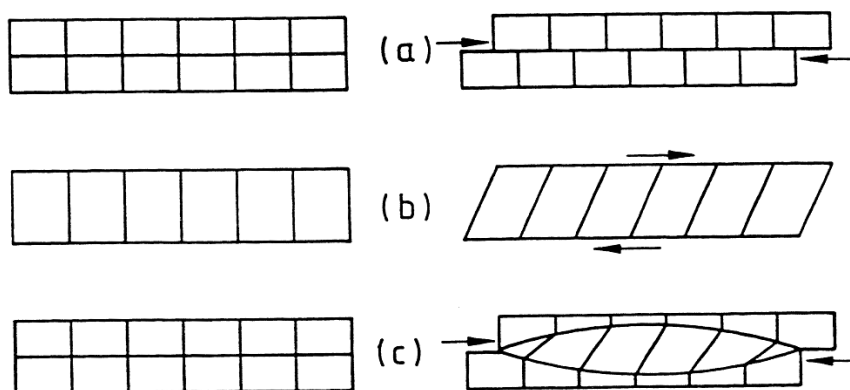


Abbildung 29: Scherformen in der Scherzone

Bei den meisten Schergeräten (so auch beim Jenike Schergerät) liegen wir, bezüglich des Verhaltens, zwischen diesen beiden Extremfällen aus Abbildung 29 a und b. Äußerlich entspricht der Versuch mit dem Jenike Schergerät der Scherform aus Abbildung 29 a. Im Zentrum der Probe ergibt sich jedoch meist ein Schervorgang der mehrere Schichten (linsenförmige Zone) betrifft. In dieser linsenförmigen Zone entspricht der Schervorgang

jenem aus Abbildung 29 b. Im Gesamten jedoch verläuft der Schervorgang, wie in Abbildung 29 c dargestellt ist, in gemischter Form. [23]

Das **Jenike Schergerät** (Abbildung 35), welches in der Verfahrenstechnik oft verwendet wird, entspricht im Wesentlichen dem **Rahmenschergerät** (Abbildung 30) der Bodenmechanik. Während das Rahmenschergerät in der ursprünglichen Form einen quadratischen Querschnitt hat und meist auch Kraft gesteuert arbeitet (Messung damit nur bis zur maximalen Scherkraft möglich), hat das Jenike Schergerät einen runden Querschnitt und arbeitet mit konstantem Vorschub. Dadurch können Scherkraft-Weg-Verläufe auch bei Abfall der Scherkraft ermittelt werden wie sie bei allen überverfestigten Proben auftreten. [23], [26]

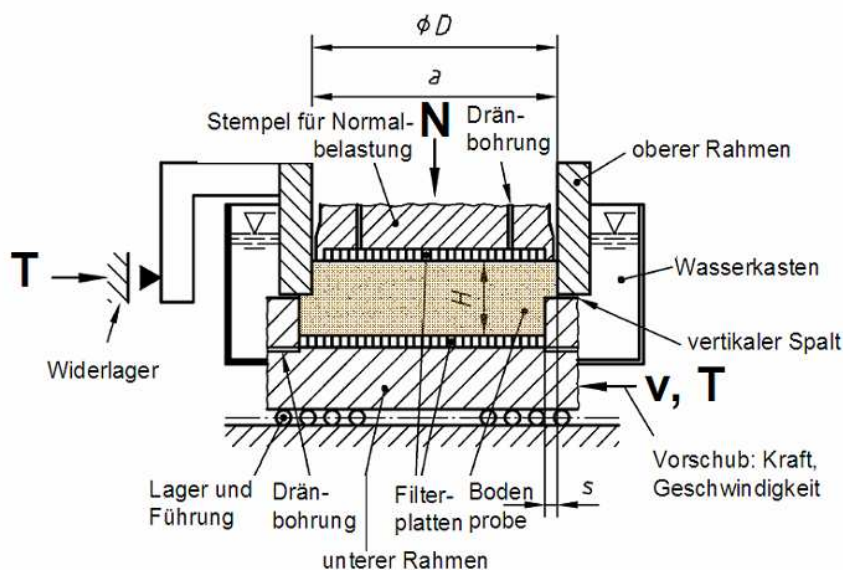


Abbildung 30: Rahmenschergerät

Ein weiteres direktes Schergerät wäre das **Einfachschergerät** (Abbildung 31). Mit diesem kann ein Schervorgang nach Abbildung 29 b realisiert werden. Damit können zwei grundsätzliche Nachteile der Rahmenschergeräte und Jenike Schergeräte überwunden werden [23]:

- Bei der Auswertung der Versuchsergebnisse wird angenommen, dass die vorgegebene horizontale Scherrichtung identisch ist mit der Richtung einer statischen Gleitlinie. Dadurch sind die gemessenen Wertepaare  $\sigma, \tau$  Tangentialpunkte der Spannungskreise (Abbildung 12) an den Fließort und der gesuchte Fließort entspricht der Verbindungslinie der Messpunkte  $\sigma, \tau$ .
- Der Schervorgang erfasst nur einen linsenförmigen Bereich (Abbildung 29 c), nicht das gesamte Probenvolumen. Es können dadurch zwar Höhenänderungen, nicht aber Dehnungen der Probe gemessen werden, da die Bezugsgröße nicht bekannt und über den Querschnitt verschieden ist.

Diese beiden Nachteile lassen sich zwar mit einem Einzelschergerät beheben, jedoch ist der zeitliche und apparative Aufwand bei solch einem Schergerät sehr hoch. Der Einsatz beschränkt sich deshalb auf wissenschaftliche Untersuchungen, und ist nicht sinnvoll bei routinemäßigen Messungen in der Ingenieurtechnik. [23]

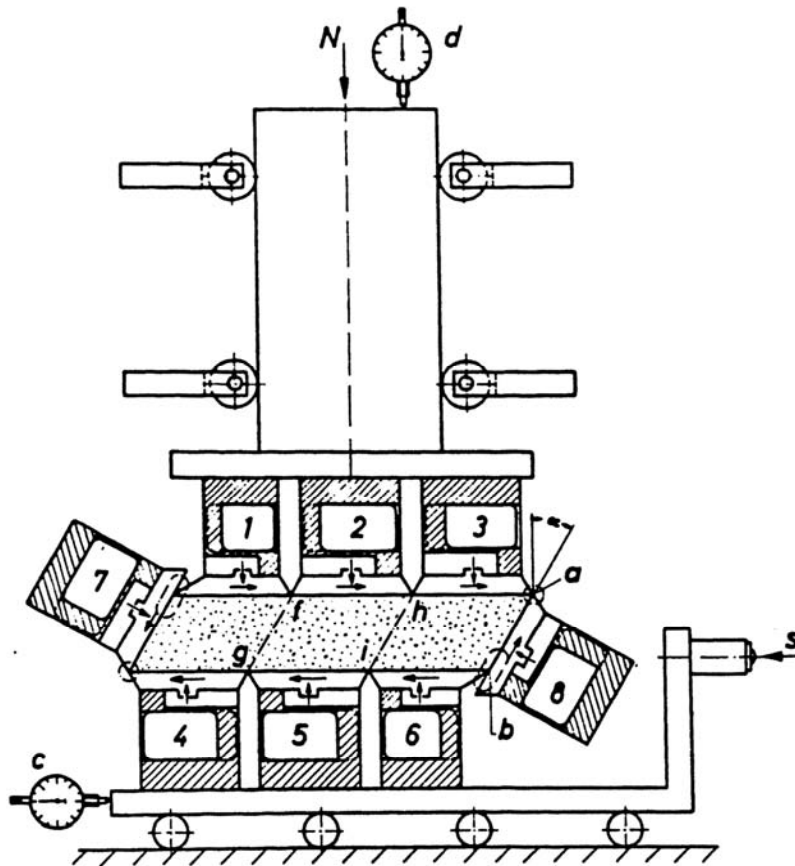


Abbildung 31: Einzelschergerät

Bei Translationsschergeräten ändert sich während des Schervorganges geringfügig die Scherflächengeometrie. Auch steht für die Bewegung nur ein begrenzter Scherweg zur Verfügung (bei Jenike Schergerät max. 6-8 mm - je nach Bauweise). Dies kann vor allem bei sehr grobkörnigen und bei sehr elastischen Schüttgütern dazu führen, dass trotz optimaler Vorverfestigung, die immer durchgeführt werden soll, die maximalen Scherkräfte nicht erreicht werden. Um trotzdem solche Schüttgüter messen zu können werden Schergeräte mit **rotatorischer** Bewegung eingesetzt. Deren Prinzipien sollen nun nachfolgend dargestellt werden [23]:

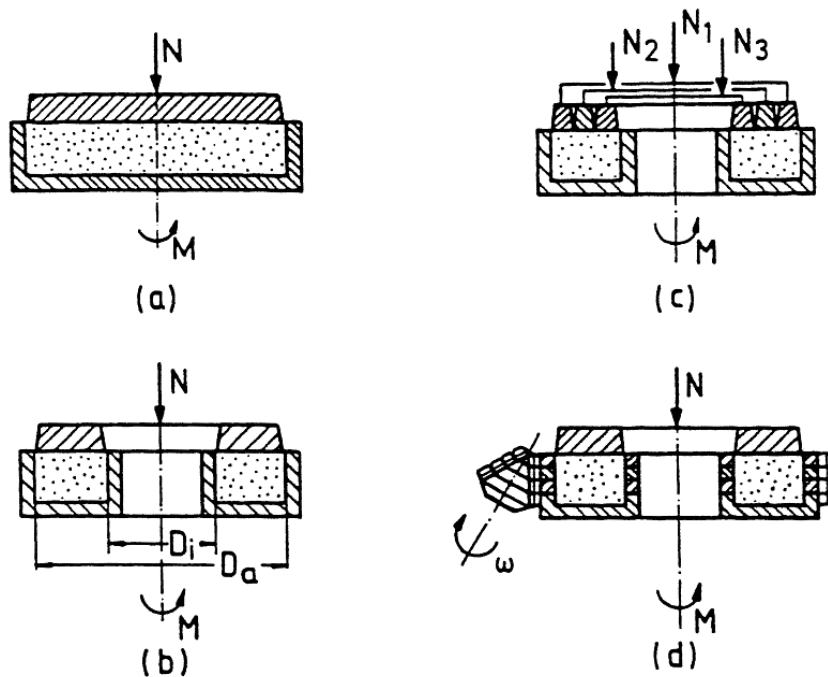


Abbildung 32: Rotationsschergeräte: a) Torsionsschergerät; b-d) Ringschergeräte

Der Schervorgang erfolgt bei diesen Schergeräten durch eine Rotation um die vertikale Symmetrieachse, was einen unbegrenzten Scherweg und eine unveränderte Scherflächengeometrie ermöglicht. Dadurch ist die Durchführung einer Vorverdichtung wie bei Translationsschergeräten nicht mehr notwendig. Die Probenquerschnitte können Vollkreis- oder Ringförmig sein. Die Schergeräte bestehen aus zwei aufeinander liegenden Ringen (wie auch das Jenike Schergerät), welche die Scherzone festlegen. Der untere Ring ist dann meist mit dem Boden verbunden und der obere folgt der Bewegung der Abdeckplatte. Eine einfachere Konstruktion hingegen ist in Abbildung 32 a dargestellt. Der Deckel dieses **Torsionsschergerätes** ist auf der Unterseite aufgeraut. Deshalb legt sich eine Schüttgutschicht an ihm an und es bildet sich direkt darunter die Scherzone aus. Bei den meisten Geräten rotiert das Unterteil mit konstanter Winkelgeschwindigkeit und das auf den Deckel wirkende Drehmoment wird gemessen. [23]

Der große Nachteil von Torsionsschergeräten ist die unterschiedliche Scherverformung über der Fläche. Während die Verformung nach außen hin linear mit dem Radius zunimmt findet im Zentrum praktisch keine Verformung mehr statt. Um den inneren Kreisquerschnitt weglassen zu können werden **Ringschergeräte** (Abbildung 32 b) verwendet. Dadurch ist die Verformung der Schüttgutprobe über dem Querschnitt gleichmäßiger, aber noch immer unterschiedlich. Ein Einfluss des Verhältnisses  $D_{R,i}/D_{R,a}$  ist zu erwarten. Bei entsprechender Versuchsdurchführung sowie bei Durchmesserhältnissen  $D_{R,i}/D_{R,a}$  von min. 0,5 sind aber vergleichbare Ergebnisse zum Jenike Schergerät zu erwarten. [21], [23]

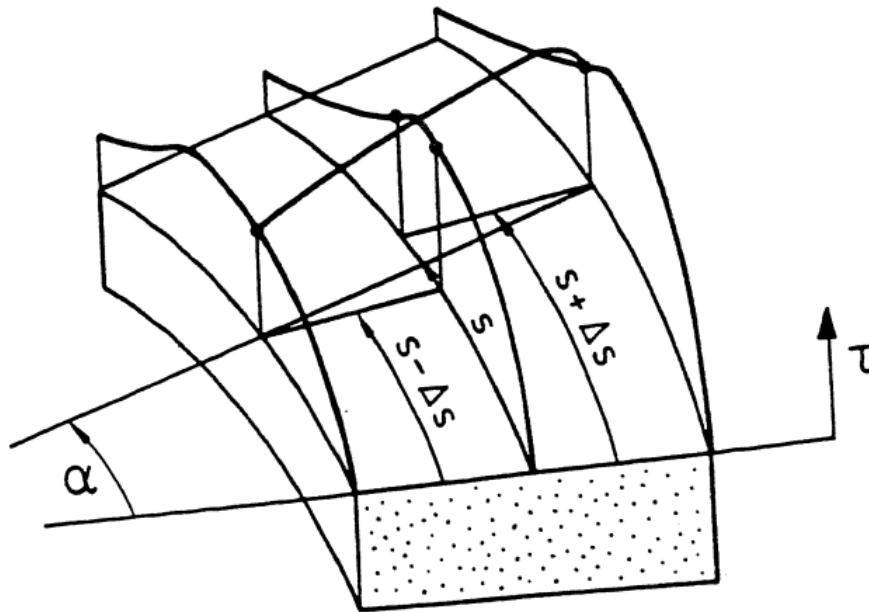


Abbildung 33: Schubspannungsverlauf im Ringschergerät

Nach einer Rotation um den Winkel  $\alpha$  beträgt in Ringmitte der Scherweg  $s$ , am äußeren Rand  $s+\Delta s$  und am inneren Rand  $s-\Delta s$ . Ist nun bei einer überverfestigten Probe in Ringmitte gerade die maximale Schubbeanspruchung erreicht, ist sie wegen dem längeren Scherweg von  $+\Delta s$  am Außenrand bereits überschritten und wegen dem kürzeren Scherweg von  $-\Delta s$  am Innenrand noch nicht erreicht. Gemessen wird das Gesamtdrehmoment, aus dem sich eine mittlere Schubspannung ergibt. Diese ist aber kleiner als die maximale Schubspannung, die für die Ermittlung der Fließorte benötigt wird. Es kann jedoch aus dem mittleren Drehmoment eine maximale Schubspannung ermittelt werden. Die Ermittlung des stationären Fließzustandes ist hingegen unproblematisch, weil er zwar am äußeren Rand früher erreicht wird dann aber konstant bleibt. Der Scherweg muss also nur am inneren Rand auch noch ausreichend lang genug sein. [23]

Die Abhängigkeit vom Durchmesser kann experimentell bestimmt werden mit einem Ringschergerät wie in Abbildung 32 c. Der Deckel dieses Ringschergerätes besteht aus mehreren Ringen, die sich gegenseitig nicht berühren und an denen an jedem Ring das auf ihn wirkende Drehmoment erfasst wird. Es kann auch für jeden Ring die Höhenänderung erfasst werden. Damit lässt sich eine Abhängigkeit der Höhe der Scherzone vom Durchmesser ermitteln. Diese aufwändigen Messungen sind für die Bestimmung der Einsatzmöglichkeit eines Ringschergerätes erforderlich. [23]

Eine weitere Form von Ringschergeräten ist in der Abbildung 32 d dargestellt. Hier besteht das Ringschergerät aus mehreren übereinander angeordneten Ringen die mit jeweils unterschiedlichen Winkelgeschwindigkeiten rotieren. Damit ist ein Schervorgang ähnlich dem im Einzelschergerät zu erreichen. [23]



Der große Vorteil von direkten Rotationsschergeräten gegenüber den direkten Translationsschergeräten ist also der unendliche Scherweg. Dieser macht eine aufwendige Probenvorbereitung mit Vorverdichtung hinfällig und sorgt dafür, dass sich unabhängig vom Anfangszustand immer der gleiche stationäre Fließzustand einstellt. Solch ein Prozess kann sehr leicht automatisiert werden, womit die Abhängigkeit des Ergebnisses vom Geschick des Experimentators verringert wird. Der große Nachteil ist jedoch die ungleichmäßige Verformung der Schüttgutprobe über den Querschnitt und damit die Durchmesserabhängigkeit der Schubspannung, insbesondere bei überverfestigten Proben. Bei Ringschergeräten kann aber durch entsprechende Versuchsdurchführung und Schergerätgeometrie auch dieser Nachteil behoben werden. [23]

### 2.3.2 Indirekte Schergeräte

Mit direkten Schergeräten (außer Einfachschерgerät) kann kein vollständiger Spannungszustand ermittelt werden. Bei indirekten Schergeräten hingegen werden die Spannungen in 2 bzw. 3 senkrecht zueinander stehenden Richtungen vorgegeben. Auf die entsprechenden Flächen wirken keine Schubspannungen, weshalb es sich bei den Spannungen um Hauptspannungen handelt. Somit können die Mohrschen Spannungskreise in jedem Zustand der Beanspruchung leicht konstruiert werden. Die Versuche an überverfestigten und kritisch verfestigten Proben (bei gleicher Ausgangsdichte), ergeben den Fließort als Einhüllende an die jeweils größten Mohrschen Spannungskreise einzelner Versuche. Jeder Prüfkörper unterliegt dabei einem dreiaxialen Spannungszustand und dennoch unterscheidet man zwischen **zwei axialen** und **drei axialen** Geräten. [23]

Bei zwei axialen Geräten wird eine Verformung in der x, y-Ebene angestrebt. In z-Richtung ist aus konstruktiven Gründen keine Verformung möglich. Die Spannung in z-Richtung hat auch keinen Einfluss auf die Verformung in der x, y-Ebene (bei Annahme des auf Tresca basierenden Fließkriteriums nach Mohr-Coulomb). Beim **Zwei axialgerät** (Abbildung 34 a) wird die Schüttgutprobe mit einer der Probeform angepassten Gummimembran umhüllt. Die Probe wird in y-Richtung durch Wasserdruck (bleibt konstant während des Versuches) mit der Spannung  $\sigma_3$  beaufschlagt. In x-Richtung wird die Spannung  $\sigma_1$  aufgebracht bis es zum Bruch der Probe kommt. Im Gegensatz zum Zwei axialgerät bleiben bei einer **Zwei axialbox** (Abbildung 34 b) die ebenen Probenbegrenzungsflächen auch während der Beanspruchung eben. Dies wird durch senkrecht zueinander stehende ebene Platten gewährleistet, welche in x- und y-Richtung unabhängig voneinander bewegt werden können. Die Zwei axialbox kann bei entsprechender Konstruktion auch in niederen, für die Verfahrenstechnik interessanten, Druckbereichen eingesetzt werden. Wie bei Zwei axialgeräten unterscheidet man auch bei Drei axialgeräten zwischen **Drei axialgerät** und Drei axialbox. Das Drei axialgerät (Abbildung 34 c) entspricht dem Prinzip des Zwei axialgerätes, nur mit zylindrischem Probekörper und identischer dritter und zweiter Hauptspannung (gleicher Wasserdruck  $\sigma_2 = \sigma_3$ ). Das Drei axialgerät ist neben dem Rahmenschergerät das Standardschergerät der Bodenmechanik mit einfacher und nicht sehr aufwendiger

Versuchsdurchführung. Ein **modifiziertes Dreiaxialschergerät** (Abbildung 34 e) von Haaker und Rademacher ermöglicht die Messung von Schüttguteigenschaften in dem für die Verfahrenstechnik interessanten Bereich niedriger Drücke und zeigt eine sehr gute Übereinstimmung mit Ergebnissen aus Versuchen mit Jenike Schergeräten. [23]

Die **Dreiaxialbox** (Abbildung 34 d) entspricht dem Prinzip einer Zweiaxialbox mit drei Spannungsrichtungen. Ein quaderförmiger Probenkörper ist von sechs Platten begrenzt und kann zur selben Zeit beliebigen Verformungen in alle drei Raumrichtungen unterworfen werden. Die rechten Winkel bleiben dabei erhalten und die Wegänderungen in x-, y- und z-Richtung kann dabei unterschiedlich groß sein. Sowohl bei der Zweiaxialbox als auch bei der Dreiaxialbox ist der Probenkörper mit einer Gummimembran umhüllt die der Verformung folgt und keine zu großen Reibungen auf die Begrenzungsplatten (es dürfen keine Schubspannungen auftreten) überträgt, damit die auftretenden Spannungen auch Hauptspannungen bleiben. Der Vorteil dieser Box ist, dass alle drei Hauptspannungen unabhängig voneinander variiert werden können. Damit kann nachgeprüft werden, ob die mittlere Hauptspannung wirklich ohne Einfluss auf die Fließgrenze ist, wie es das Fließkriterium nach Mohr-Coulomb fordert. Trotz vieler Vorteile gibt es große Schwierigkeiten bei der Versuchsdurchführung. Auch ist es wenig realistisch dieses Schergerät für feinkörnige, trockene Schüttgüter in einem für die Verfahrenstechnik interessanten Druckbereich ( $<0,1$  bar) einzusetzen. [23]

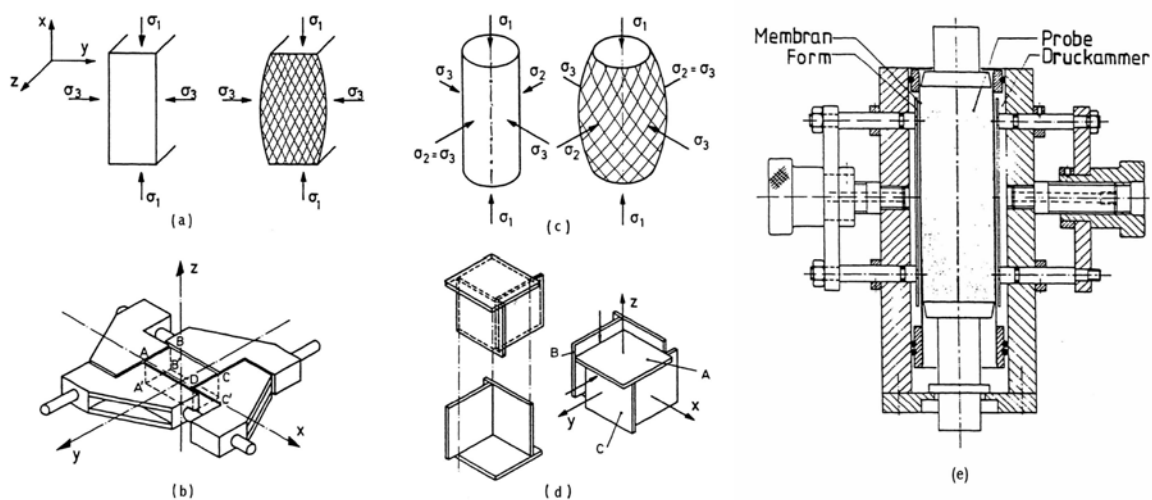


Abbildung 34: Indirekte Schergeräte: a) Zweiaxialgerät; b) Zweiaxialbox; c) Dreiaxialgerät; d) Dreiaxialbox; e) modifiziertes Dreiaxialgerät

### 2.3.3 Der Aufbau eines Jenike Schergerätes

Die in diesem Abschnitt verwendeten Nummerierungen für die Teile der Jenike Scherzelle entsprechen den Nummerierungen aus Abbildung 35, Abbildung 36 und Abbildung 37.



Das Jenike Schergerät ist der wichtigste Vertreter aus der Gruppe der Translationsschergeräte (geradlinige Relativbewegung bei der Verformung). Es wurde von Jenike um 1960 zusammen mit der von ihm erarbeiteten Theorie zur Auslegung von Silos vorgestellt [11], [12]. Sein Einsatzgebiet war zunächst vor allem die Siloauslegung und es stammte von den damals bereits existierenden Schergeräten der Bodenmechanik ab. Diese waren aber nicht unmittelbar für feinkörnige Schüttgüter und den für die Siloauslegung relevanten Spannungsbereich anzuwenden. [21]

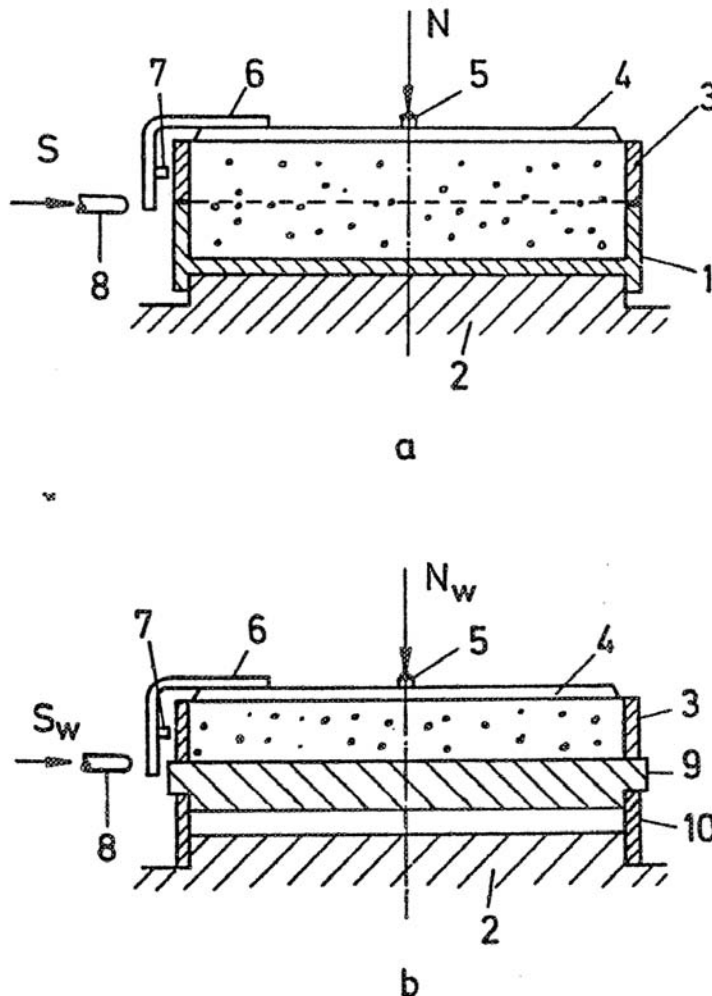


Abbildung 35: Jenike Schergerät: a) Anordnung zur Messung der Schüttguteigenschaften; b) Anordnung zur Messung der Wandreibung; 1 unterer Ring, 2 Zentrierplatte, 3 oberer Ring, 4 Scherdeckel, 5 Zentrierspitze, 6 Bügel, 7 Stift, 8 Scherstift, 9 Wandprobe, 10 Distanzring

Kernstück des Jenike Schergerätes ist die in der Abbildung 35 dargestellte Scherzelle. Eine Zentrierplatte 2 ist dabei auf einem festen Schertisch montiert, der wie alle weiteren Einzelteile in einer kompakten Einheit integriert ist. [15]

Zunächst zeigt die Abbildung 35 a die Anordnung zur Messung der Schüttguteigenschaften (Fließortmessung). Dabei ist ein auf der Unterseite geschlossener Bodenring (unterer

Ring 1) auf dem feststehenden Sockel (Zentrierplatte 2) des Schergerätes fixiert. Der obere Ring 3 befindet sich über dem Bodenring 1, und kann gegenüber dem unteren Ring 1 horizontal verschoben werden. Beide Ringe, Bodenring 1 und oberer Ring 3 zusammen, bilden einen Hohlraum in dem das zu untersuchende Schüttgut enthalten ist. Durch das horizontale Verschieben der beiden Ringe gegeneinander bildet sich zwischen diesen beiden Ringen die horizontal liegende Scherfläche aus. Die obere Fläche der Probe wird von der Scherplatte (Scherdeckel 4) abgedeckt, auf der mittig eine Zentrierspitze 5 und am Rand ein etwa 5 mm breiter (senkrecht zur Zeichenebene gesehen) Bügel 6 mit Stift 7 angebracht ist. Die Schüttgutprobe kann über die Zentrierspitze 5 auf dem Scherdeckel 4 und einem Hängersystem 15 mit einer vertikal wirkenden Normalkraft  $N$  belastet werden. Diese setzt sich zusammen aus dem Gewicht, welches auf das Hängersystem 15 gelegt wird, und dem Gewicht des Hängersystems 15 selbst. Das Hängersystem 15 besteht aus einem oberen, horizontalen Querjoch, welches mittels einer Zentrierbohrung auf die Zentrierspitze 5 des Scherdeckels 4 aufgesetzt wird. An den beiden Enden dieses Joches sind zwei vertikale Stangen nach unten hin angebracht, die ihrerseits wiederum an ihren unteren Enden mittels unterem Querjoch verbunden sind. Die beiden Joche und die beiden vertikalen Stangen zusammen umschließen den Schertisch. Am unteren Joch ist noch eine zentrische, vertikale Stange mit horizontaler Platte, auf der eben das benötigte Gewicht aufgelegt werden kann, angebracht. Die gesamte Normalkraft (Normalspannung), die während dem Schervorgang auf die Schüttgutprobe in der Scherebene wirkt, setzt sich zusammen aus [15]:

- Dem Gewicht, das auf dem Hängersystem 15 aufgelegt wird
- Dem Gewicht des Hängersystems 15 selbst
- Dem Gewicht des Scherdeckels 4 inklusive Bügel 6, Stift 7 und Zentrierspitze 5
- Dem Gewicht des oberen Ringes 3 (Dieser sollte vor dem Schervorgang etwas angehoben werden, damit keine Reibung zwischen dem oberen und unteren Ring entstehen kann. Solch eine Reibung könnte die Schubspannungsmessung verfälschen)
- Und dem Gewicht des Schüttgutes selbst, welches sich über der Scherfläche im oberen Ring 3 befindet.

Die Scherbewegung selbst wird über einen Elektromotor erzeugt, der über ein Getriebe einen Scherstift 8 antreibt. Dieser Scherstift 8 liegt exakt in der verlängerten, horizontalen Achse der geometrischen Scherfläche (Trennfläche zwischen oberem und unterem Ring), und die Bewegungsrichtung des Scherstiftes 8 kann über einen Schalter umgekehrt werden. Der Scherstift 8 wird mit konstanter Vorschubgeschwindigkeit (1-2 mm/min) gegen den Bügel 6 gefahren. Nach Berührung überträgt dieser Scherstift 8 den Vorschub über den Bügel 6 und den Stift 7 auf den oberen Ring 3. Der obere Ring 3 und das Schüttgut das in ihm enthalten ist verschieben sich somit horizontal gegenüber dem unteren Ring 1 und dessen Schüttgut. Es kommt also zur Verformung der Scherprobe und zur Ausbildung einer horizontalen Scherebene zwischen den beiden Ringen. Die Gutschichten in der Nachbarschaft der geometrischen Scherfläche verschieben sich. Über eine robuste Kraftmessdose wird die

dabei entstehende Scherkraft  $S > 0$  registriert, und mittels Linienschreiber bzw. Messdatenerfassung ein Scherkraft  $S$ -Weg-Verlauf dargestellt. [15]

Bevor jedoch der Stift 7 den Vorschub auf den oberen Ring 3 übertragen kann sorgt ein kleiner Spalt dazwischen (ca. 0,1-0,2 mm), dass zunächst die gesamte Scherkraft nur auf den Scherdeckel 4 übertragen wird. Die Scherkraft wird somit über den Scherdeckel 4 und damit annähernd gleichmäßig auf die obersten Gutschichten übertragen. Erst beim weiteren Scheren wird der Stift 7 den oberen Ring 3 berühren. Wird auf den Spalt verzichtet wird die gesamte Scherkraft auf den oberen Ring 3 übertragen, und es entsteht eine ungünstige Schubspannungskonzentration in der Probe auf der dem Bügel 6 zugewandten Seite. [15]

Für die Befüllung der Scherzelle mit dem Probenmaterial und für die Vorbereitung der Scherprobe für den Schervorgang sind außerdem noch ein sogenannter Füllring 11 und ein Belastungsdeckel 12 mit zentrisch angebrachter Spitze 13 notwendig (Abbildung 36). Die Spitze 13 besteht aus einem zylindrischen und einem konischen Teil. An den Mantelflächen des zylindrischen Teils sind zwei parallele Flächen angeschliffen, so dass mit einem Schlüssel eine schwingende Drehbewegung auf den Deckel 12 ausgeübt werden kann. Gleichzeitig kann mit dem auf die Spitze 13 eingehängten Hängersystem 15 wieder eine Normalkraft aufgeprägt werden. Alternativ dazu haben manche Schergeräte eine eigene Twistvorrichtung 14. Der Belastungsdeckel 12 ist dann durch den Twistdeckel 16 ersetzt und die Twiststange 18 wird auf vertikale Bolzen am Twistdeckel 16 aufgeschoben. Über einen Handhebel 17, der mit der Twiststange 18 verbunden ist, kann nun eine schwingende Drehbewegung auf den Twistdeckel 16 ausgeübt werden. Das Hängersystem 15 ist wie auch beim Belastungsdeckel 12 auf einer zentrischen Spitze am Twistdeckel 16 eingehängt. [15], [23]

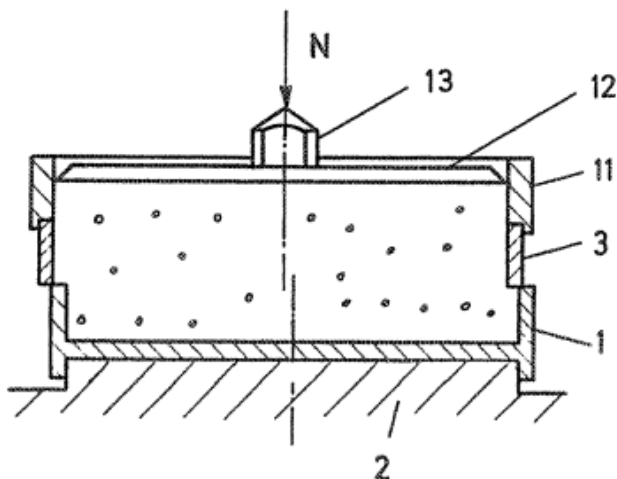


Abbildung 36: Anordnung der Jenike Scherzelle für die Probenvorbereitung: 1 unterer Ring, 2 Zentrierplatte, 3 oberer Ring, 11 Füllring, 12 Belastungsdeckel, 13 Spitze des Belastungsdeckels

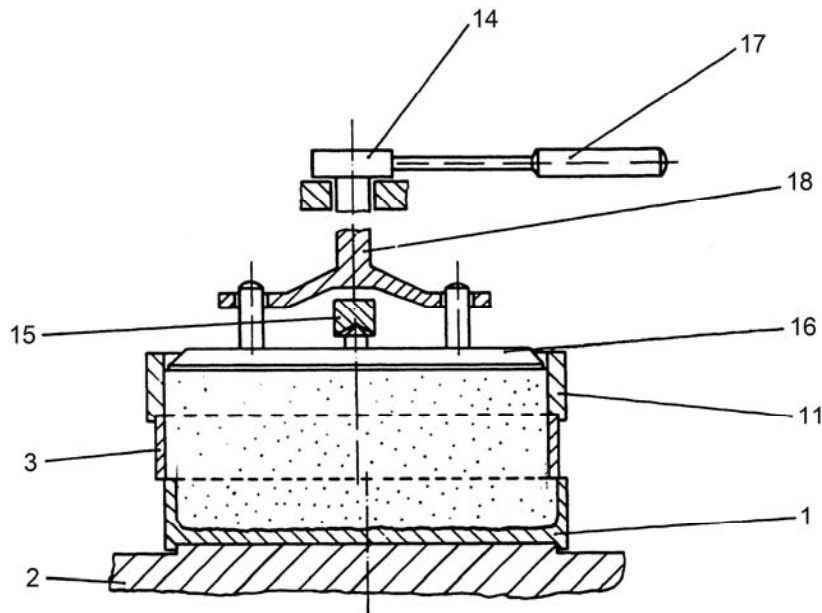


Abbildung 37: Jenike Scherzelle mit Twistvorrichtung: 1 unterer Ring, 2 Zentrierplatte, 3 oberer Ring, 11 Füllring, 14 Twistvorrichtung, 15 Hängersystem, 16 Twistdeckel, 17 Handhebel, 18 Twiststange

In der Abbildung 35 b wird der Aufbau einer Jenike Scherzelle für die Messung der Wandreibung gezeigt. Der untere Ring 1 wurde durch die nicht bewegliche Wandprobe 9 ersetzt. Die Oberfläche der Wandprobe 9 wird mittels Distanzring 10 auf die Höhe der verlängerten, horizontalen Achse des Scherstifts 8 angehoben. [15]

In Tabelle 2 sind einige Standardabmessungen von Jenike-Scherzellen angeführt. Daneben können aber auch kleinere oder größere Abmessungen verwendet werden, um z.B. mit kleineren Probenmengen auszukommen oder um auch grobkörnigere Schüttgüter untersuchen zu können. Bei grobkörnigeren Schüttgütern müssen stets genügend Partikel in der Scherzelle vorhanden sein, damit sich die Schüttgutprobe wie ein Kontinuum verhält. Bei einer zu geringen Anzahl von Partikeln schwankt die gemessene Scherkraft, da die aufgeprägten Kräfte über wenige, sich dauernd verändernde Kraftlinien übertragen werden. Außerdem misst man dabei tendenziell zu große Scherkräfte. Für die Abmessungen der Jenike Scherzelle nach Schulze (Scherzelle II in Tabelle 2) kann man Schüttgüter mit maximalen Partikelgrößen bis etwa 2 mm bei engen Partikelgrößenverteilungen und bis etwa 5 mm bei sehr breiten Partikelgrößenverteilungen untersuchen. Für harte, kantige Partikeln gelten etwas geringere Obergrenzen. [21]

Tabelle 2: Mögliche Standardabmessungen für Jenike Scherzellen

Kennzahl/Scherzelle	I	II	III
$d_J$ [mm]...Innendurchmesser einer Jenike Scherzelle (oberer und unterer Ring)	95,0	93,0	90,0
$h_{J,o}$ [mm]...Höhe des oberen Ringes (Schüttguthöhe über der Scherebene)	16,1	16,0	40,0*
$h_{J,u}$ [mm]...Höhe des unteren Ringes (Schüttguthöhe unter der Scherebene)	12,4	12,5	40,0
$h_J$ [mm]...Gesamthöhe des oberen & unteren Ringes (gesamte Schüttguthöhe in der Scherzelle)	28,5	28,5	80,0
$A_J$ [cm <sup>2</sup> ]...Scherfläche einer Jenike Scherzelle (Querschnittsfläche)	70,9	67,9	63,6
$V_{J,o}$ [cm <sup>3</sup> ]...Volumen im oberen Ring (Schüttgutvolumen über der Scherebene)	114,0	108,7	254,5
$V_{J,u}$ [cm <sup>3</sup> ]...Volumen im unteren Ring (Schüttgutvolumen unter der Scherebene)	88,0	84,9	254,5
$V_J$ [cm <sup>3</sup> ]...Gesamtvolumen im oberen & unteren Ring (gesamtes Schüttgutvolumen)	202,0	193,6	509,0
I....Standard Jenike-Scherzelle nach Kurz [15]			
II...Standard Jenike-Scherzelle nach Schulze [21]			
III...Jenike-Scherzelle im Labor des Institutes für Verfahrenstechnik des Industriellen Umweltschutzes [5]			
*...Da beim Schervorgang in dieser Scherzelle aus Konstruktionsgründen die Schüttguthöhe unter der Oberkante des oberen Ringes liegt, ist die tatsächliche Schüttguthöhe über der Scherebene dementsprechend geringer als $h_{J,o}$ . Geringer fallen demnach auch die tatsächlichen Schüttgutwerte bei $h_J$ , $V_{J,o}$ und $V_J$ aus.			

### 2.3.4 Der Aufbau eines Ringschergerätes

Das Ringschergerät zählt zu der Gruppe der Rotationsschergeräte, die den Vorteil des nicht apparativ begrenzten Scherweges besitzen. Das Prinzip des Ringschergerätes wurde von Hvorslev [9] in den 1930er Jahren für die Untersuchung von Böden entwickelt. Da in der Bodenmechanik Messungen immer bei großen Spannungen durchgeführt werden, war das Gerät entsprechend schwer. Das erste Ringschergerät speziell für Schüttgüter wurde von Walker [4] in den 1960er Jahren vorgestellt. Erst in den 1990er Jahren entwickelt Schulze eine modifizierte Bauart (Abbildung 38), die sowohl für Forschungszwecke aber auch in der Industrie eingesetzt werden kann. Dieses Gerät hat den Vorteil der leichteren Bauweise und der Möglichkeit zur Wandreibungsmessung. Außerdem ist die Scherzelle mit Deckel und Schüttgutprobe entnehmbar und es können sehr kleine Spannungen erreicht werden. Auch eine Automatisierung der Messung sowie der Auswertung ist mit einer rechengesteuerten Version möglich. [21]

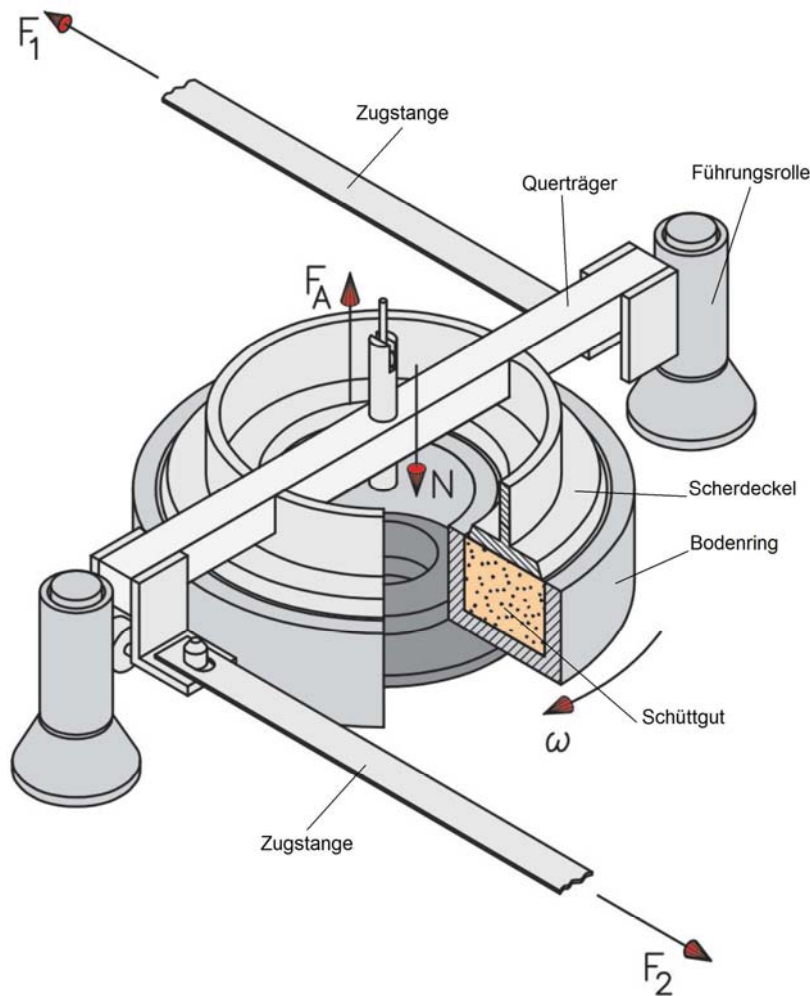


Abbildung 38: Ringschergerät nach Schulze

Der Unterteil der Scherzelle besteht aus dem Bodenring, der die Schüttgutprobe enthält. Auf dem Schüttgut ruht der ebenfalls ringförmige Scherdeckel, der mit einem Querträger verbunden ist. Dieser Querträger wiederum ist über zwei gelenkig gelagerte, parallele Zugstangen mit zwei Kraftaufnehmern verbunden. Zum Scheren der Schüttgutprobe kann der Bodenring langsam in Richtung der Winkelgeschwindigkeit  $\omega$  gedreht werden. Der Scherdeckel wird dabei durch den Querträger und den beiden Zugstangen am Mitdrehen gehindert. Die in den Zugstangen wirkenden Kräfte  $F_1$  und  $F_2$  werden gemessen. Aus ihnen wird später die Schubspannung in der Schüttgutprobe berechnet. Damit sichergestellt wird, dass die Scherverformung innerhalb des Schüttgutes und nicht zwischen Schüttgut und Scherdeckel oder Schüttgut und Boden stattfindet, sind der Scherdeckel auf der Unterseite und der Boden des Bodenrings rau (z.B. durch grobes Sandpapier oder Winkelprofile (Mitnehmer), die in das Schüttgut ragen). [21], [23]



Die horizontale Position des Scherdeckels wird durch die beiden Zugstangen zusammen mit den zwei seitlichen Führungsrollen fixiert. Eine weitere Lagerung des Deckels wie bei früheren Ringschergeräten ist deshalb nicht mehr erforderlich. Außerdem hat diese Konstruktion den Vorteil, dass der Deckel leicht aus der horizontalen Lage kippen kann (wie auch beim Jenike Schergerät). Bei nicht völlig homogener Füllung der Scherzelle ist somit eine gleichmäßigere Belastung der Schüttgutprobe möglich. Ein weiterer Vorteil den diese Konstruktion sowie auch das Jenike Schergerät bieten, ist die Möglichkeit der Entnahme der gefüllten Scherzelle mit Deckel, z.B. im Rahmen von Zeitverfestigungsmessungen. [21]

Die vertikal nach unten gerichtete Normalkraft  $N$  wird auf den mit dem Deckel verbundenen Querträger aufgebracht. Meist werden dazu (wie auch beim Jenike Schergerät) Gewichtsstücke auf einen Hänger aufgelegt, der auf dem Querträger angehängt ist. Bei automatisierten Geräten hingegen wird diese Normalkraft  $N$  durch eine entsprechende Vorrichtung eingestellt. Dazu wird mittels Elektromotor ein Gewicht rechnergesteuert auf einer Schiene unterhalb der eigentlichen Scherzelle verschoben. Diese Schiene ist auf einer Seite gelagert, so dass sie nach oben und unten geschwenkt werden kann, und auf der anderen Seite am Querträger der Scherzelle aufgehängt. Durch das Verschieben des Gewichtes kommt es nun aufgrund der veränderten Hebelwirkung zu unterschiedlichen Kräften, die über die Aufhängung am Querträger wirken. Die Gewichtskräfte von Scherdeckel, Hänger, Querträger und Zugstangen lassen sich kompensieren, indem eine z.B. durch ein Gegengewicht erzeugte, nach oben gerichtete Ausgleichskraft  $F_A$  am Querträger angreift. Dadurch können Normalkräfte erzeugt werden, die kleiner sind als die Gewichtskräfte der auf der Schüttgutprobe liegenden Teile. Prinzipiell lassen sich so Normalspannungen unter 100 Pa bis hin zu negativen Normalspannungen erzeugen. [21]

Wie auch beim Jenike Schergerät werden auch beim Ringschergerät die gemessenen Scherkräfte über der Zeit aufgezeichnet (mittels Linienschreiber oder Messdatenerfassungsanlage). Zusätzlich ist aber noch die vertikale Position des Scherdeckels durch einen Wegaufnehmer zu erfassen. Nur so kann das Probenvolumen des eingefüllten und gescherten Schüttgutes ermittelt werden. Zusammen mit der Masse des Schüttgutes lässt sich die mittlere Schüttguldichte  $\rho_b$  berechnen. Für die Auswertung des Fließortes ist die Schüttguldichte nach dem Anscheren wichtig, die der Verfestigungsspannung  $\sigma_1$  bei stationärem Fließen zuzuordnen ist. [21]

Wie auch beim Jenike Schergerät wird die Partikelgröße des zu untersuchenden Schüttgutes durch die Größe der Scherzelle begrenzt. In der nachfolgenden Tabelle 3 ist eine Standardabmessung eines Ringschergerätes angeführt. [20], [21]

Tabelle 3: Standardabmessungen für eine Ringscherzellen

Kennzahlen	Ringscherzelle nach Schulze
$D_{R,a}$ [mm]...Durchmesser des äußeren Ringes bei einer Ringscherzelle (äußerer Durchmesser des Schüttgutrings)	200
$D_{R,i}$ [mm]...Durchmesser des inneren Ringes bei einer Ringscherzelle (innerer Durchmesser des Schüttgutrings)	100
$D_{R,i}/D_{R,a}$ ...Durchmesserverhältnis bei einer Ringscherzelle	0,5
$h_R$ [mm]...Höhe des Bodenringes (im Inneren) bei einer Ringscherzelle ( $\neq$ Schüttguthöhe nach dem Anscheren)	40
$A_R$ [cm <sup>2</sup> ]...Querschnittsfläche des Schüttgutrings bei einer Ringscherzelle	Ca. 235
$V_R$ [cm <sup>3</sup> ]...Volumen bei einer Ringscherzelle ( $\neq$ Schüttgutvolumen nach dem Anscheren)	Ca. 900
$v_R$ [mm/min]...Schergeschwindigkeit bei einer Ringscherzelle	0,5 - 30
$s_R$ [mm]...Scherweg bei einer Ringscherzelle	unendlich

Mit Ringschergeräten dieser Größe können Partikel bis zu etwa 5 mm bei sehr engen Partikelgrößenverteilungen (monodispers, z.B. Kunststoffgranulat) und bis 10 mm bei breiten Verteilungen (z.B. Steinkohle 0 - 10 mm) untersucht werden. Sind sehr feinkörnige Schüttgüter (z.B. <250  $\mu\text{m}$ ) zu untersuchen können auch deutlich kleinere Scherzellen eingesetzt werden (z.B. Probenvolumina im Bereich von 9-70 cm<sup>3</sup>). Da u.a. aber auch die Partikelform und die Härte der Partikel eine Rolle spielen lassen sich genaue Obergrenzen nicht angeben. [21]

### 2.3.5 Vergleich der Schergeräte

Die Schergeräte sollen nun anhand einiger Merkmale miteinander verglichen werden. In Tabelle 4 werden nachfolgende Merkmale eingeteilt nach: + = geeignet, 0 = bedingt geeignet und – = nicht geeignet. [23]

(1) Innerer Reibungswinkel

Dieser kann zwar mit allen Geräten bestimmt werden, jedoch sind die erhaltenen Ergebnisse nicht unbedingt identisch.

(2) Wandreibungswinkel

Mit direkten Schergeräten kann der Wandreibungswinkel bestimmt werden. Dazu wird beim Jenike Schergerät die untere Scherhälfte und beim Ringschergerät die Abdeckplatte gegen eine Platte des jeweiligen Materials ausgetauscht für das der Wandreibungswinkel bestimmt werden soll.

(3) Scher- und Druckfestigkeit





Auch diese Größen lassen sich mit allen Schergeräten bestimmen, jedoch werden die erhaltenen Werte aus den verschiedenen Schergeräten, wie beim inneren Reibungswinkel nicht identisch sein.

(4) Zeitverfestigung

Existiert eine Verfestigung durch eine Belastung über einen längeren Zeitraum, so sind umfangreiche Messungen erforderlich um quantitative Aussagen darüber treffen zu können. Grundsätzlich ist jedes Gerät dazu in der Lage Zeitverfestigungen messen zu können, jedoch kann es bei einer größeren Probenanzahl und längeren Zeiten zu Schwierigkeiten kommen. Neben drei weiteren, bedingt geeigneten, Schergeräten ist das Jenike Schergerät noch am besten dazu geeignet solche Messungen durchzuführen. Der apparative Mehraufwand gegenüber den Ermittlungen von Scher- und Druckfestigkeit ohne Zeiteinfluss ist bei dieser Beurteilung mit eingeschlossen.

(5) Spannungsverteilung

Sämtliche Geräte messen Kräfte oder geben diese vor. Wie gleichmäßig diese Spannungen über die Flächen auf die sie wirken verteilt sind, wird angegeben in: + = zufriedenstellend, 0 = mäßig und – = schlecht.

(6) Homogene Verformung

Die Beurteilung erfolgt wie bei der Spannungsverteilung.

(7) Vollständiger Spannungszustand

Die Beurteilung ist nur positiv (+) wenn der Mohrsche Spannungskreis ohne Annahmen konstruiert werden kann.

(8) Vollständiger Deformationszustand

Ringschergeräte sind bzgl. dieses Merkmales als „bedingt geeignet“ beurteilt. Dies bedeutet, dass es in diesem Fall die Möglichkeit gibt mittels  $\gamma$ -Strahlen den Deformationszustand lokal zu ermitteln, ohne dass die Verformung bzgl. der Gesamtprobe homogen ist.

(9) Geeignet für elastische Schüttgüter

Bei den direkten Schergeräten mit Translationsbewegung (z.B. Jenike Schergerät) reicht der Scherweg oft nicht aus, um die Fließgrenze zu erreichen. Wie bereits angedeutet haben Rotationsschergeräte längere Scherwege (z.B. Ringschergerät).

(10) Geeignet für grobkörnige Schüttgüter

Wie auch schon bei der Eignung für elastische Schüttgüter sind auch hier direkte Schergeräte mit Translationsbewegung durch ihren kurzen Scherweg und auch der Änderung der Scherflächengeometrie als kritisch zu betrachten. Das Scherergebnis könnte auch verfälscht werden durch Verkantungen relativ großer Teilchen zwischen anderen Teilchen und der Probenbegrenzung.

(11) Geeignet für kleine Drücke ( $<0,1$  bar)

Indirekte Schergeräte sind wegen einer anfälligen Probenvorbereitung, einschließlich der Umhüllung mit einer Gummimembran, nicht geeignet für Messungen im unteren Druckbereich von 0,1 bis hinunter zu 0,001 bar. Eine bedingt geeignete Ausnahme bildet das Dreiaxialgerät.

## (12) Zeitlicher Aufwand

Ein + bedeutet dabei einen geringen, ein – einen hohen zeitlichen und oft damit verbunden auch finanziellen Aufwand.

## (13) Apparativer Aufwand

Auch hier gilt: + = geringer und - = hoher apparativer und damit auch finanzieller Aufwand.

Tabelle 4: Beurteilung von Schergeräten hinsichtlich verschiedener Merkmale

	Rahmenschergerät	Jenike Schergerät	Einfachschergerät	Torsionsschergerät	Ringschergerät	Ringschergerät mit 3 Druckringen	Zwei axialgerät	Zwei axialbox	Drei axialgerät	Drei axialbox
Innerer Reibungswinkel	+	+	+	0	+	+	+	+	+	+
Wandreibungswinkel	+	+	-	+	+	0	-	-	-	-
Scher- und Druckfestigkeit	+	+	+	0	+	+	+	+	+	+
Zeitverfestigung	0	+	-	0	0	-	-	-	-	-
Spannungsverteilung	0	+	+	-	-	0	0	+	0	+
Homogene Verformung	-	-	+	-	-	-	0	+	0	+
Vollständiger Spannungszustand	-	-	+	-	-	-	+	+	+	+
Vollständiger Deformationszustand	-	-	+	-	0	0	0	+	0	+
Geeignet für elastische Schüttgüter	-	-	0	+	+	+	0	+	+	+
Geeignet für grobkörnige Schüttgüter (>10 mm)	-	-	0	0	+	+	+	+	+	+
Geeignet für niedrige Drücke (<0,1 bar)	+	+	+	+	+	+	-	+	0	-
Zeitlicher Aufwand	+	+	-	+	+	0	0	-	0	-
Apparativer Aufwand	+	+	-	+	+	-	0	-	+	-

Die Tabelle 4 zeigt, dass es kein universelles Schergerät gibt das allen Anforderungen in gleicher Weise entspricht. Eine Einteilung in verschiedene Anwendungsbereiche bzw. Aufgabenstellungen und Zuweisung der Schergeräte, je nach Eignung und Vorteile dafür, ist sinnvoll [21], [23]:

- Wissenschaftliche Untersuchungen zu Ermittlung von Spannungs- und Deformationsbeziehungen:

Für diesen Anwendungsbereich werden das Einfachschergerät und die Zwei axialbox verwendet. Auch die Drei axialbox kann dazu verwendet werden, jedoch nicht für die in der Verfahrenstechnik interessanten Drücke.

- Praktische Ingenieursaufgaben (z.B. Dimensionierung von Schüttgutbunkern):

In diesem Bereich sind Einfeldschergerät, Zweiaxialbox und Dreiaxialbox wegen hohem Kosten- und Zeitaufwand ungeeignet. Das Jenike Schergerät und Ringschergerät hingegen sind für diesen Aufgabenbereich sehr gut geeignet. Beide haben aber Vor- und Nachteile.

Ebenso in Verwendung für Messungen im Bereich der praktischen Ingenieursaufgaben sind Rahmenschergeräte und Dreiaxialgeräte. Diese beiden Schergeräte sind Standardgeräte für praktische Aufgaben aus der Bodenmechanik. Das Rahmenschergerät ähnelt dem Prinzip des Jenike Schergerätes. Zum Unterschied hat es jedoch einen quadratischen Probenquerschnitt, der bei feinkörnigen Schüttgütern ( $<0.1$  mm) sich aber nachteilig auf Homogenität und Vorverdichtung der Probe auswirkt. Die Probe wird beim Jenike Schergerät vorverdichtet durch eine drehende Bewegung des Deckels. Dies ist durch einen quadratischen Querschnitt nicht möglich. Das Dreiaxialgerät ist hinsichtlich des Druckbereichs zu kleinen Drücken hin begrenzt. Beide Schergeräte, Rahmen- und Dreiaxialgerät, kommen deshalb in der mechanischen Verfahrenstechnik nur bedingt zum Einsatz.

- Qualitativer Vergleich von Schüttgütern

Nur für diesen Aufgabenbereich sollte das Torsionsschergerät verwendet werden. Dieses hat gegenüber dem Jenike Schergerät einen geringeren Zeitaufwand und der Versuchsablauf kann sehr leicht automatisiert werden. Eine Automatisierung beim Torsionsschergerät wiederum benötigt einen nicht so hoch qualifizierten Experimentator, der beim Jenike Schergerät hingegen unerlässlich ist. Für andere Aufgabenbereiche ist das Torsionsschergerät, durch die hohe Abhängigkeit der Verformung vom Durchmesser nicht geeignet. Diese Abhängigkeit gibt es eben beim Jenike Schergerät nicht, und beim Ringschergerät nur in einem geringeren Ausmaß.

### 2.3.6 Jenike Schergerät versus Ringschergerät

Für praktische Ingenieursaufgaben, vor allem für die Auslegung von Schüttgutbunker und -silos, haben sich das Jenike Schergerät und Ringschergerät als geeignet erwiesen. Hier soll nun eine Gegenüberstellung der Vor- und Nachteile dieser Schergeräte durchgeführt werden. [21], [23] Zu beachten ist auch die Gegenüberstellung von verschiedenen Merkmalen in Tabelle 4.

Einer der wohl größten Nachteile des älteren Jenike Schergerätes ist sein begrenzter Scherweg, durch den es durchaus zu verfälschten Ergebnissen kommen kann, wenn dieser sich als zu kurz erweist. Der Scherweg ist dabei auf die doppelte Wandstärke der Jenike Scherzelle (ca. 6-8 mm je nach Ausführung) begrenzt. Dieser große Nachteil des Jenike Schergerätes führt zugleich auch zum größten **Vorteil** des **Ringschergerätes**, das einen unbegrenzten Scherweg besitzt. Damit kann sichergestellt werden, dass auch wirklich bei

jedem Schervorgang ein stationärer Fließzustand (konstante Schubspannung und Schüttgutdichte) erreicht wird. Ein immer gleich bleibender Verfestigungszustand der Proben bei gleicher Normalspannung kann somit gewährleistet werden. Beim Jenike Schergerät muss dieser stationäre Fließzustand schon nach einem sehr kurzen Scherweg erreicht werden, weshalb man die Probe bereits vor dem Anscheren hinreichend verfestigen (Vorverfestigungsvorgang – „Twisten“) muss. Bei Ringschergeräten sind dieser aufwendige Vorverfestigungsvorgang, und damit auch die Ermittlung der richtigen Vorverfestigung, nicht mehr notwendig. Die Ermittlung der richtigen Vorverfestigung muss beim Jenike Schergerät schon im Vorfeld der eigentlichen Versuche durchgeführt werden.

Durch den Vorteil des unbegrenzten Scherweges wird das Ringschergerät immer mehr als Alternative zum Jenike Schergerät eingesetzt. Vor allem bei der Untersuchung von elastischen (z.B. Kunststoffpulver, Gummigranulat) und stark plastisch verformbaren (z.B. Klärschlamm, Filterkuchen, Lehm) Schüttgütern ist das Jenike Schergerät nicht einsetzbar. Auch die Untersuchung von stark grobkörnigen Schüttgütern ist oft nur mit einem Ringschergerät möglich. Das Jenike Schergerät weist dazu oft einen zu kurzen Scherweg auf. Dazu kommt auch noch die Änderung der Scherflächengeometrie während dem Scheren was dann oft zu Verkantungen der Teilchen führt.

Der unbegrenzte Scherweg und der gesamte apparative Aufbau eines Ringschergerätes lässt auch eine wesentliche Erleichterung bei der Durchführung der Schervorgänge zu. So ist es möglich mit nur einer Probe sämtliche Messpunkte eines Fließortes zu ermitteln, sofern die Probe nicht durch die Scherbeanspruchung verändert wird. Dies ist aber bei den wenigsten Schüttgütern der Fall. Mit dem Jenike Schergerät hingegen ist es nur möglich jeweils einen Messpunkt mit einer Probe zu bestimmen. D.h., mit einer Probe sind nur ein Anscheren und ein nachfolgendes Abscheren möglich. Für die Ermittlung eines Fließortes kann bei einem Jenike Schergerät deshalb mit ein bis zwei Stunden gerechnet werden. Dieser Zeitaufwand kann mit einem Ringschergerät deutlich verringert werden. Auch kommt hinzu, dass ein Ringschergerät sehr gut automatisiert werden kann. Dies verringert zusätzlich den Bedienungs- und Zeitaufwand zur Ermittlung eines Fließortes (ca. 5 min) und reduziert auch den Einfluss der Geschicklichkeit des Experimentators auf die Ergebnisse. Dadurch können zusätzliche Fehlerquellen ausgeschlossen werden. Die Qualifikation und Erfahrung des Experimentators spielt beim Jenike Schergerät hingegen eine sehr große Rolle.

Vor allem bei automatisierten, aber auch bei von Hand zu bedienenden Ringschergeräten ist die Reproduzierbarkeit der Messergebnisse besser als bei Jenike Schergeräten. Durch diese gute Reproduzierbarkeit, aber auch durch den geringeren Zeitaufwand bei Messungen werden vor allem automatisierte Ringschergeräte vermehrt im Bereich von Vergleichsmessungen eingesetzt. D.h., es ist auch durchaus als Alternative zum Torsionsschergerät in diesem Bereich zu betrachten. Auch durch die Möglichkeit von Untersuchungen bei kleineren Spannungen zeichnet sich das Ringschergerät gegenüber dem Jenike Schergerät aus. Die Untergrenze beim Jenike Schergerät liegt bei einer Verfestigungsspannung von ca. 3 kPa.

Obwohl grundsätzlich das Jenike Schergerät dem Ringschergerät bei Untersuchungen zur Wandreibung vorzuziehen ist (siehe auch nachfolgende Vorteile des Jenike Schergerätes), eignet sich das Ringschergerät durch seinen unbegrenzten Scherweg sehr gut für Untersuchungen zum Langzeitverhalten der Wandreibung. Dies gilt z.B. für Schüttgüter die einen Film auf dem Wandmaterial bilden, oder die die Oberfläche des Wandmaterials durch Verschleiß verändern. Oft ergeben sich zur Messung Kombinationen von Schüttgut und Wandmaterial, welche einen sehr langen Verformungsweg benötigen. Die Schüttgutprobe muss dann beim Jenike Schergerät recht mühsam immer wieder von Hand zurückgeschoben werden. Das Ringschergerät eignet sich auch durch die Möglichkeit der größeren Verformung besser für Abriebmessungen.

Neben diesen vielen Vorteilen haben **Ringschergeräte** aber auch **Nachteile** gegenüber Jenike Schergeräten. Der größte Nachteil ist die ungleichmäßige Verformung der Schüttgutprobe über den Querschnitt und damit die Durchmesserabhängigkeit der Schubspannung. Dies führt insbesondere bei überverfestigten Proben zu Problemen die Schubspannung bei beginnendem Fließen (Abscheren: Spannungsspitze wird abhängig vom Durchmesser unterschiedlich schnell erreicht) festzustellen. Durch entsprechende Versuchsdurchführung und Schergerätgeometrie (Durchmesser Verhältnis  $D_{R,i}/D_{R,a}$ ) kann dieser Nachteil aber behoben werden. Die Ergebnisse lassen sich dann mit jenen Ergebnissen aus Versuchen mit Jenike Schergeräten vergleichen.

Auch der apparative Aufwand bei der Messung der Wandreibung ist bei Ringschergeräten größer als bei Jenike Schergeräten. Jene Wandprobe, die im Schergerät verwendet wird, muss bei Ringschergeräten der Form des Schergerätes angepasst werden (Ringform). Bei Jenike Schergeräten kann diese Wandprobe eine simple rechteckige Platte hinreichender Größe sein, über die die Schüttgutprobe bewegt wird. Vor allem bei häufig wechselnden Wandmaterialien ist das Jenike Schergerät in diesem Punkt weniger aufwendig. Auch eine Richtungsabhängigkeit der Wandreibung (z.B. bei Riefen im Wandmaterial) kann mit einem Translationsschergerät (Jenike Schergerät) ermittelt werden. Mit Rotationsschergeräten hingegen werden alle Richtungen gleichzeitig gemessen und man erhält einen Mittelwert der Wandreibung für alle Richtungen. Wie aber oben schon besprochen wurde eignet sich das Ringschergerät durch seinen unbegrenzten Scherweg besser für Untersuchungen zum Langzeitverhalten der Wandreibung.

Nach dem Anscheren wird das Probenvolumen gemessen. Dies ist notwendig um die Schüttgutdichte, welche der wirkenden Verfestigungsspannung bei stationärem Fließen nach dem Anscheren zuzuordnen ist, und für die Auswertung des Fließortes benötigt wird, ermitteln zu können. Während das Probenvolumen bei Jenike Schergeräten vorgegeben ist muss bei Ringschergeräten die Höhenposition des Deckels festgestellt werden. Dies ist auch ein Nachteil des Ringschergerätes gegenüber dem Jenike Schergerät bei Messungen der Verdichtbarkeit einer Schüttgutprobe. Bei Ringschergeräten ist die Höhe der Schüttung eben von der Verdichtung abhängig.

Wenn man ältere Bauweisen der Ringschergeräte betrachtet, so muss man noch weitere, oft vorhandene Nachteile anführen:

- Schwere Bauweise
- Keine Messung der Wandreibung möglich
- Keine kleinen Spannungen erreichbar
- Der Deckel ist bei neueren Ringschergeräten (wie auch bei Jenike Schergeräten) etwas aus horizontaler Lage kippbar. Dies führt zu gleichmäßigeren Belastungen der Schüttgutprobe.
- Neuere Ringschergeräte besitzen eine Scherzelle mit entnehmbarem Deckel und Schüttgutprobe (wie auch Jenike Schergeräte). Dadurch sind Messungen zur Zeitverfestigung möglich.

## 3 Praktisches Messen von Fließeigenschaften

In diesem Kapitel soll nun genauer auf die praktische Durchführung von Scherversuchen eingegangen werden. Es werden die einzelnen Arbeitsschritte sowohl beim Jenike Schergerät als auch beim Ringschergerät näher erläutert.

### 3.1 Messungen mit Schergeräten

Das Prinzip der Messung beruht auf einer Scherverformung. Die Ober- und Unterseite eines Schüttgutes wird horizontal verschoben, während es durch eine vertikale Normalspannung  $\sigma$  belastet wird. Die dabei erforderliche Schubspannung  $\tau$  wird gemessen. Bei einer geradlinigen (translatorischen) Relativbewegung spricht man von Translationsschergeräten. Dazu zählt das Jenike Schergerät. Bei Rotationsschergeräten wird die Relativbewegung durch eine Rotation von Schüttgutbereichen gegeneinander erreicht. Zu diesen Vertretern zählt das Ringschergerät. [21]

#### 3.1.1 Fließortmessung mittels Jenike Scherzelle

Die Beschreibung der Messprozedur mit dem Jenike Schergerät erfolgt hier entsprechend der Vorgehensweise in der „Standard Shear Testing Technique“ [10]. Dies ist ein auf internationaler Ebene erarbeiteter Standard für Messungen mit dem Jenike Schergerät. Dieser Vorschrift folgt auch der ASTM-Standard D6128-00 [1]. [21]

Die verwendeten Nummerierungen für die Teile der Jenike Scherzelle entsprechen den Nummerierungen aus Abbildung 35, Abbildung 36 und Abbildung 37 im Abschnitt 2.3.3.

Zur Versuchsvorbereitung wird die in Abbildung 36 dargestellte Anordnung benutzt. Zunächst werden Bodenring 1 und oberer Ring 3 auf den Sockel 2 des Schergerätes aufgesetzt. Auf den oberen Ring 3 wird zusätzlich der Füllring 11 gesetzt. Danach werden oberer Ring 3 und Füllring 11 entgegen der späteren Scherrichtung exzentrisch gegen Anschläge gedrückt, die so eingestellt sind, dass der obere Ring 3 und der Füllring 11 um eine Wandstärke zum Bodenring 1 versetzt sind. Durch diese exzentrische Lage wird beim späteren Scherversuch ein größerer Scherweg ermöglicht (max. doppelte Wandstärke der Scherzelle). [15], [21]

Nun folgt der Befüllungsvorgang. Mit einer Schaufel wird das Gut in den gemeinsamen Hohlraum eingefüllt, bis es schließlich über der oberen Basis des Füllrings 11 leicht aufgeböscht ist. Das überstehende Schüttgut wird vorsichtig mit einem Spachtel entlang der Oberkante des Füllrings 11 abgestreift, so dass sich eine ebene Schüttgutoberfläche ergibt. Das verbleibende Gut darf dabei nicht verfestigt werden und sollte danach mit der oberen Basisfläche des Füllrings 11 abschließen. [15], [21]



Der Scherweg bei der Jenike Scherzelle ist stark begrenzt, weshalb stationäres Fließen beim Anscheren bereits nach einem sehr kurzen Scherweg erreicht werden muss. Dies ist nur möglich, wenn die Probe schon vor dem Anscheren nahezu hinreichend verfestigt ist, denn dann ist nur noch ein relativ kurzer Scherweg bis zum Erreichen des stationären Fließens notwendig. Zur Vorverfestigung der Schüttgutprobe dient das „Twisten“. [15], [21]

Dazu wird der Belastungsdeckel 12 auf die Schüttgutoberfläche aufgesetzt. Die Schüttgutprobe wird nun mit dem Hänger 15 und den darauf liegenden Gewichtsstücken mit derjenigen Normalkraft  $N$  belastet, die auch beim Anscheren verwendet werden soll. Im Augenblick ist aber noch keine Schubspannung angelegt. Wird die Wandreibung an den Mantelflächen der Ringe vernachlässigt, so ist nun die aufgebrachte Normalspannung eine Hauptspannung. Die zweite Hauptspannung in horizontaler Richtung ist wegen der eingeschränkten seitlichen Bewegungsfähigkeit des Schüttgutes kleiner. Der nun entsprechende Mohrkreis ist gegenüber dem Mohrkreis des stationären Fließens zu kleineren Spannungen hin verschoben. Die Probe ist deshalb prinzipiell unterverfestigt, und nicht etwa schon kritisch verfestigt. Dies ist auch erwünscht, allerdings wäre nun ohne weitere Maßnahmen der Verfestigungsbereich im Scherverlauf sehr groß, so dass der stationäre Zustand wegen des kurzen Scherwegs beim Jenike Schergerät nicht erreicht wird. Nach einer Empfehlung von Jenike wird das Gut nun weiter verfestigt. Dabei wird eine schwingende Drehbewegung (abwechselnd links- und rechtsherum = Twisten) auf den Belastungsdeckel 12 ausgeübt, wobei der Hänger 15 mit dem Gewicht auf der Spitze des Belastungsdeckels 12 belassen wird. Dadurch wirken die durch die Reibung zwischen Schüttgut und Belastungsdeckel 12 erzeugten Spannungen in Umfangsrichtung und verdichten das Schüttgut zusammen mit der durch die Normalkraft  $N$  erzeugten Normalspannung. Der Spannungszustand wird dabei besonders wirkungsvoll erhöht, wenn die Unterseite des Belastungsdeckels 12 mit Sandpapier beklebt ist. Neben der Verfestigung des Schüttgutes findet auch ein Dichteausgleich in der Schüttgutprobe durch den Twistvorgang statt. [15], [21]

Mit zwei Fingern einer Hand wird der Füllring 11 nach unten gedrückt und damit fixiert. Mit der noch freien Hand wird ein speziell geformter Schlüssel von der Seite in die abgeschliffenen Flächen der Spitze 13 des Belastungsdeckels eingeführt. Es darf dabei keine Vertikalkraft auf die Schüttgutprobe ausgeübt werden. Aus der Nulllage wird nun der Belastungsdeckel 12 auf einen Winkel  $+ \alpha$ , dann zurück auf  $- \alpha$  und schließlich wieder in die Nulllage gedreht. Dies sei eine Drehbewegung ( $n=1$ ). Ein gebräuchlicher Wert ist  $\alpha=45^\circ$ . Die erforderliche Anzahl  $n$  der Twistbewegungen ist von Schüttgut zu Schüttgut unterschiedlich und kann auch von Fließort zu Fließort variieren. Sie muss experimentell im Rahmen von Vorversuchen gefunden werden und ist ausreichend, wenn stationäres Fließen bei nachfolgendem Anscheren erreicht wird. D.h., dass noch vor dem Erreichen der zentrischen Lage beider Ringe (oberer Ring 3 und Bodenring 1) eine konstante Scherkraft erreicht werden muss. Zur Kontrolle ist bei diesen Vorversuchen aber der gesamte Scherweg auszunutzen. Man gibt zunächst  $n=2$  vor und steigert dann gegebenenfalls auf  $n=5, 10, 15, 20, 30$ . Ist die notwendige Zahl an Drehbewegungen gefunden und durch zwei bis drei Wiederholungsversuche bestätigt, kann mit dem Anschere- bzw. Abschervorgang begonnen



werden. Bei manchen Schergeräten wird die schwingende Drehbewegung durch einen Handhebel 17 erzeugt. Dieser ist dann ein Teil einer Twistvorrichtung 14, die ansonsten noch aus einer Twiststange 18, welche mit dem Handhebel 17 verbunden ist, und einem Twistdeckel 16, der den Belastungsdeckel 12 ersetzt, besteht. [15], [21]

Bei stark kompressiblen Schüttgütern kann es vorkommen, dass das Schüttgut bereits beim vorsichtigen Aufsetzen des mit Gewichtstücken belasteten Hängers 15 so stark verdichtet wird, dass der Belastungsdeckel 12 tief einsinkt. Das Gutniveau kann somit unter die Oberkante des oberen Rings 3 absinken, oder das obere Querjoch des Hängers liegt bereits auf der Oberkante des Füllrings 11 auf. In diesem Fall müssen der Hänger 15 und der Belastungsdeckel 12 wieder entfernt und die Scherzelle nachgefüllt werden. Dies muss so oft wiederholt werden, bis hinreichend viel Schüttgut in der Scherzelle ist. Auch während des Twistens kann es vorkommen, dass bei einer kleineren Zahl an Drehbewegungen als der vorgegebenen die Schüttgutoberfläche unter die Oberkante des oberen Ringes 3 absinkt. Auch dann muss nachgefüllt werden, und der Nachfüllungsvorgang ist erst beendet, wenn nach der vorgegebenen Zahl an Drehbewegungen die Schüttgutoberfläche über dem oberen Ring 3 steht. Nach dem Twisten darf nicht mehr nachgefüllt werden. [15], [21]

Nach der Vorverfestigung können die Punkte eines Fließortes gemessen werden. Dazu wird zuerst angeschert und danach abgeschert. Der dazugehörige Aufbau der Scherzelle wird in Abbildung 35 a dargestellt. In folgender Reihenfolge werden das Gewicht und der Hänger 15 entfernt, vorsichtig der Füllring 11 und anschließend mit einer drehenden Bewegung der Fülldeckel 12 abgehoben. Das überstehende Schüttgut wird mit einem Spachtel in Höhe der Oberkante des oberen Ringes 3 abgestreift. Dabei ist darauf zu achten, dass die durch das Twisten vorverfestigte Probe nicht aufgelockert wird, z.B. in dem der obere Ring 3 gegenüber dem Bodenring 1 verschoben wird. [15], [21]

Die Schüttgutoberfläche schließt nun mit der Kante des oberen Ringes 3 ab, und auf ihr wird nun der Scherdeckel 4 zentrisch aufgelegt. Er ist dabei so zu positionieren, dass zwischen dem Stift 7 und dem oberen Ring 3 ein Spalt von 0,1-0,2 mm verbleibt. Um die Normalkraft  $N$  einzustellen wird der Hänger 15 mit den Gewichtsstücken, die auch schon während des Twistens benutzt wurden, auf den Scherdeckel 4 gehängt. Durch das Anheben des oberen Ringes 3 bei gleichzeitigem Drehen um seine vertikale Achse um ca. 0,2 mm vermeidet man, dass der obere Ring 3 Normal- oder Schubspannungen auf den Bodenring 1 überträgt. In der Schüttgutprobe wirkt in Höhe der Unterkante des oberen Ringes 3 nun die Anschernormalspannung  $\sigma_{an}$ . Diese resultiert aus, der von außen auf den Scherdeckel wirkenden Normalkraft  $N$  (Gewichtsstücke und Hänger 15), aus den Gewichten der sonstigen oberhalb dieser Ebene befindlichen Teile (Scherdeckel 4, oberer Ring 3) und dem Schüttgut innerhalb des oberen Ringes 3. Damit ist die Scherzelle fertig vorbereitet für den Anschervorgang. [15], [21]

Zum Anscheren wird nun der Vorschub eingeschaltet, der den Scherstift 8 mit konstanter Geschwindigkeit in Richtung Scherzelle bewegt. Damit die Scherkraft auch kein Drehmoment auf die Trennebene zwischen oberem Ring 3 und Bodenring 1 ausübt, muss dieser Scherstift 8 exakt in Höhe der Trennebene positioniert sein. Ein Scherkraft S-Weg-

Verlauf wird registriert (Linienschreiber, Messdatenerfassung). Der Verlauf der Scherkraft wird zunächst stark, dann immer weniger stark ansteigend sein bis sie schließlich einen konstanten Wert erreicht (Abbildung 39). Damit ist stationäres Fließen erreicht. Bei zentrischer Lage beider Ringe wird der Scherstift 8 zurückgefahren, bis die Scherkraft auf Null abgesunken ist. Der Vorschubmotor wird abgeschaltet. [15], [21]

Vor dem Abscheren der Probe wird die Normalkraft  $N$  reduziert, indem Gewichtsstücke vom Hänger 15 abgenommen werden, um die Abschernormalspannung  $\sigma_{ab}$  für den ersten Messpunkt einzustellen. Dabei sollte der Hänger 15 nicht vom Scherdeckel 4 abgehoben werden, weil die Probe nicht vollständig entlastet werden soll. Anschließend wird der Scherstift 8 wieder in Höhe der Trennebene zwischen oberem Ring 3 und Bodenring 1 gegen den Bügel 6 des Scherdeckels 4 gefahren und ein Scherkraft  $S$ -Weg-Verlauf registriert. Bei feinkörnigen, wenig elastischen Schüttgütern wird der Anstieg der Scherkraft bis zum Maximum sehr schnell erfolgen. Sobald die Fließgrenze erreicht ist beginnt die Probe zu fließen (beginnendes Fließen) und die Scherkraft  $S$  bzw. Schubspannung  $\tau$  fällt wieder ab (Abbildung 39). [15], [21]

Sobald das Maximum im Schubspannungsverlauf eindeutig erkannt wird, kann der Scherstift 8 wieder zurückgefahren werden. Zum Schluss der Messung wird die gesamte Scherzelle inkl. Schüttgut gewogen, woraus man mit Hilfe von Scherzellenmasse und Scherzellenvolumen die Schüttgutdichte berechnen kann. Da hierfür das vollständige Innenvolumen von Bodenring 1 und oberem Ring 3 benutzt wird, ist die berechnete Schüttgutdichte gleich der mittleren Schüttgutdichte unmittelbar nach dem Twisten. Dies dient auch zur Ermittlung der Porosität der Probe, mit der man Aussagen über die Brauchbarkeit der gemessenen Werte treffen kann. [15], [21]

Damit ist die Messung eines Punktes des Fließortes beendet. Die gemessenen Wertepaare  $\sigma_{an}$  (Anschnormalspannung)/ $\tau_{an}$  (Anschnerschubspannung bei stationären Fließen) sowie  $\sigma_{ab}$  (Abschnormalspannung)/ $\tau_{ab}$  (Abschnerschubspannung bei beginnenden Fließen), welche aus den zugehörigen, aufgebrachten und gemessenen Kräften resultieren, können zur weiteren Auswertung notiert werden. Nach dem Messen des ersten Abscherpunktes des Fließortes werden weitere Punkte durch Wiederholung der beschriebenen Prozedur gemessen. D.h. es werden identisch vorbereitete Proben, welche unter gleicher Normallast angeschert und unter verschiedenen kleineren Normallasten (durch entsprechend verschieden aufgelegte Gewichte) abgeschert werden, gemessen. Vorzugsweise benutzt man dazu Schüttgut, welches noch nicht für einen Scherversuch verwendet wurde. Ansonsten ist dieses Schüttgut vor der Wiederverwendung gut aufzulockern. Die Wiederverwendung von Schüttgut, dessen Partikel sich bei der Messung verändert haben (z.B. durch Partikelzerstörung bei empfindlichen Schüttgütern), sollte unterlassen werden. Aus mehreren Abscherpunkten lässt sich dann der Fließort mit seinen Parametern bestimmen (Abbildung 39). [15], [21]

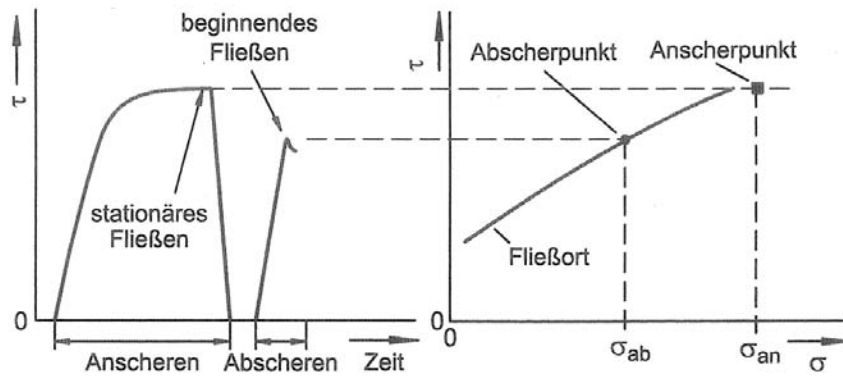


Abbildung 39: Messung eines Punktes eines Fließortes durch An- und Abscheren

Besonders wichtig bei der beschriebenen Prozedur ist der Verlauf der Scherkraft  $S$  bzw. der dazu proportionalen Schubspannung  $\tau$ . Anhand des Verlaufs der Schubspannung kann beurteilt werden, ob die Vorverfestigung (Twisten) die gewünschte Verfestigung der Probe gebracht hat. Bei einem Verlauf wie in Abbildung 40 a wurde am Ende des Anschers stationäres Fließen, ausgehend von einer unterverfestigten Probe, erreicht. Die Schüttgutdichte hat sich während des Anschers erhöht, und die maximale Schubspannung wird mit dem stationären Fließen erreicht. Liegt hingegen ein Verlauf wie in Abbildung 40 b vor, so ist die Probe bei der Vorverfestigung bereits überverfestigt worden. Die Schubspannung  $\tau$  durchläuft ein Maximum, das größer ist als die Schubspannung beim stationären Fließen. Dieses Maximum kennzeichnet beginnendes Fließen bzw. einen Bruch in der Schüttgutprobe. Es kann auch weniger stark ausgeprägt sein, als in Abbildung 40 b dargestellt wird. Wird die überverfestigte Probe weiter geschert so stellt sich zwar auch ein stationäres Fließen ein, aber nur für eine beschränkte Scherzone im Bereich der Bruchfläche. D.h., dass nur der Bereich der Scherzone die zum stationären Fließen gehörigen Eigenschaften hat, während der Rest der Schüttgutprobe die ursprünglichen Eigenschaften der überverfestigten Probe behält. Die Ermittlung einer zu großen Schüttgutdichte, sowie eine inhomogene Probe sind die Folge. [21]

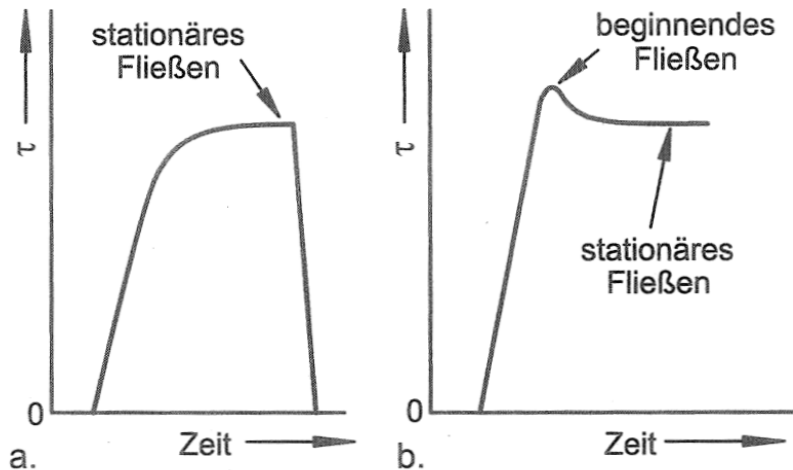


Abbildung 40: Verlauf der Schubspannung über der Zeit beim Anscheren einer a) unterverfestigten Probe; b) überverfestigten Probe

Eine überverfestigte Probe eignet sich wegen der Inhomogenität nicht zum Abscheren und ist daher zu verwerfen. Bei Wiederholungsmessungen muss die Anzahl der Twistbewegungen reduziert werden. [21]

Ein Schubspannungsmaximum kann aber auch bei einer unterverfestigten Probe auftreten, wenn man das Scheren nach dem Erreichen des Schubspannungsplateaus weiter fortsetzt. Dieses weniger stark ausgeprägte Maximum wird verursacht durch Umordnung von Partikeln und Konzentration der Scherzone bzw. bei groben Schüttgütern durch die Ausdehnung der Schüttgutprobe beim Anscheren. [21]

In manchen Fällen ist die Anzahl der Twistbewegungen zu gering, um entlang des zur Verfügung stehenden Verformungsweges stationäres Fließen zu erreichen. Die gemessene Scherkraft steigt dann bis zum Ende des Verformungsweges immer noch an. Die Anzahl der Twistbewegungen muss dann erhöht werden. Wenn diese Maßnahme nicht ausreicht kann auch noch die Normallast beim Twisten erhöht werden. Hier besteht dann aber die Gefahr, dass das Schüttgut überverfestigt wird. Aufgrund des begrenzten Scherweges muss dies auch nicht bemerkt werden. Gerade bei sehr feinen Schüttgütern (feucht oder trocken) kann das Überverfestigen zu einem langgestreckten Maximum im Schubspannungsverlauf führen (Abbildung 41). Dieses scheinbare stationäre Fließen kann irrtümlich leicht als echtes stationäres Fließen interpretiert werden. Erst bei längerer Scherverformung würde es entlang der gestrichelten Linie (Abbildung 41) zu einer Abnahme der Schubspannung kommen. Das Spannungsniveau des stationären Fließens ist in Wirklichkeit niedriger als das angenommene. Wegen des begrenzten Scherweges beim Jenike Schergerät besteht in diesem Fall meistens nicht die Möglichkeit den gestrichelten Verlauf der Schubspannung auch tatsächlich zu messen. Die Beurteilung hinsichtlich der Überverfestigung wird somit erschwert. [21]

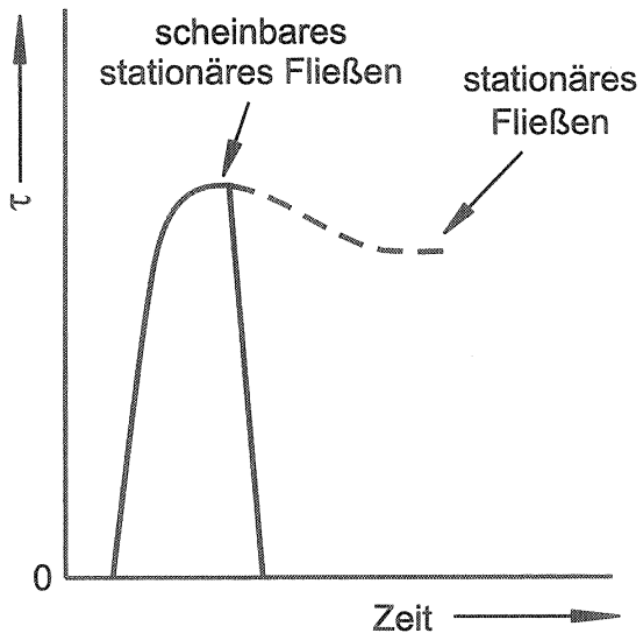


Abbildung 41: Möglicher Verlauf der Schubspannung bei einer überverfestigten Probe bei großer erforderlicher Scherverformung

Wie viel Zeit man benötigt für die Messung eines Fließortes ist schwer anzugeben. Das kann von Schüttgut zu Schüttgut variieren und hängt auch von der Anzahl der Vorversuche, der Zahl der Messpunkte sowie dem Bediener ab. Da bei min. drei verschiedenen Abschernormalspannungen pro Fließort gemessen werden sollte, und aufgrund der Streuung der Messwerte auch jeder Fließort min. zweimal gemessen werden sollte, ist ein Zeitbedarf von ein bis zwei Stunden pro Fließort realistisch. [21]

### 3.1.2 Fließortmessung mittels Ringscherzelle

Eine ausführliche Beschreibung der Versuchsprozedur für Ringschergeräte ist in einem ASTM Standard [2] vorhanden. Die hier angeführte Versuchsprozedur mit einer handbedienten Ausführung eines Ringschergerätes nach Abbildung 38 folgt im Wesentlichen diesem Standard. [21]

Nachdem die Masse der leeren Scherzelle ermittelt wurde wird sie zur Versuchsvorbereitung bis zur Oberkante mit Schüttgut gefüllt. Das dabei überschüssige Schüttgut wird mit einem Spachtel in Höhe der Oberkante abgestreift. Somit ergibt sich eine ebene Schüttgutoberfläche, wie sie auch beim Jenike Schergerät entsteht. Anschließend wird die Masse der gefüllten Scherzelle ermittelt, die später zur Berechnung der Schüttgudichte benötigt wird. Durch den unendlich langen Scherweg beim Ringschergerät entfallen die beim Jenike Schergerät aufwendige Vorverfestigung der Probe und damit auch die Ermittlung der richtigen Vorverfestigung. Die gefüllte Scherzelle wird auf das Ringschergerät aufgesetzt und der Scherdeckel wird langsam auf die Schüttgutprobe gelegt. Außerdem wird der Querträger



mit den beiden Zugstangen in den Scherdeckel eingesetzt und ein vertikaler induktiver Wegaufnehmer in Position gebracht. Der Scherdeckel kann nun Normal- und Scherbelastungen auf das Schüttgut übertragen. Noch vor dem Anscheren werden dazu Hänger und Gegengewicht (Kraft  $F_A$  - Abbildung 38) mit dem am Scherdeckel befestigten Querträger verbunden. Die gewünschte Normalkraft  $N$  wird durch Gewichtsstücke erzeugt, die auf den Hänger aufgelegt werden. Die Scherzelle ist somit fertig vorbereitet für die anschließende Messung. [21], [23]

Zum Anscheren wird nun das Schergerät eingeschaltet. Der Bodenring der Scherzelle dreht sich dadurch im Uhrzeigersinn (von oben betrachtet), während über den Querträger die Zugstangen den Scherdeckel am Mitdrehen hindern. Die Schubspannung  $\tau$  erhält man aus den mit den Kraftaufnehmern gemessenen Kräften in den Zugstangen ( $F_1$  und  $F_2$ ). Da die Schüttgutprobe vorher keiner Belastung ausgesetzt war, handelt es sich um eine unterverfestigte Probe. Der registrierte Verlauf der Schubspannung  $\tau$  über den Scherweg zeigt den bekannten Verlauf mit elastischer Verformung, Verfestigung und schließlich stationärem Fließen (Abbildung 42). Während die Höhe der Schüttgutprobe aufgrund der Verdichtung beim Anscheren abnimmt steigt also die Schubspannung mit der Zeit zunächst an (Abbildung 42). Allerdings kann die Probenhöhe bei kohäsionslosen, nicht verdichtbaren Schüttgütern auch gering zunehmen. Die Probenhöhenveränderung wird über den Wegaufnehmer registriert und dient zur Berechnung der Dichte aus dem Schüttgutvolumen im Bodenring. Wichtig ist dabei das Schüttgutvolumen nach dem Anschervorgang, also nach dem stationären Fließen. Stationäres Fließen ist erreicht, wenn die Schubspannung nicht weiter ansteigt. Damit ist der Anschervorgang beendet und die Scherzelle wird zurückgefahren bis die Schubspannung wieder auf Null abgesunken ist. [21], [23]

Nun kann die erste Abschernormalspannung durch entsprechendes Auflegen von Gewichtsstücken eingestellt werden. Danach wird durch erneutes Scheren in der ursprünglichen Drehrichtung abgeschert bis das Maximum im Verlauf der Schubspannung (beginnendes Fließen in Abbildung 42) zu erkennen ist. Wie beim Jenike Schergerät auch, wird das Maximum als ein Punkt des Fließortes angesehen. [21], [23]

Anders als beim Jenike Schergerät hingegen kann in der Regel sofort wieder bis zum Erreichen des stationären Fließens angeschert und danach wieder abgeschert werden. Dieses Wechselspiel wird so lange durchgeführt, bis alle gewählten Punkte des Fließortes bestimmt sind. Zu beachten ist allerdings, dass vor jedem Anscheren bzw. Abschern durch entsprechend aufgelegte Gewichtsstücke immer dieselbe Anschernormalspannung und eine immer kleiner werdende Abschernormalspannung eingestellt werden. Sofern das Schüttgut nicht durch die Scherbeanspruchung verändert wird können sämtliche Messpunkte eines Fließortes mit einer Probe ermittelt werden. Der Zeitaufwand zur Schüttgutuntersuchung kann somit beträchtlich verringert werden. [21]



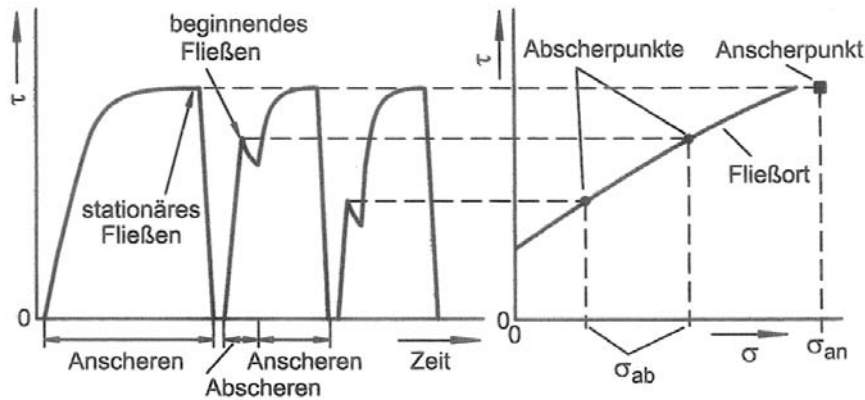


Abbildung 42: Fließortmessung durch An- und Abscheren mit einem Ringschergerät bei der Messung mehrerer Abscherpunkte mit einer Schüttgutprobe

Auch eine automatisierte Variante dieser Scherzelle ist möglich. Die Normalkraft  $N$  wird dann über eine Vorrichtung rechnergesteuert eingestellt. Der Benutzer kann somit auch Normalspannungen vorgeben, die dann unter Berücksichtigung der Abmessungen der verwendeten Scherzelle vom Rechner in die entsprechenden Normalkräfte  $N$  umgerechnet werden. Rechnergesteuert werden dann auch der Scherzellenantrieb, die Messdatenaufnahme und die Auswertung der Messung. Der Rechner muss aber in der Lage sein stationäres und beginnendes Fließen zu erkennen und dann eigenständig zum nächsten Schritt der Messung überzugehen. Der Messaufwand pro Fließort entspricht dann nur mehr etwa fünf Minuten. Durch diesen geringen Zeitaufwand kommt es vermehrt zum Einsatz des Gerätes in Bereichen, wo zwar keine Silos ausgelegt werden, aber Vergleichsmessungen mit guter Reproduzierbarkeit und Genauigkeit benötigt werden. [21]

Das Ringschergerät wird in der beschriebenen Form auch zunehmend als Alternative zum Jenike Schergerät eingesetzt, da es diesem in einigen Bereichen überlegen ist (z.B. Messung von grobkörnigen und elastischen Schüttgütern – siehe auch Abschnitt 2.3.6). [21]

### 3.1.3 Messung der Zeitverfestigung

Die Zeitverfestigungsmessung ist für das Jenike Schergerät und das Ringschergerät ähnlich, und wird hier für beide Geräte beschrieben.

Die Vorbereitung der Probe sowie auch das nachfolgende Anscheren erfolgt bei Zeitverfestigungsmessungen genauso wie auch bei Fließortmessungen. Allerdings folgt nach dem Anscheren und dem Entlasten nicht sofort der Abschervorgang, sondern eine Lagerung für eine vorgegebene Zeit unter Last. Diese Lagerung kann entweder im Schergerät selbst erfolgen (Schergerät steht während der Lagerzeit dann aber nicht mehr für weitere Messungen zur Verfügung), oder auch in speziellen Vorrichtungen (Zeitverfestigungsbank oder auch Zeitverfestigungsständer). Nachdem die Probe samt Scherzelle behutsam in die Zeitverfestigungsbank gesetzt wurde, wird sie dort mit einer vertikal wirkenden Normallast

belastet, die der vorhergehenden Beanspruchung beim Anscheren (= berechnete Verfestigungsspannung  $\sigma_1$  bei der Fließortmessung) entspricht. [21]

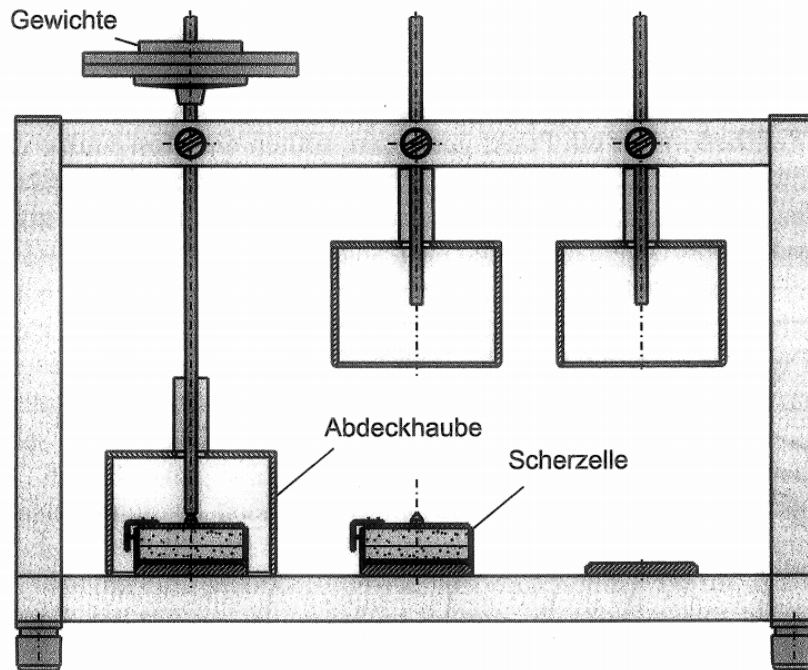


Abbildung 43: Zeitverfestigungsbank mit Abdeckhaube (hier: Jenike Scherzelle)

Als Schutz vor Umwelteinflüssen und um Feuchtigkeitsveränderungen bei der Probe zu vermeiden, kann die gesamte Scherzelle samt Probe mit einer Haube in der Zeitverfestigungsbank abgedeckt werden. Manchmal ist aber auch die Lagerung der Schüttgutprobe unter einer definierten Atmosphäre, die mittels Klimakammer erzeugt wird, gewünscht. Die Schüttgutprobe wird in diesem Fall ohne Abdeckung gelagert. Unbedingt ist aber auf einen vibrationsfreien Untergrund und die Vermeidung unerwünschter Temperaturänderungen (Sonneneinstrahlung, Heizkörper) zu achten. [21]

Auf die beschriebene Weise werden mehrere Proben vorbereitet, gelagert und nach einer bestimmten Zeit abgeschert. Wenn sich beim Abscheren kein höheres Maximum für die Scherkraft bzw. Schubspannung  $\tau$  ergibt als beim Abscheren ohne zwischenzeitliche Lagerung, zeigt die Schüttgutprobe keine Zeitverfestigung. Eine Zeitverfestigung liegt hingegen vor, wenn das Schubspannungsmaximum höher liegt. Da die Proben nach verschiedenen Zeiten  $t$  abgeschert werden, ergeben sich für diese Zeiten unterschiedliche Punkte im  $\sigma$ ,  $\tau$ -Diagramm. Meist ist es dabei ausreichend, die Zeitverfestigung nur für einen Punkt des Fließortes, d.h. bei nur einer Abschernormalspannung, zu ermitteln. Die Zeitfließorte werden dann durch Parallelen zum Fließort durch die für die verschiedenen Zeiten ermittelten Messpunkte angenähert (Abbildung 44). Die Druckfestigkeiten  $\sigma_c$  für die verschiedenen Lagerzeiten ergeben sich aus der größeren Hauptspannung der Mohrschen Spannungskreise, die durch den Ursprung gehen (kleinste Hauptspannung  $\sigma_2=0$ ) und die jeweiligen Zeitfließorte tangieren. Wird von jedem Zeitfließort nur ein Punkt gemessen,

sollten die Messpunkte in der Nähe bzw. etwas rechts vom jeweiligen Berührungspunkt von Zeitfließort und Spannungskreis für  $\sigma_c$  liegen. Ansonsten müsste zu weit extrapoliert werden, was Ungenauigkeiten nach sich ziehen kann. [21]

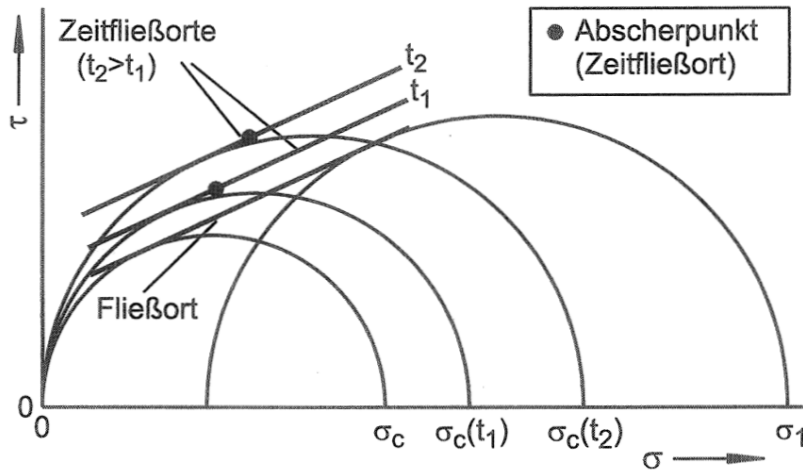


Abbildung 44: Fließort mit als Parallelen angenäherten Zeitfließorten

### 3.1.4 Messung der Wandreibung

Da sich Jenike Schergerät und Ringschergerät bei der Vorgehensweise der Messung der Wandreibung sehr ähnlich sind, werden beide Geräte hier beschrieben. Die nachfolgende Nummerierung der Teile einer Jenike Scherzelle bezieht sich auf die Nummerierung in der Abbildung 35, Abbildung 36 und Abbildung 37.

Der Aufbau der Jenike Scherzelle bei der Wandreibungsmessung ist in Abbildung 35 b dargestellt. Zur Vorbereitung der Messung wird der Distanzring 10 und die Wandprobe 9 auf die Zentrierplatte 2 des Schergerätes aufgesetzt. Dabei dient der Distanzring 10 zur Anhebung der Wandprobe 9, so dass ihre Oberkante in selber Höhe wie der Scherstift 8 liegt (= Höhe der Scherfläche). Wie bei der Vorbereitung einer Fließortmessung wird die Scherzelle mit Hilfe des Füllrings 11 befüllt. Da die Wandreibung jedoch kaum von der Schüttgutdicke abhängig ist, kann die aufwändige Versuchsprozedur mit der Bestimmung der richtigen Vorverfestigung, wie sie bei der Messung von Fließorten notwendig ist, entfallen. Um jedoch eine homogenere Schüttgutprobe zu erhalten und ein zu starkes Einsinken des Scherdeckels bei späterer Belastung zu verhindern, ist es ratsam, die Probe dennoch mit einigen Twistbewegungen zu verfestigen. [21]

Zur Messung wird die Schüttgutprobe unter verschiedenen Wandnormalspannungen über die Wandprobe geschoben. Dies ist möglich, da die Schüttgutdicke die Messung kaum beeinflusst und daher nicht für jede Spannung eine eigene Probe vorbereitet werden muss. In der Regel ist die Wandreibung kleiner als die innere Reibung, so dass sich die gesamte Schüttgutprobe relativ zur Wandprobe bewegt. [21]

Üblicherweise beginnt man die Messung mit der größten Wandnormalspannung  $\sigma_{w1}$ , die man dann jeweils nach Erreichen einer konstanten Wandschubspannung  $\tau_w$  stufenweise verringert. D.h., dass man die Schüttgutprobe zunächst mit der größten Wandnormalspannung  $\sigma_{w1}$  bzw. Normalkraft  $N$  belastet (durch Auflegen entsprechender Gewichtsstücke auf den Hänger 15). Dann wird geschert indem der Scherstift 8, der gegen den Bügel 6 am Scherdeckel 4 drückt, vorgefahren wird. Die gemessene Scherkraft  $S$  (entsprechend der Wandschubspannung  $\tau_w$ ) steigt an und erreicht schließlich einen konstanten Wert (Abbildung 21). Danach wird die Wandnormalspannung  $\sigma_w$  während des Versuches verringert (durch Reduzierung der Gewichtsstücke, die auf dem Hänger 15 liegen) und erneut geschert, bis wieder eine konstante Scherkraft  $S$  erreicht ist. Die Reduzierung der Wandnormalspannung  $\sigma_w$  und der jeweils nachfolgende Schervorgang bis zum Erreichen der konstanten Scherkraft  $S$  werden mehrmals wiederholt, bis genügend Wertepaare (Wandnormalspannung  $\sigma_w$  / Wandschubspannung  $\tau_w$  (jeweils bei konstantem Wert)) ermittelt wurden, so dass man den Wandfließort und daraus den Wandreibungswinkel erhält. I.a. kann man so mit einem Versuch mehrere Punkte eines Wandfließortes ermitteln. Damit ist die Messung beendet. [21]

Häufig treten Wandschubspannung  $\tau_w$ -Scherweg-Verläufe auf, wie sie in Abbildung 45 dargestellt sind. Dabei kennzeichnet Abbildung 45 a ein Material mit slip-stick-Verhalten, also einer alternierenden Haft- und Gleitreibung. Bei der Auslegung von Massenflusssilos für Schüttgüter mit slip-stick-Verhalten wird der Wert der Haftreibung (Maximalwert) zugrunde gelegt, da diese immer wieder überwunden werden muss. Die Abbildung 45 b zeigt einen Wandschubspannung  $\tau_w$ -Scherweg-Verlauf, wie er häufig bei Kunststoffbeschichtungen auftritt. Bei der Massenfluss/Kernfluss-Entscheidung ist dabei der stationäre Wert maßgeblich. [23]

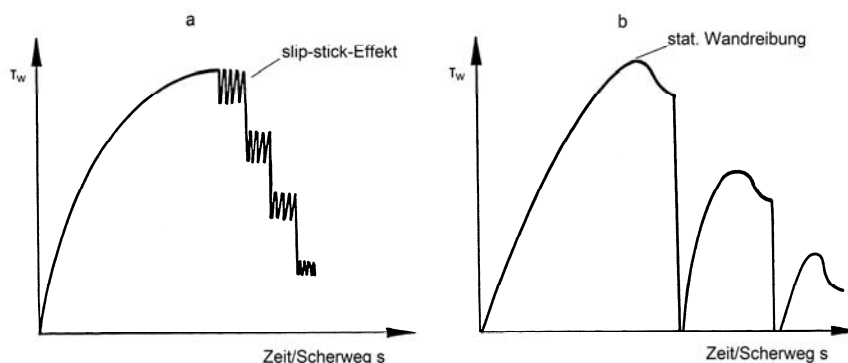


Abbildung 45: Wandschubspannung  $\tau_w$ -Scherweg-Verläufe bei: a) slip-stick-Effekt und b) Kunststoffbeschichtungen

Beim Ringschergerät wird eine ringförmige Wandmaterialprobe in eine Wandscherzelle eingelegt (Abbildung 46). Das Schüttgut befindet sich oberhalb der Wandprobe und wird vom Scherdeckel mit einer Normalkraft  $N$  vertikal belastet. Dadurch wird die Wandnormalspannung  $\sigma_w$  zwischen Schüttgut und Wand eingestellt. Bei der Messung dreht

sich nun die Scherzelle in Richtung der Winkelgeschwindigkeit  $\omega$ , während der Deckel, der von den Zugstangen am Drehen gehindert wird, das Schüttgut festhält. Dadurch ergibt sich eine Relativbewegung zwischen dem ruhenden Schüttgut und der rotierenden Wandmaterialprobe. Die Wandschubspannung  $\tau_w$  ergibt sich aus den gemessenen Kräften  $F_1$  und  $F_2$ . Die Messprozedur läuft genauso ab wie oben für das Jenike Schergerät geschildert. [21]

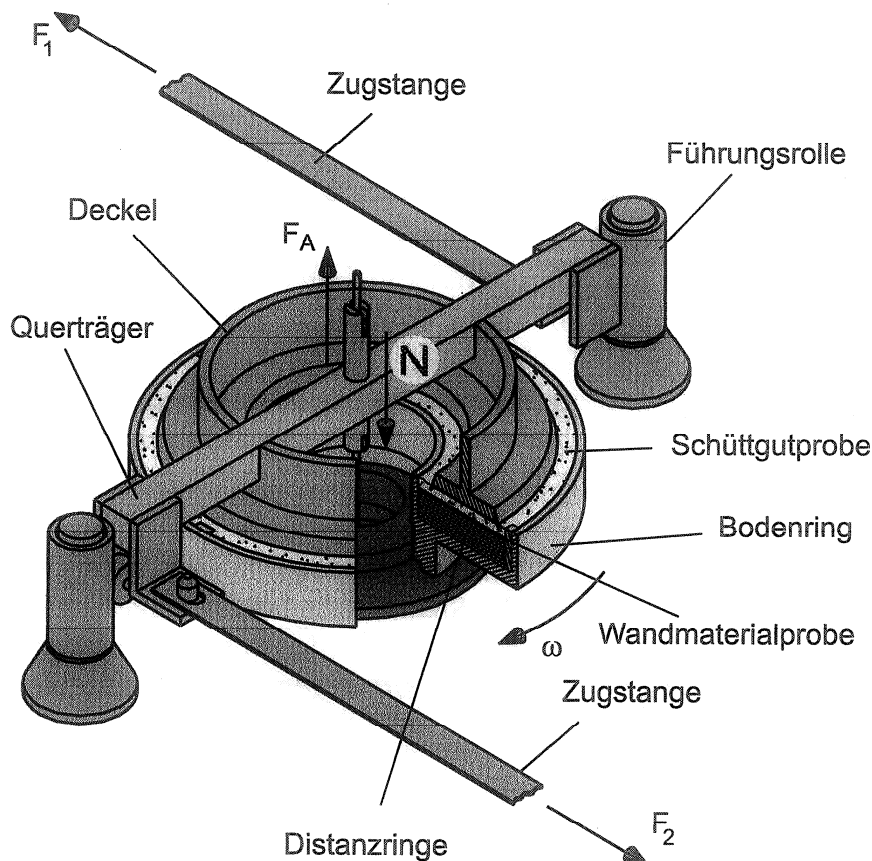


Abbildung 46: Messung der Wandreibung mit dem Ringschergerät

## 3.2 Festlegen der Spannungen

### 3.2.1 Fließorte (Fließfähigkeit)

#### 3.2.1.1 Auswahl des Spannungsniveaus

Vor der Messung sind die Normalspannungen festzulegen, unter denen die Schüttgutprobe an- und abgeschert wird. Dabei ist es sinnvoll in einem Spannungsbereich zu messen, indem auch eine geplante Anwendung bzw. Handhabung der Schüttgüter liegt. In Silos kann dies die maximale Spannung oder die Spannung in Auslaufnähe sein. Weitere Beispiele sind die Spannung bei der Lagerung von Säcken auf Paletten, in einem kleinen Gebinde (z.B. Tonne,



Eimer, Fass) oder bei der Dosierung kleiner Mengen. Werden ähnliche Stoffe anhand der Messergebnisse miteinander verglichen, so hat das Spannungsniveau meist keinen großen Einfluss auf die qualitative Aussage. In den meisten Fällen genügt es, die Spannungen der Anwendung bei der Messung nur grob einzustellen, da sich die tatsächlich auftretenden Spannungen bei der Anwendung nur schwer berechnen lassen. Als Maß für das Spannungsniveau gilt die **Verfestigungsspannung  $\sigma_1$** , von der die Fließeigenschaften abhängen. [21]

In Tabelle 5 sind zur einfacheren Abschätzung der Verfestigungsspannung Werte angeführt, wie sie für bestimmte Anwendungen typisch sind bzw. dort auftreten können. Da die Spannungen in einer Schüttung meistens durch die Schwerkraft erzeugt werden, spielt die Schüttgutdichte  $\rho_b$  eine wichtige Rolle. Die auf das Schüttgut wirkende Spannung wird umso größer, je größer die Schüttgutdichte ist. Außerdem nehmen die Verfestigungsspannungen mit der Größe der Anwendung zu. Bei Silos und Trichtern treten Auslaufprobleme meist in der Nähe der Auslauföffnung auf. Hier sind die Spannungen im Entleerungszustand relativ klein und hängen nicht von der Silogröße ab. Es ist demnach auch nicht sinnvoll die Fließeigenschaften bei der maximalen Spannung im Silo zu messen. [21]

Zu bedenken ist auch noch, dass je nach verwendetem Schergerät nicht beliebig kleine Spannungen eingestellt werden können. Die Untergrenze beim Jenike Schergerät liegt bei einer Verfestigungsspannung von etwa 3 kPa. Mit Ringschergeräten lassen sich auch noch Messungen mit geringeren Spannungen durchführen. [21]

Sollen Messung ohne Berücksichtigung einer konkreten Anwendung durchgeführt werden, oder sind die Spannungen in der Anwendung nicht bekannt und können auch nicht abgeschätzt werden, so empfiehlt es sich Verfestigungsspannungen im Bereich von 4 - 8 kPa zu wählen. Dieser Spannungsbereich tritt bei vielen Anwendungen auf und kann auch mit jedem Schergerät gemessen werden. [21]

Tabelle 5: Verfestigungsspannung  $\sigma_1$  in Abhängigkeit von der Anwendung und der Schüttgutdichte  $\rho_b$  (grobe Anhaltswerte zur Abschätzung der Verfestigungsspannung)

Anwendung	Schüttgutdichte $\rho_b$ [kg/m <sup>3</sup> ]				
	0 - 50	150 - 300	300 - 600	600 - 1200	1200 - 2500
Gebinde bis 20 Liter; Dosieren kleiner Mengen	400 Pa	800 Pa	1600 Pa	2500 Pa	4 kPa
Gebinde bis 100 Liter; Fässer	800 Pa	1500 Pa	2500 Pa	5 kPa	10 kPa
BigBags, Säcke auf Paletten geschichtet, Transportbehälter	1500 Pa	2500 Pa	5 kPa	10 kPa	20 kPa
Mittlere und große Silos (Spannungen im Siloschaft)	3 kPa	7 kPa	12 kPa	25 kPa	50 kPa
Auslauföffnungen von Silos oder Trichtern	Spannung abhängig von der Auslaufgröße				

### 3.2.1.2 Normalspannungen beim An- und Abscheren

Nachdem die Verfestigungsspannung  $\sigma_1$  festgelegt wurde sind die Normalspannungen für den An- und Abschervorgang zu bestimmen. Bei der Messung eines Fließortes ergibt sich die maßgebliche Verfestigungsspannung  $\sigma_1$  (= größte Hauptspannung beim Anschern) erst beim Konstruieren des Fließortes, also nach der Messung. Sie kann also im Gegensatz zur **Anschernormalspannung**  $\sigma_{an}$  nicht genau vorherbestimmt werden. Bei ähnlichen Schüttgütern weichen die Verfestigungsspannungen, wenn mit identischen Normalspannungen  $\sigma_{an}$  angeschert wird, im Regelfall nur wenig voneinander ab. Außerdem wirken sich geringfügig unterschiedliche Spannungen meistens nur wenig auf den Wert der Fließfähigkeit aus. Daher reicht es meist aus, für Vergleichsmessungen jeweils die gleiche Anschernormalspannung  $\sigma_{an}$  einzustellen und auf völlige Gleichheit der Verfestigungsspannung  $\sigma_1$  zu verzichten. [21]

Der genaue Zusammenhang zwischen  $\sigma_1$  und  $\sigma_{an}$  ist für jedes Schüttgut und jedes Spannungsniveau anders. Als grobe Abschätzung kann aber folgende Gleichung verwendet werden [21]:

$$\sigma_{an} = k \times \sigma_1 \quad (7)$$

Die Werte für den Multiplikationsfaktor  $k$  liegen meist zwischen 0,3 – 0,7, wobei ein sinnvoller Wert zum groben Abschätzen  $k=0,5$  darstellt. [21]

Nachdem die Anschernormalspannung  $\sigma_{an}$  festgelegt ist, müssen noch die **Abschernormalspannungen**  $\sigma_{ab,i}$  gewählt werden. Diese sollte nach oben hin nicht größer als etwa 80% der Anschernormalspannung sein. Die kleinste, einstellbare Abschernormalspannung wird durch die apparative Gegebenheit des Schergerätes festgelegt (z.B. beim Jenike Schergerät durch die Massen des Schüttgutes und aller anderen Teile oberhalb der Scherebene). Die Abscherpunkte sollten allerdings nach Möglichkeit nicht links vom Punkt B (Berührungspunkt des Fließortes mit dem Spannungskreis für die Druckfestigkeit  $\sigma_c$  - Abbildung 47) liegen. Der unterste Abscherpunkt sollte aber auch nicht zu weit rechts vom Punkt B liegen, da ansonsten der Fließort zu weit nach links extrapoliert werden müsste, um den Spannungskreis für die Druckfestigkeit konstruieren zu können. Die Bestimmung der Druckfestigkeit  $\sigma_c$  würde dadurch ungenauer. [21]



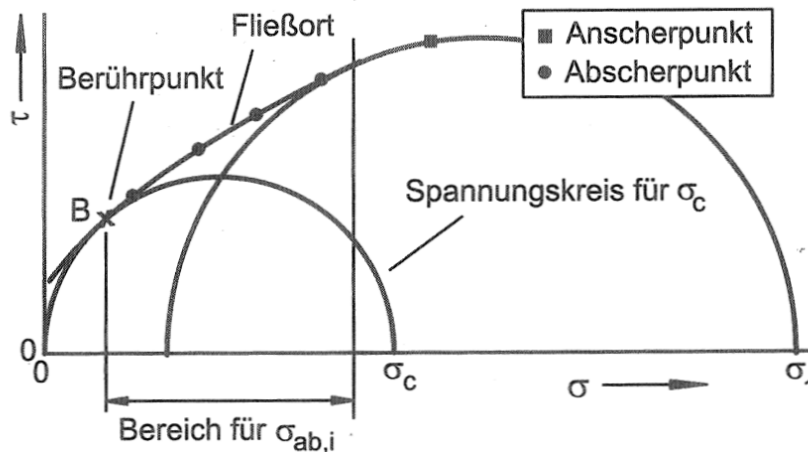


Abbildung 47: Anzustrebender Bereich für die Abschernormalspannungen  $\sigma_{ab,i}$

Im Bereich links vom Berührungspunkt B, bei großen Verhältnissen von Schubspannung zu Normalspannung, wurde bei einigen Schüttgütern vermehrt ein Abfallen der Abscherpunkte zu kleineren Schubspannungen hin registriert. Je weiter links der Messpunkt vom Punkt B entfernt liegt, umso stärker ist dieser Effekt. Dies liegt u.a. daran, dass alle Spannungskreise, die den Fließort links vom Punkt B berühren, teilweise im Bereich negativer Normalspannungen (Zugspannungen) liegen. Schüttgüter können aber meist nur kleine Zugspannungen übertragen. Auch weicht links vom Berührungspunkt B die Richtung der Hauptspannung beim Abscheren zunehmend von der Richtung beim Anscheren ab. Deshalb kommt es durch das anisotrope Verhalten der Schüttgüter ebenfalls zu einer Verringerung der gemessenen Schubspannungen. Auch die konstruktiven Gegebenheiten des Jenike Schergerätes könnten eine weitere Ursache darstellen. Bei großen Verhältnissen von Schubspannung zu Normalspannung kann es dabei oft zum Kippen des Scherdeckels kommen. [21]

Durch das Messen nur einiger Punkte des meist gekrümmten Fließortes, was aus praktischen Gründen üblich ist, erhält man lediglich eine Annäherung an den tatsächlichen Fließort. Die Wahl der verwendeten Abschernormalspannungen beeinflusst somit die Ergebnisse der Auswertung des Fließortes, insbesondere den Wert der Druckfestigkeit  $\sigma_c$ . Gerade Messpunkte, im oft sehr stark gekrümmten Bereich deutlich links vom Berührungspunkt B und welche deutlich nach unten verschoben sind, sollten verworfen werden. Sie führen im linken Bereich zu nach unten verschobenen Fließorten und im Weiteren zu einer kleineren Druckfestigkeit  $\sigma_c$ . Vor allem bei der Siloauslegung würde eine zu geringe Druckfestigkeit  $\sigma_c$  zu einer Unterdimensionierung der Auslauföffnung führen. Die praktische Erfahrung zeigt, dass Abscherpunkte links vom Punkt B aber toleriert werden können, solange der Fließort durch sie nicht zu sehr nach unten gekrümmt wird. Am besten ist es, schon im vorneherein, geeignete Abschernormalspannungen auszuwählen. [21]

Bei Vergleichsmessungen, bei denen immer die gleichen Abschernormalspannungen  $\sigma_{ab,i}$  gewählt werden sollten, können solche Punkte links vom Punkt B aber toleriert werden, da

sie keinen Einfluss auf die relativen Unterschiede der Fließfähigkeiten der untersuchten Proben haben. [21]

Leider ist vor einer Messung nicht bekannt, wie groß die Druckfestigkeit  $\sigma_c$  ist und bei welcher Normalspannung  $\sigma$  sich der Berührungspunkt B des Spannungskreises für  $\sigma_c$  mit dem Fließort befindet. Dies ist abhängig von den Fließeigenschaften des Schüttgutes. Die untere Grenze der Normalspannung beim Abscheren  $\sigma_{ab}$  muss also abgeschätzt werden, wobei Tabelle 6 als Leitlinie dienen kann. [21]

Tabelle 6: Anhaltswerte zur Abschätzung der unteren Grenze für die Normalspannung beim Abscheren (Beispiele gelten grob für Anschernormalspannungen zwischen 2 bis 10 kPa)

Erwartetes Fließverhalten	Untere Grenze für $\sigma_{ab}$	Beispiele
<b>Frei fließend</b>	<10% von $\sigma_{an}$	Trockener Sand, Kristallzucker, Kunststoffgranulat, Tafelsalz
<b>Gut fließend bis leicht kohäsiv</b>	10-25% von $\sigma_{an}$	Braunkohlenstaub, Waschpulver, Fertigmörtel
<b>kohäsiv</b>	25-40% von $\sigma_{an}$	Feuchte Steinkohle 0-5mm, Weizenmehl, Puderzucker
<b>Schwer fließend</b>	>40% von $\sigma_{an}$	Feuchter REA-Gips, Zinkoxid, feuchter Klärschlamm, $TiO_2$

Je besser ein Schüttgut fließt, desto kleiner ist der Mohrsche Spannungskreis für die Druckfestigkeit  $\sigma_c$  und desto kleiner kann die untere Grenze der Normalspannung beim Abscheren  $\sigma_{ab}$  gewählt werden. Bei frei fließenden Produkten kann diese untere Grenze weniger als 10%, bei schwer fließenden Produkten 40% und mehr von der Anschernormalspannung betragen. Ist keine Abschätzung des Fließverhaltens möglich, sollte die kleinste Abschernormalspannung  $\sigma_{ab,1}$  mit etwa 20% von der Anschernormalspannung gewählt werden. [21]

Damit auf der einen Seite der Aufwand gering gehalten wird, aber auf der anderen Seite eine hinreichend genaue Wiedergabe des Fließortes gewährleistet ist, hat sich die Wahl von drei unterschiedlichen Abschernormalspannungen ( $\sigma_{ab,1} < \sigma_{ab,2} < \sigma_{ab,3}$ ) bewährt. Diese sind gleichmäßig im vorzugebenden Bereich zu verteilen. Die größte Abschernormalspannung  $\sigma_{ab,3}$  wird mit etwa 80% der Anschernormalspannung gewählt. Die kleinste Abschernormalspannung  $\sigma_{ab,1}$  wird mit der unteren Grenze, abhängig von den Fließeigenschaften des Schüttgutes, gleichgesetzt (Tabelle 6). Die mittlere Abschernormalspannung  $\sigma_{ab,2}$  wird genau in der Mitte zwischen größter und kleinster Abschernormalspannung gewählt. Sollen mehr als drei Abschernormalspannungen benutzt werden, verfährt man entsprechend. [21]

### 3.2.2 Zeitfließorte (Fließfähigkeit bei Zeitverfestigung)

Das Spannungsniveau wird analog zur Fließortmessung ausgewählt (Abschnitt 3.2.1.1).



Da vor einer Zeitverfestigung ein Fließort gemessen werden muss, benutzt man die Anschernormalspannung  $\sigma_{an}$  des Fließortes. Für das nachfolgende Abscheren nach der Lagerung ist es sinnvoll eine Abschernormalspannung zu benutzen, mit der auch schon ein Punkt des zugehörigen Fließortes gemessen wurde. Auch hier gilt, der Abscherpunkt sollte nicht links vom Berührungspunkt des Zeitfließortes mit dem Spannungskreis für die Druckfestigkeit  $\sigma_c$  dieses Zeitfließortes liegen. Um eine zu weite Extrapolation zu vermeiden, ist auch eine Lage des Abscherpunktes zu weit rechts vom Berührungspunkt nicht ratsam. Eine gut gewählte Lage der Messpunkte wird in Abbildung 44 dargestellt. [21]

Wird ein Fließort mit drei Punkten (Abschernormalspannungen ( $\sigma_{ab,1} < \sigma_{ab,2} < \sigma_{ab,3}$ )) gemessen, so verwendet man meist die mittlere Abschernormalspannung  $\sigma_{ab,2}$  zur Messung des Zeitfließortes, wenn die Größe der Zeitverfestigung vorher nicht abgeschätzt werden kann. Rechnet man mit einer sehr geringen Zeitverfestigung, kann der Abscherpunkt auch bei kleineren Normalspannungen liegen, d.h. man kann bei der Abschernormalspannung  $\sigma_{ab,1}$  des Fließortes abscheren. Das Abscheren bei der größeren Abschernormalspannung  $\sigma_{ab,3}$  des Fließortes oder auch bei noch größeren Spannungen empfiehlt sich bei starker Zeitverfestigung. Im Allgemeinen sollten immer mehrere Schüttgutproben pro Lagerzeit bei gleicher Verfestigungsspannung angesetzt werden, um die Abschernormalspannung variieren zu können. [21]

### 3.2.3 Wandfließorte

Wie auch schon bei der Fließortmessung sollte bei der Messung der Wandreibung Spannungen verwendet werden, die auch bei der geplanten Anwendung oder Handhabung der Schüttgüter auftreten. Wird bei einer Vergleichsuntersuchung neben der Wandreibung auch ein Fließort gemessen, so sollte die größte Wandnormalspannung des Wandfließortes ( $\sigma_{w,1}$  in Abbildung 21) etwa gleich der Verfestigungsspannung  $\sigma_1$  des gemessenen Fließortes sein. Werden nur die Wandfließorte gemessen muss vor der Messung des Wandfließortes das relevante Spannungsniveau abgeschätzt werden, d.h. die größte Wandnormalspannung des Wandfließortes ist festzulegen. Dies erfolgt identisch wie bei der Festlegung der Verfestigungsspannung  $\sigma_1$ . Mit der Tabelle 5 wird zunächst ein für die Anwendung zutreffender Wert  $\sigma_1$  bestimmt. Die Wandnormalspannung wird dann diesem Wert  $\sigma_1$  gleichgesetzt. Soll ohne Berücksichtigung einer konkreten Anwendung die Wandreibung bestimmt werden, oder sind Spannungen in der Anwendung unbekannt und können auch nicht abgeschätzt werden, wählt man die Wandnormalspannung in einem Bereich von 4 - 8 kPa. Solch ein Spannungsbereich tritt bei vielen Anwendungen auf. [21]

Da der Wandreibungswinkel häufig Spannungsabhängig ist, sollten mehrere Punkte eines Wandfließortes gemessen werden. Üblich ist eine Messung bei sechs verschiedenen Normalspannungen. Dabei wird nach Festlegung der größten Wandnormalspannung die kleinste Wandnormalspannung mit etwa 5 - 10% von der größten gewählt. Der Messbereich des verwendeten Schergerätes ist natürlich dabei zu berücksichtigen. Alle übrigen Wandnormalspannungen werden gleichmäßig zwischen der größten und kleinsten

Wandnormalspannung verteilt. Der bei der größten Wandnormalspannung zuerst gemessene Messpunkt ist zu ignorieren. [21]

### 3.3 Messung von Fließeigenschaften bezogen auf die Anwendung

#### 3.3.1 Vergleichsmessungen

Solche Messungen dienen z.B. der laufenden Überprüfung der Qualität eines Produktes oder der Optimierung von Produkten hinsichtlich ihrer Fließeigenschaften. Folgende Messgrößen sind dabei, je nach Anwendung sinnvoll [21]:

- Die Fließfähigkeit  $ff_c$  erhält man aus einem Fließort, und erlaubt Aussagen über das Verhalten eines Schüttgutes, ohne längere vorangegangene Lagerung in Ruhe.
- Die Fließfähigkeit  $ff_c$ , die aus einer Zeitverfestigungsmessung ermittelt werden kann, erlaubt Aussagen über das Verfestigungsverhalten eines Schüttgutes nach längerer Lagerung in Ruhe. Durch die Lagerung des Schüttgutes in einer Zeitverfestigungsbank unter bestimmten Umgebungsbedingungen (z.B. Klimaschrank) kann der Einfluss der Lagerbedingungen ermittelt werden.
- Der Wandreibungswinkel  $\varphi_w$  erlaubt Aussagen darüber, wie gut sich ein Schüttgut über eine bestimmte Wandoberfläche bewegen lässt. Damit lässt sich z.B. sagen, ob sich ein Schüttgut entlang einer Trichterwand oder Schurre bewegt oder nicht. Der Wandreibungswinkel wird bei Vergleichsmessungen jedoch selten gemessen.

Bei der Wahl der Spannungen siehe auch Abschnitt 3.2.

#### 3.3.2 Verfahrenstechnische Siloauslegung

Die verfahrenstechnische Siloauslegung nach der Theorie von Jenike ist die häufigste Anwendung von Schergeräten neben der Bestimmung der Fließfähigkeit im Rahmen von Vergleichsmessungen. Dazu werden die Fließeigenschaften des Schüttgutes in Abhängigkeit von der Verfestigungsspannung  $\sigma_1$  benötigt. Diese erhält man nur durch das Messen mehrerer Fließorte (üblich sind dabei drei oder vier Fließorte bei unterschiedlichen Verfestigungsspannungen) im relevanten Spannungsbereich. Bei der Wahl der Verfestigungsspannungen, bei denen die Fließorte gemessen werden, müssen die Spannungsverhältnisse in der Trichterspitze abgedeckt werden. Diese Spannungen sind proportional zur Schüttguldichte  $\rho_b$ . Zur Wahl der Verfestigungsspannung  $\sigma_1$  für den Fließort mit der kleinsten Verfestigungsspannung liefert Tabelle 7 Anhaltswerte. Die Verfestigungsspannung dieses Fließortes wird  $\sigma_{1,\min}$  genannt. [21]

Tabelle 7: Verfestigungsspannungen  $\sigma_{1,\min}$  des Fließortes mit der kleinsten Verfestigungsspannung

Schüttgutedichte $\rho_b$ [kg/m <sup>3</sup> ]	<300	300 - 800	800 - 1600	1600 - 2400	>2400
Kleinste Verfestigungsspannung $\sigma_{1,\min}$ [kPa]	ca. 1,5	ca. 2	ca. 2,5	ca. 3	ca. 4

Jene Verfestigungsspannungen  $\sigma_1$  der übrigen zwei oder drei Fließorte sind dann etwa zwei-, vier- und achtmal so groß wie die aus der Tabelle 7 entnommene kleinste Verfestigungsspannung  $\sigma_{1,\min}$  zu wählen. Im Allgemeinen kann auf einen vierten Fließort verzichtet werden, wenn ein Schüttgut als gut fließend eingestuft werden kann. Bei sehr schlecht fließenden Schüttgütern wird meistens der erste Fließort nicht benötigt. [21]

Wenn auch eine Messung der Zeitverfestigung erforderlich ist, werden zu den einzelnen Fließorten die zugehörigen Zeitfließorte für die zu untersuchenden Lagerzeiten gemessen. Für die Ermittlung der Wandreibung zur Siloauslegung wird wie unter Abschnitt 3.1.4 beschrieben vorgegangen. Als größte Wandnormalspannung wird die Verfestigungsspannung des Fließortes mit der zweitkleinsten Verfestigungsspannung gewählt. [21]

## 4 Auswertung der Messdaten

Dieses Kapitel dient der Darstellung wie die erhaltenen Messdaten bei Scherversuchen ausgewertet werden. Dabei werden zu Beginn die bei den Versuchen wirkenden Normal- und Schubspannungen berechnet. Diese dienen als Grundlage um anschließend einige Kennzahlen zur Fließfähigkeit eines Schüttgutes ermitteln zu können. Erst mit diesen Kennzahlen ist es möglich einen Bunker bzw. Silo für ein Schüttgut auszulegen.

Grundsätzlich kann ein Schüttgut auf zwei verschiedene Arten aus einem Bunker oder Silo ausfließen: **Massenfluss** oder **Kernfluß** (Abbildung 48 bzw. siehe auch: [5] und [24]).

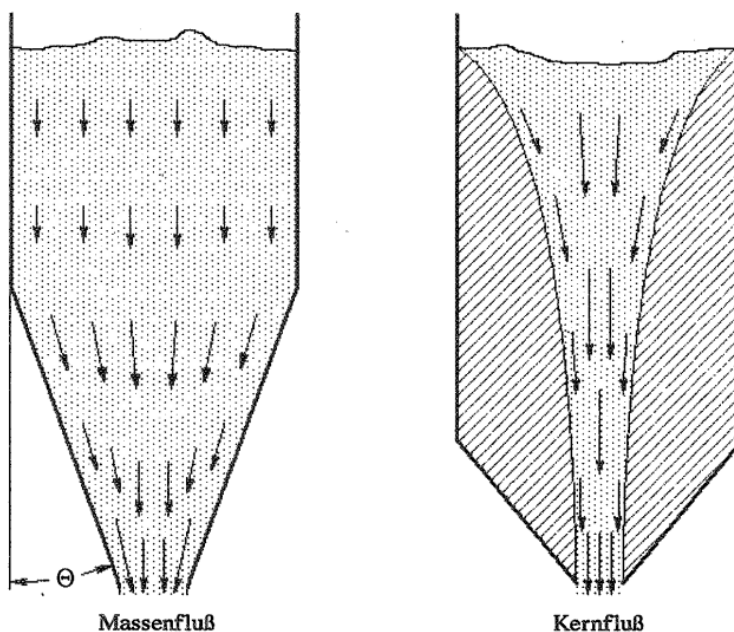


Abbildung 48: Flusstypen

In Kapitel 4.4 wird ein Bunker bzw. Silo mit Massenfluss auf Basis des bewährten Auslegungsverfahrens nach Jenike ausgelegt.

Das erarbeitete Rechenmodell in Kapitel 4 und auch die Ergebnisse in Kapitel 5 beziehen sich auf Scherversuche, die am Verfahrenstechnik Institut für industriellen Umweltschutz an der Montanuniversität Leoben durchgeführt wurden. Als Schüttgutmaterialien dienten dabei Birtreber und Stäube, die mit der Jenike Scherzelle am Institut untersucht wurden.

Erarbeitet wird auch ein Rechenprogramm (auf Basis von Microsoft Office Excel), in dem die ermittelten Messwerte aus den Versuchen per Hand eingegeben werden. Als Ergebnis erhält man die ausgewerteten Daten zur Auslegung eines Silos. Dabei werden etwaige Diagramme, die bei alten Auswertungsverfahren zur Ermittlung von Größen (per Hand)

gedient haben, durch mathematische Gleichungen ersetzt, so dass ein durchgehender, automatisierter Rechenvorgang per PC gewährleistet ist.

Zu Beginn wird aber die Jenike Scherzelle am Institut für Verfahrenstechnik des industriellen Umweltschutzes an der Montanuniversität Leoben näher vorgestellt.

## 4.1 Die Jenike Scherzelle am VTIU Institut

Der Abschnitt 4.1 wurde aus Literatur [5] entnommen.

Diese Scherzelle (Abbildung 49) besteht, wie eine Standard Scherzelle von Jenike auch, aus zwei gleich großen Ringen, die auf einer Platte übereinander gelegt und mit der Probe befüllt werden. Der untere Ring ist befestigt und der obere Ring ist gegenüber dem unteren horizontal verschiebbar. An der Schnittstelle (Scherebene) der beiden Ringe wirken auf die Probe im Inneren Normalspannungen  $\sigma_i$  und Schubspannungen  $\tau_i$ . Diese treten auf, da auf dem Deckel der Zelle die Normalkraft (Vertikallast)  $N$  aufgebracht wird und am oberen Ring die Scherkraft (Horizontalkraft)  $S$  wirkt.

In der Bodenplatte, auf der die Zelle montiert ist, befindet sich eine Vorrichtung zum Entfernen der Probe am Ende des Versuches. Am oberen Ring sind links und rechts Halterungen befestigt, die über ein Seil und entsprechende Umlenkrollen mit zwei Eimern verbunden sind. Diese beiden Eimer haben dieselbe Masse  $m_K$ , damit am Beginn des Versuches auf die Probe in der Zelle noch keine Scherkraft ausgeübt wird. Die linke Halterung stellt einen Pol des elektrischen Kontaktes her, über den die Wasserzufuhr in den rechten Eimer gesteuert wird. Der zweite Pol des elektrischen Kontaktes befindet sich am unteren Ring selbst. Beim Schließen des Kontaktes wird die Wasserzufuhr gestoppt. Die Zelle kann mit einem Deckel verschlossen werden, der mit Gewichten beschwert werden kann.



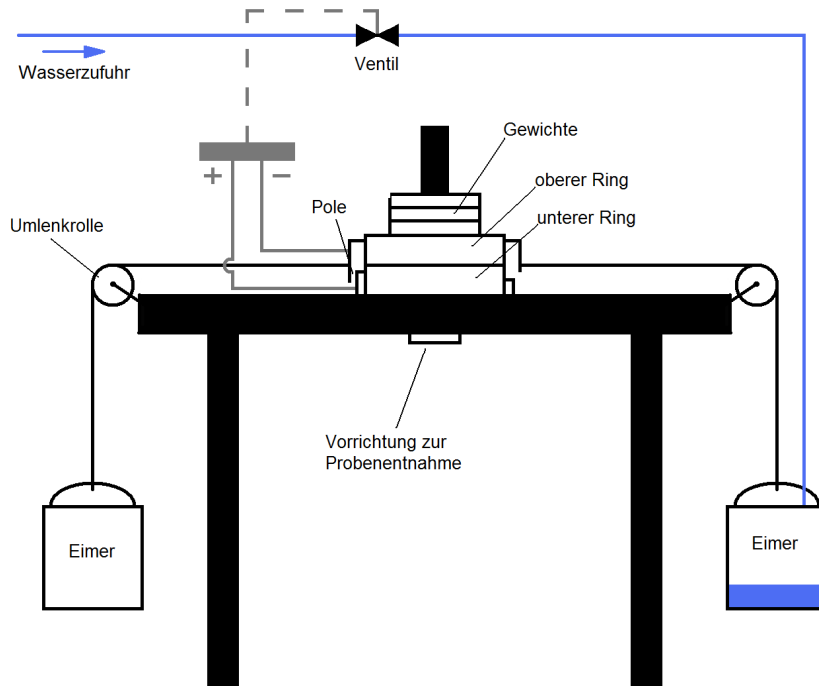


Abbildung 49: Skizze der Jenike Scherzelle am Verfahrenstechnik Institut für industriellen Umweltschutz an der Montanuniversität Leoben

Der **Versuchsablauf** mit dieser Scherzelle verläuft ähnlich dem unter Abschnitt 3.1.1 geschilderten Vorgang. Zunächst wird der obere Ring gegenüber dem unteren Ring um eine Wandstärke (bis zum Anschlag) nach links verschoben. Eine definierte Menge Probe  $m_P$  wird in die Scherzelle gefüllt und der Deckel wird auf die Schüttgutprobe gelegt. Danach wird die Zelle für jeden einzelnen Versuch mit denselben Gewichten (diese haben die Masse  $m_{an}$ ) beschwert. Da die Befüllung der Scherzelle ohne Füllring (siehe auch Abschnitt 3.1.1) und die Vorbereitung der Probe ohne Vorverdichtung erfolgen, ergibt sich ein Absinken der Schüttguthöhe  $h_S$  unter die Oberkante des oberen Ringes nach dem Anscheren. Das Schüttgutvolumen  $V_S$  entspricht nach dem Anscheren nicht dem Volumen der Scherzelle  $V_J$  (Volumen innerhalb der beiden Ringe).

Zwischen dem Pol am unteren Ring und die linke Halterung am oberen Ring steckt man nun einen Metallbolzen um das Anscheren durchführen zu können und für das nachfolgende Abscheren noch einen gewissen Spielraum (Luftspalt nach Entfernung des Metallbolzens) zu haben. Der obere Ring wird, damit zwischen dem oberen und unteren Ring keine Normalkräfte oder auch Scherkräfte wirken, leicht angehoben. Danach startet man das Anscheren, indem das Ventil freigegeben wird. Dadurch fließt Wasser in den rechten Eimer und dieses übt eine immer größer werdende Scherkraft  $S$  auf die Probe in der Zelle aus. Der obere Ring beginnt sich gegenüber dem unteren nach rechts zu verschieben, bis der Stromkreis über den Metallbolzen und den beiden Polen geschlossen und somit die Wasserzufuhr gestoppt wird. Der obere Ring liegt jetzt exakt über dem unteren Ring, was

durch eine entsprechende Breite des Metallbolzens (Abstand zwischen den beiden Polen bei dieser Stellung der Ringe) erreicht wird. Damit hat man bei einer vorgegebenen Vertikallast stationäres Fließen erreicht. Die Schüttgutdichte ist nun konstant und die Teilchen sind ausgerichtet. Die benötigte Wassermasse beim Anscheren  $m_{Wa,an}$ , aus der dann später die Schubspannung beim Anscheren  $\tau_{an}$  berechnet werden kann, wird zusammen mit der Masse des Kübels  $m_K$  ermittelt und der leere Kübel wird wieder an der Halterung befestigt. Zur Berechnung des Schüttgutvolumens  $V_S$  nach dem Anscheren muss auch die Höhendifferenz zwischen Oberkante des Deckels und Oberkante des oberen Ringes mit einem Tiefenmessschieber gemessen werden. An vier Punkten am Deckel wird diese Höhendifferenz gemessen und daraus ein arithmetischer Mittelwert (Einsacktiefe  $x$ ), welcher für die weiteren Berechnungen verwendet wird, gebildet.

Nach der Entfernung des Metallbolzens (elektrischer Kontakt ist somit wieder unterbrochen) und der Reduzierung der Masse auf dem Deckel (durch die Wegnahme von Gewichten bis die gewünschte Masse für den Abschervorgang eingestellt ist ( $m_{ab} < m_{an}$ )) kann das Abscheren beginnen. Das Ventil wird wieder geöffnet, wodurch die einfließende Wassermasse im rechten Eimer wieder eine immer größer werdende Scherkraft  $S$  auf die Probe in der Zelle ausübt. Der obere Ring wird gegenüber dem unteren Ring wieder so lange nach rechts verschoben, bis der elektrische Kontakt zwischen den beiden Polen wieder geschlossen und somit beginnendes Fließen erreicht ist. Der obere Ring ist nun gegenüber dem unteren um ca. eine Wandbreite nach rechts verschoben. Zur späteren Ermittlung der Schubspannung beim Abscheren wird wieder die Wassermasse im Kübel  $m_{Wa,ab}$  zusammen mit der Masse des Kübels  $m_K$  ermittelt.

Ein Abscheren mit vorangegangenem Anscheren ergibt einen Messpunkt eines Fließortes. Zur Ermittlung eines Fließortes ist es aber notwendig mehrere Messpunkte zu kennen, wobei bei den Anschervorgängen für einen Fließort immer dieselbe Vertikallast verwendet wird. Für die jeweils nachfolgenden Abschervorgänge werden unterschiedliche Vertikallasten verwendet. Üblicherweise werden vier Messpunkte zur Ermittlung eines Fließortes gemessen. Diese vier Messpunkte pro Fließort werden dann, um die Streuung der Messwerte auszugleichen, noch zweimal wiederholt, so dass jeder Messpunkt dreimal gemessen wird. In Summe werden so 12 Messungen pro Fließort durchgeführt. Für die Auslegung eines Bunkers werden üblicherweise drei Fließorte benötigt. Das Rechenprogramm zur Auslegung eines Silos ist für diese Anzahl der Messungen ausgelegt (3 Fließorte mit je 4 Messpunkten - Jeder Fließort wird 3mal gemessen).

Zur Ermittlung der **Wandreibung** (siehe auch Abschnitt 3.1.4) wird zwischen dem oberen und unteren Ring eine Platte aus dem jeweiligen Wandmaterial geschoben. Der obere Ring wird wieder gegenüber dem unteren um ca. eine Wandbreite nach links bis zum Anschlag verschoben. Nun erfolgt die Befüllung des oberen Ringes mit der Schüttgutprobe, die wie auch bei der Fließortmessung zuvor gewogen  $m_{P,W}$  wird. Der Deckel wird auf die Schüttgutprobe gelegt und mit Gewichten  $m_W$ , mit denen die gewünschte Vertikallast eingestellt wird, beschwert. Nachdem nun noch der obere Ring etwas angehoben wurde



(Wandmaterial und oberer Ring dürfen sich nicht berühren) kann der Schervorgang zur Ermittlung der Wandreibung gestartet werden. Das Ventil wird dabei geöffnet, wodurch wieder der obere Ring sich aufgrund der stärker werdenden Scherkraft nach rechts verschiebt, bis der geschlossene elektrische Kontakt die Wasserzufuhr stoppt. Die nun abwiegbare Wassermasse  $m_{Wa,W}$ , welche später zur Ermittlung der wirkenden Schubspannung bei dieser Messung der Wandreibung dient, wird zusammen mit der Masse des Kübels  $m_K$  ermittelt.

Nachdem so ein Messpunkt am Wandfließort ermittelt wurde, kann der obere Ring wieder nach links verschoben werden. Die Vertikallast wird verändert und der Messvorgang kann von neuem gestartet werden. Üblicherweise werden so 6 Messpunkte des Wandfließortes gemessen, wobei die Probe nicht jedesmal (wie bei der Fließortmessung) neu in die Scherzelle eingefüllt werden muss. Nach der Empfehlung im Abschnitt 3.1.4 sollte mit der größten Vertikallast begonnen werden. Danach wird die Vertikallast verringert, bis alle Messpunkte ermittelt sind. Auch sollte der Wandfließort wegen der Streuung der Messwerte dreimal gemessen werden.

In welcher Größenordnung die Vertikallast, eingestellt durch die Gewichte am Deckel, beim Anscheren, Abscheren und auch bei der Ermittlung der Wandreibung liegen sollte, ist aus dem Abschnitt 3.2 zu entnehmen.

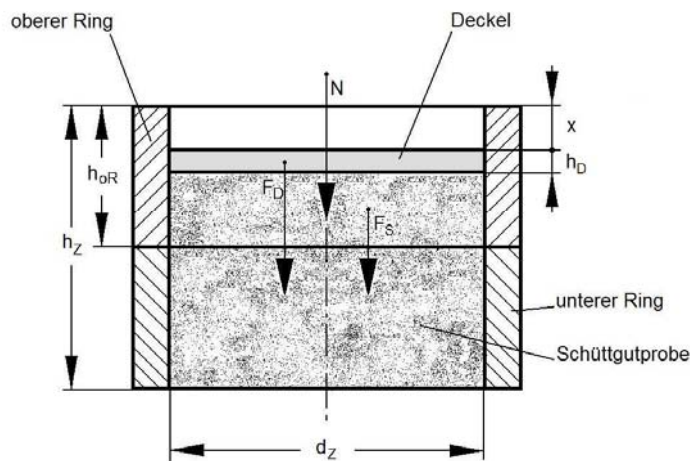


Abbildung 50: Abmessungen der Jenike Scherzelle am Verfahrenstechnik Institut für industriellen Umweltschutz an der Montanuniversität Leoben

Aus Abbildung 50 können folgende Daten ermittelt werden:

$h_z = 80,0$  [mm]      Höhe der Zelle

$d_z$	= 90,0 [mm]	Durchmesser der Zelle innen
$h_D$	= 5,1 [mm]	Höhe des Deckels
$h_{oR}$	= 40,0 [mm]	Höhe des oberen Ringes der Zelle

Weitere Kennzahlen der Jenike Scherzelle am Institut sind:

$m_D$	= 45,96 [g]	Masse des Deckels (durch abwiegen ermittelt)
$m_{oR}$	= 305,59 [g]	Masse des oberen Ringes (durch abwiegen ermittelt)
$m_K$	= 160,42 [g]	Masse des Kübels (durch abwiegen ermittelt)
$g$	= 9,81 [m/s <sup>2</sup> ]	Erdbeschleunigung

## 4.2 Normal- und Schubspannungen bei Scherversuchen

Der Abschnitt 4.2 wurde aus Literatur [5] und [15] entnommen.

Zu Beginn gilt es, die bei den Messungen auftretenden Normal- und Schubspannungen zu berechnen. Die Vorgehensweise kann dabei von Scherzelle zu Scherzelle (aufgrund verschiedener Bauweisen) unterschiedlich sein. Die hier angeführte Berechnung der auftretenden Normal- und Schubspannungen ist abgestimmt auf die Jenike Scherzelle am Verfahrenstechnik Institut für industriellen Umweltschutz an der Montanuniversität Leoben (Abbildung 49).

### 4.2.1 Normal- und Schubspannungen bei der Fließortmessung

Folgende Messdaten werden bei Versuchen mit der Jenike Scherzelle pro Messpunkt eines Fließortes ermittelt:

$m_P$ [g]	Masse der eingefüllten Probe
$x$ [mm]	Einsinktiefte des Deckels (Mittelwert aus 4 Messungen)
$m_{an}$ [g]	Masse der Gewichte auf dem Deckel beim Anscheren
$m_{Wa,an}$ [g]	Wassermasse im rechten Eimer beim Anscheren
$m_{ab}$ [g]	Masse der Gewichte auf dem Deckel beim Abscheren
$m_{Wa,ab}$ [g]	Wassermasse im rechten Eimer beim Abscheren

Weitere benötigte Kennzahlen sind:

$\rho_F$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Feststoffdichte (mittels Pyknometer bestimmt)
-------------------------------	---



Zu Beginn müssen einige Größen der Scherzelle bzw. der Probe berechnet werden:

$$h_s[m] = h_z[m] - x[m] - h_D[m] \quad (8)$$

$h_s$  [m]            Höhe der Schüttung einer Probe nach dem Anscheren

$$A_{Sch}[m^2] = \frac{d_z[m]^2}{4} * \Pi \quad (9)$$

$A_{Sch}$  [m<sup>2</sup>]            Scherfläche bzw. Querschnittfläche der Probe

$$V_s[m^3] = A_{Sch}[m^2] * h_s[m] \quad (10)$$

$V_s$  [m<sup>3</sup>]            Volumen der Schüttung einer Probe nach dem Anscheren

$$h_{Sü}[m] = h_{oR}[m] - x[m] - h_D[m] \quad (11)$$

$h_{Sü}$  [m]            Höhe der Schüttung einer Probe über der Scherebene im oberen Ring  
nach dem Anscheren

$$V_{Sü}[m^3] = A_{Sch}[m^2] * h_{Sü}[m] \quad (12)$$

$V_{Sü}$  [m<sup>3</sup>]            Volumen der Schüttung einer Probe über der Scherebene im oberen Ring  
nach dem Anscheren

$$\rho_s \left[ \frac{kg}{m^3} \right] = \frac{m_p[kg]}{V_s[m^3]} \quad (13)$$

$\rho_s$  [kg/m<sup>3</sup>]            Dichte der Schüttung einer Probe nach dem Anscheren

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_s \left[ \frac{kg}{m^3} \right]}{\rho_F \left[ \frac{kg}{m^3} \right]} \quad (14)$$

$\varepsilon$             Porosität der Schüttung einer Probe nach dem Anscheren

Aus sämtlichen Porositäten, die bei einem Fließort berechnet werden können, wird der arithmetische Mittelwert  $\varepsilon_{MW}$  und daraus das Intervall

$$\varepsilon_{MW} \pm \frac{\varepsilon_{MW}}{100} \quad (15)$$

gebildet. Ergebnisse von Proben, deren Porositäten außerhalb dieses Bereichs liegen, werden nicht berücksichtigt. Sie verletzen die Konstanz des Kurvenparameters  $\varepsilon = \varepsilon_{MW}$  zu sehr. Die entsprechenden Versuche sind zu wiederholen. Ist keine Feststoffdichte der Probe bekannt, kann in ähnlicher Form wie die Porosität auch die Schüttgutedichte Auskunft über die Eignung einer Messung geben.

Bei den übrigen Versuchen können nun die in der Schüttgutebene wirkenden Normal- und Schubspannungen beim Anscheren und Abscheren berechnet werden. Dabei müssen aber einige, wirkende Kräfte berücksichtigt werden.

Normal- und Schubspannungen beim Anscheren:

$$F_D[N] = m_D[kg] * g \left[ \frac{m}{s^2} \right] \quad (16)$$

$F_D$  [N]            Gewichtskraft des Deckels

$$F_{oR}[N] = m_{oR}[kg] * g \left[ \frac{m}{s^2} \right] \quad (17)$$

$F_{oR}$  [N]            Gewichtskraft des oberen Ringes

$$F_{Sü}[N] = V_{Sü}[m^3] * \rho_S \left[ \frac{kg}{m^3} \right] * g \left[ \frac{m}{s^2} \right] \quad (18)$$

$F_{Sü}$  [N]            Gewichtskraft der Schüttung einer Probe über der Scherebene im oberen Ring nach dem Anscheren

$$F_{N,an}[N] = m_{an}[kg] * g \left[ \frac{m}{s^2} \right] \quad (19)$$

$F_{N,an}$  [N]            Normalkraft durch die Gewichte beim Anscheren

$$F_{N,ges,an}[N] = F_D[N] + F_{oR}[N] + F_{Sü}[N] + F_{N,an}[N] \quad (20)$$

$F_{N,ges,an}$  [N]            Gesamte Normalkraft in der Scherebene beim Anscheren

$$F_{Sch,an}[N] = m_{Wa,an}[kg] * g \left[ \frac{m}{s^2} \right] \quad (21)$$

$F_{Sch,an}$  [N]            Scherkraft in der Scherebene beim Anscheren

$$\sigma_{an} \left[ \frac{N}{m^2} \text{ bzw. } Pa \right] = \frac{F_{N,ges,an}[N]}{A_{Sch}[m^2]} \quad (22)$$

$\sigma_{an}$  [Pa]            Normalspannung in der Scherebene beim Anscheren

$$\tau_{an} \left[ \frac{N}{m^2} \text{ bzw. } Pa \right] = \frac{F_{Sch,an}[N]}{A_{Sch}[m^2]} \quad (23)$$

$\tau_{an}$  [Pa]            Scherspannung in der Scherebene beim Anscheren



Normal- und Schubspannungen beim Abscheren:

$$F_{N,ab}[N] = m_{ab}[kg] * g \left[ \frac{m}{s^2} \right] \quad (24)$$

$F_{N,ab}$  [N]      Normalkraft durch die Gewichte beim Abscheren

$$F_{N,ges,ab}[N] = F_D[N] + F_{oR}[N] + F_{Sü}[N] + F_{N,ab}[N] \quad (25)$$

$F_{N,ges,ab}$  [N]      Gesamte Normalkraft in der Scherebene beim Abscheren

$$F_{Sch,ab}[N] = m_{Wa,ab}[kg] * g \left[ \frac{m}{s^2} \right] \quad (26)$$

$F_{Sch,ab}$  [N]      Scherkraft in der Scherebene beim Abscheren

$$\sigma_{ab} \left[ \frac{N}{m^2} \text{ bzw. } Pa \right] = \frac{F_{N,ges,ab}[N]}{A_{Sch}[m^2]} \quad (27)$$

$\sigma_{ab}$  [Pa]      Normalspannung in der Scherebene beim Abscheren

$$\tau_{ab} \left[ \frac{N}{m^2} \text{ bzw. } Pa \right] = \frac{F_{Sch,ab}[N]}{A_{Sch}[m^2]} \quad (28)$$

$\tau_{ab}$  [Pa]      Scherspannung in der Scherebene beim Abscheren

#### 4.2.2 Normal- und Schubspannungen bei der Wandfließortmessung

Folgende Messdaten werden bei den Versuchen mit der Jenike Scherzelle pro Messpunkt eines Wandfließortes ermittelt:

$m_{P,W}$  [g]      Masse der eingefüllten Probe für die Wandreibungsmessung  
(im oberen Ring über der Wandprobe)

$m_W$  [g]      Masse der Gewichte auf dem Deckel bei der Wandreibungsmessung

$m_{Wa,W}$  [g]      Wassermasse im rechten Eimer bei der Wandreibungsmessung

$$F_{Sü,W}[N] = m_{P,W}[kg] * g \left[ \frac{m}{s^2} \right] \quad (29)$$

$F_{Sü,W}$  [N]      Gewichtskraft der Schüttung einer Probe über der Scherebene im oberen Ring bei der Wandreibungsmessung



$$F_{N,W} [N] = m_w [kg] * g \left[ \frac{m}{s^2} \right] \quad (30)$$

$F_{N,W}$  [N]      Normalkraft durch die Gewichte bei der Wandreibungsmessung

$$F_{N,ges,W} [N] = F_D [N] + F_{oR} [N] + F_{Si,W} [N] + F_{N,W} [N] \quad (31)$$

$F_{N,ges,W}$  [N]      Gesamte Normalkraft in der Scherebene bei der Wandreibungsmessung

$$F_{Sch,W} [N] = m_{wa,w} [kg] * g \left[ \frac{m}{s^2} \right] \quad (32)$$

$F_{Sch,W}$  [N]      Scherkraft in der Scherebene bei der Wandreibungsmessung

$$\sigma_w \left[ \frac{N}{m^2} \text{ bzw. } Pa \right] = \frac{F_{N,ges,W} [N]}{A_{Sch} [m^2]} \quad (33)$$

$\sigma_w$  [Pa]      Normalspannung in der Scherebene bei der Wandreibungsmessung

$$\tau_w \left[ \frac{N}{m^2} \text{ bzw. } Pa \right] = \frac{F_{Sch,W} [N]}{A_{Sch} [m^2]} \quad (34)$$

$\tau_w$  [Pa]      Scherspannung in der Scherebene bei der Wandreibungsmessung

### 4.3 Kennzahlen zur Fließfähigkeit eines Schüttgutes

Der Abschnitt 4.3 wurde aus Literatur [5] und [24] entnommen.

Nachdem alle Normal- und Schubspannungen der Anscher- und Abschervorgänge, und auch jene der Wandreibungsmessungen errechnet wurden (auch auf [kPa] umgerechnet), können nun nachfolgend einige Größen als Schüttguteigenschaften gewonnen werden. Dazu werden die errechneten Wertepaare  $\sigma_{ab} / \tau_{ab}$  aus den Abschervorgängen für einen Fließort in ein  $\sigma, \tau$ -Diagramm ( $\sigma$ =Abszisse;  $\tau$ =Ordinate) eingetragen und verbunden (Abbildung 51). Der so entstehende, meist gekrümmte Fließort kann durch eine Gerade angenähert werden. Durch eine lineare Regression erhält man aus den Messpunkten ( $\sigma_{ab} / \tau_{ab}$ ) die Gleichung des individuellen Fließortes.

$$\tau = a * \sigma + \tau_c \quad (35)$$

Dabei ist  $a$  die Steigung des individuellen Fließortes und  $\tau_c$  der Schnittpunkt mit der Ordinate.

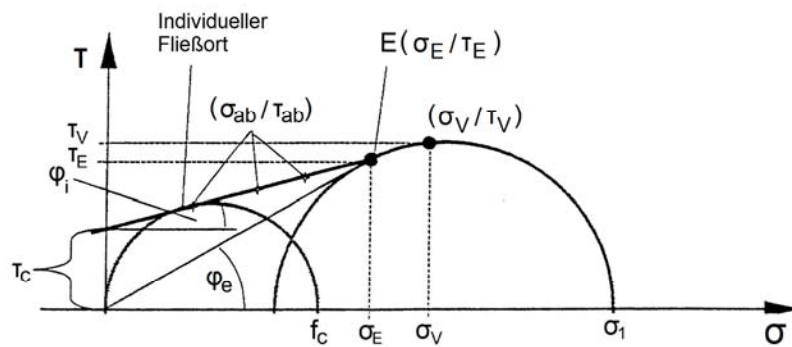


Abbildung 51: Wichtige Größen eines Fließortes &amp; Mohrsche Spannungskreise

Die beiden Größen  $\sigma_V$  und  $\tau_V$  (Messpunkt des Anschervorganges für einen Fließort) erhält man jeweils durch die Bildung des arithmetischen Mittelwertes aus den Normal- und Schubspannungswerten der Anschervorgänge für einen Fließort.

$\sigma_V$  Mittelwert der  $\sigma_{an}$ -Werte beim Anscheren

$\tau_V$  Mittelwert der  $\tau_{an}$ -Werte beim Anscheren

Auch die errechneten Normal- und Schubspannungen bezüglich des Versuches zur Wandreibung ( $\sigma_W$  und  $\tau_W$ ) werden in ein  $\sigma, \tau$ -Diagramm ( $\sigma$ =Abszisse;  $\tau$ =Ordinate) eingetragen. Durch lineare Regression erhält man nun ebenfalls eine Gerade mit der Gleichung:

$$\tau = k * \sigma + d \quad (36)$$

Mit den nun bereits ermittelten Werten können nun weitere wichtige Größen gewonnen werden:

$$\varphi_i = \arctan(a) \quad (37)$$

$\varphi_i$  [°] Innerer Reibungswinkel

$$f_c = 2 * \tau_c * \tan\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi_i}{2}\right) \quad (38)$$

$f_c$  bzw.  $\sigma_c$  [kPa] Einachsige Druckfestigkeit

Dabei gilt:  $\pi=180$  (Bogenmaß)

$$\sigma_M = [\sigma_V * (1 + a^2) + a * \tau_C] - \sqrt{[\sigma_V * (1 + a^2) + a * \tau_C]^2 - [(\sigma_V^2 + \tau_V^2) * (1 + a^2) - \tau_C^2]} \quad (39)$$

$\sigma_M$  [kPa]            Mittelpunkt des End-Mohrkreises

$$\sigma_R = \frac{a}{\sqrt{1 + a^2}} * \left( \sigma_M + \frac{\tau_C}{a} \right) \quad (40)$$

$\sigma_R$  [kPa]            Radius des End-Mohrkreises

$$\sigma_{1,\max} = \sigma_M + \sigma_R \quad (41)$$

$\sigma_{1,\max}$  [kPa]        Größte Hauptnormalspannung beim Anscheren

$$\sigma_E = \frac{a}{1 + a^2} * \left( \frac{\sigma_M}{a} - \tau_C \right) \quad (42)$$

$$\tau_E = \tau_C + \frac{a}{1 + a^2} * (\sigma_M - a * \tau_C) \quad (43)$$

$\sigma_E$  und  $\tau_E$  [kPa]    Spannungen im Endpunkt des individuellen Fließortes

$$\varphi_e = \arcsin\left(\frac{\sigma_R}{\sigma_M}\right) = \arcsin\left(\frac{a}{\sqrt{1 + a^2}} * \left(1 + \frac{\tau_C}{a * \sigma_M}\right)\right) \quad (44)$$

$\varphi_e$  [°]                Effektiver Reibungswinkel

$$\varphi_w = \arctan(k) \quad (45)$$

$\varphi_w$  [°]                Wandreibungswinkel

Um das Fließverhalten eines Materials beurteilen zu können wird die größte Hauptnormalspannung durch die einachsige Druckfestigkeit dividiert und anhand Tabelle 1 eingeteilt.

$$ff_c = \frac{\sigma_{1,\max}}{f_c} \quad (46)$$

$ff_c$  [ ]                Fließfaktor des Schüttgutes



## 4.4 Bunker- bzw. Siloauslegung

Nachdem alle Kennzahlen der Fließorte sowie des Wandfließortes bekannt sind, kann ein Lagerbunker bzw. Silo ausgelegt werden. Dazu unterscheidet man zwischen Silos mit konischen Trichtern (runde Auslauföffnung bzw. rotationssymmetrischer Fließzustand) und keilförmigen Trichtern (quadratische oder rechteckige (längliche) Auslauföffnung bzw. ebener Fließzustand).

### 4.4.1 Ermittlung der Trichterwandneigungswinkel

Ob Massen- oder Kernfluss in einem Bunker vorliegt, hängt von folgenden Größen ab [24]:

- Wandreibungswinkel  $\varphi_w$
- Effektiver Reibungswinkel  $\varphi_e$
- Trichterwandneigungswinkel  $\theta$

Außerdem muss zwischen rotationssymmetrischen und ebenen Fließzustand unterschieden werden. Ebener Fließzustand herrscht in einem keilförmigen Bunkerauslauf dann, wenn die Einflüsse der Stirnwände vernachlässigbar sind, und das ist für  $L \geq 3 \cdot W$  der Fall ( $L \dots$  Länge der Auslauföffnung beim Bunker;  $W \dots$  Breite der Auslauföffnung beim Bunker). [24]

Für beide Fälle liegen von Jenike berechnete  $\varphi_w$ - $\theta$ -Diagramme mit  $\varphi_e$  als Parameter vor, die Grenzlinien zwischen Massen- und Kernfluss geben (Abbildung 52 und Abbildung 53). Damit lässt sich entweder ein nicht zu überschreitender Trichterwandneigungswinkel  $\theta_{\text{krit}}$  für Massenfluss festlegen, oder es kann für einen vorhandenen Bunkerauslauf vorhergesagt werden, welcher Flusstyp zu erwarten ist. [24]

In der Praxis sollte man bei konischen Trichtern einen Sicherheitsabstand von 2-3° zu dieser Grenzlinie halten, da es sonst zu einem unregelmäßigen zwischen Massenfluss und Kernfluss wechselnden Fließen kommen kann. Bei keilförmigen Trichtern ist dieser Sicherheitsabstand erfahrungsgemäß nicht erforderlich. [24], [25]

Auch muss bei den berechneten  $\varphi_e$ -Werten, die zwischen den  $\varphi_e$ -Werten der Linien in den Diagrammen liegen, interpoliert werden.

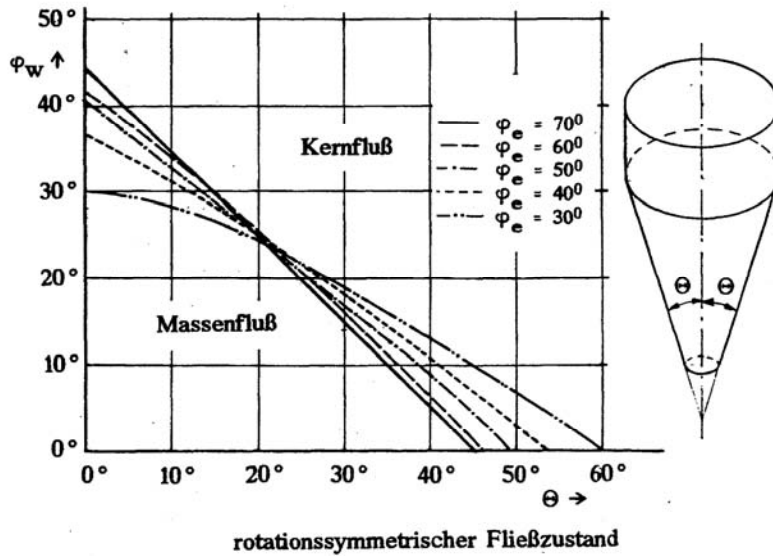


Abbildung 52: Grenzen Massenfluss/Kernfluss für konische Trichter

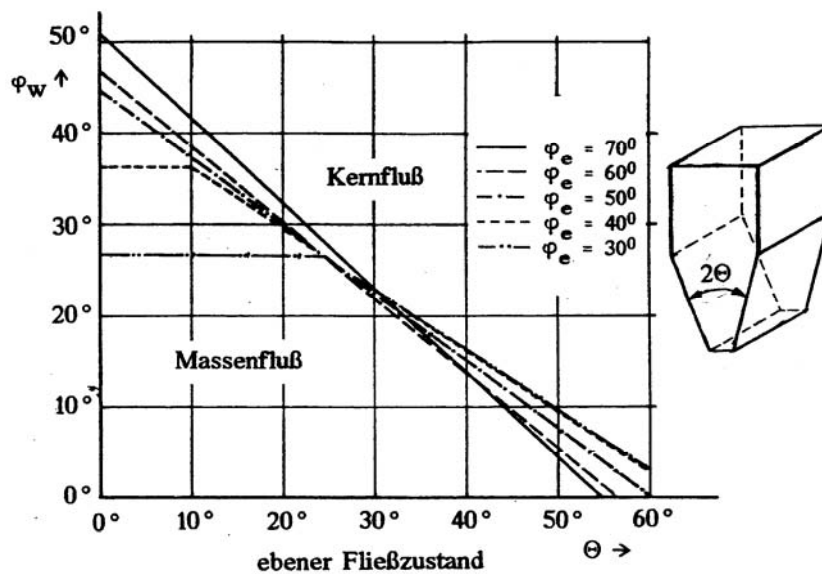


Abbildung 53: Grenzen Massenfluss/Kernfluss für keilförmige Trichter

Mit diesen Diagrammen wurde jahrelang gearbeitet, bis die Automatisierung der Auswertung mit Rechnern eine mathematische Erfassung der Grenzlinie Massenfluss und Kernfluss verlangte. [16]

Für konische Trichter gilt dabei die exakte Gleichung:

$$\theta_{krit} = 0,5 * \left[ 180 - \cos^{-1} \left( \frac{1 - \sin(\varphi_e)}{2 * \sin(\varphi_e)} \right) - \left( \varphi_w + \sin^{-1} \left( \frac{\sin(\varphi_w)}{\sin(\varphi_e)} \right) \right) \right] \quad (47)$$

Bei keilförmigen Trichtern gilt eine Näherungsgleichung an das Jenike Diagramm:

$$\theta_{krit} = \frac{e^{3,75 * (1,01)^{(\varphi_e - 30)/10}} - \varphi_W}{0,725 * (\tan(\varphi_e))^{0,2}} \quad (48)$$

mit den Bedingungen  $\varphi_W < \varphi_e - 3^\circ$  und  $\theta_{krit} \leq 60^\circ$ .

Alle Winkel werden dabei in Altgrad (DEG) eingesetzt.

#### 4.4.2 Kritische Größen der Auslauföffnungen bei Bunker

Damit das Fließen nicht durch Verstopfung wegen einer zu engen Auslauföffnung verhindert wird, darf sich im Auslauftrichter keine stabile Gutbrücke bilden (siehe auch: Abbildung 54). Bei grobkörnigem, freifließendem Gut kann eine solche Brücke durch Verkeilen einzelner Körner entstehen, weshalb die Auslauföffnungen folgende Mindestwerte haben sollten [24]:

$$D > 10 * x_{max} \quad (49)$$

D Durchmesser bei kreisrunder Öffnung (rotationssymmetrisch)

$x_{max}$  Maximale Partikelkorngröße

$$B > 7 * x_{max} \quad (50)$$

B Öffnungsbreite bei ebenem Auslauf

Bei breiten Verteilungen und kugeligen Partikeln genügen kleinere Werte.

Wird feinkörniges, kohäsives Gut in einem Bunker gelagert, so neigt es umso mehr zur Brückenbildung, je höher es verdichtet und damit verfestigt wurde. Geht man von einem vereinfachten Modell einer stabilen Gutbrücke mit konstanter Höhe und Belastung nur durch ihr Eigengewicht aus, so herrschen an den Brückenoberflächen oben und unten keine Spannungen. Dadurch liegt ebener und einachsiger Spannungszustand vor. Die Belastbarkeit der Brücke ist daher durch die Druckfestigkeit  $\sigma_c$  des Schüttgutes gegeben. Tatsächlich belastet wird das Schüttgut aber durch die Auflagerspannung  $\sigma'_1$ . Das Fließen, ohne dass eine Brücke gebildet wird, tritt demnach ein bei [24]:

$$\sigma'_1 \geq \sigma_c \quad (51)$$

Zur besseren Vorstellung betrachten wir die interessierenden Spannungsverläufe längs der Wand eines Silos. Sie sind in Abbildung 54 für den rotationssymmetrischen Fall qualitativ dargestellt. [24]

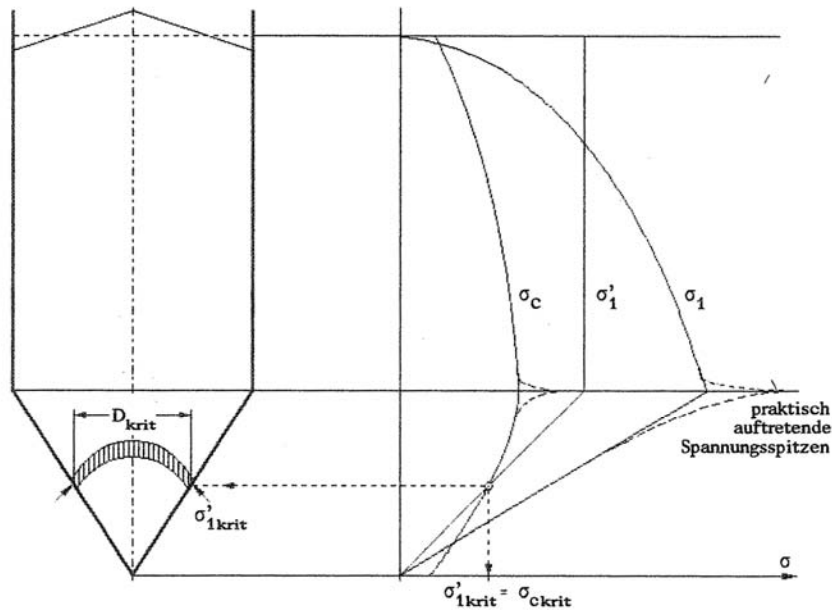


Abbildung 54: Spannungsverläufe in einem runden Silo zur Ableitung des bezüglich Brückenbildung kritischen Auslaufdurchmessers

Folgende Spannungsverläufe werden in Abbildung 54 dargestellt:

- $\sigma_1$  größte Druckspannung bei stationärem Fließen
- $\sigma_c$  die durch  $\sigma_1$  erzeugte Druckfestigkeit des Schüttguts.  
Sie ist von  $\sigma_1$  abhängig.
- $\sigma'_1$  Auflagerspannung der (evtl.) stabilen Brücke und damit Belastung des Schüttguts

$\sigma_1$  und  $\sigma_c$  steigen mit zunehmender Tiefe im Silo an, haben ihre Maximalwerte beim Übergang vom zylindrischen in den konischen Teil, und fallen zum Auslauf hin wieder ab. Im zylindrischen Teil ist  $\sigma'_1$  konstant, da im vereinfachten Modell die Brücke als nur unter ihrem Eigengewicht stehend angesehen wird. Im Trichterteil nimmt die Auflagerspannung proportional zur Breite bzw. zum Durchmesser ab. Nach der Gleichung (51) bildet sich nur dann keine stabile Brücke, und das Schüttgut fließt somit aus dem Silo aus, wenn  $\sigma'_1$  den



Wert von  $\sigma_c$  überschreitet. Der kritische Durchmesser oder auch die kritische Breite bei keilförmigen Trichtern liegen also beim Schnittpunkt dieser beiden Verläufe. [24]

Die kritischen Auslaufweiten für Massenflusssilos können in der Praxis nach folgenden Formeln berechnet werden [24]:

Für Bunker (Silos) mit konischem Trichter und runder Auslauföffnung:

$$D_{krit} [m] = H_r(\theta) * \frac{\sigma_{c,krit} [kPa] * 1000 [Pa / kPa]}{\rho_{S,krit} [kg / m^3] * g [m / s^2]} \quad (52)$$

$D_{krit}$                       Kritischer Durchmesser für runde Auslauföffnungen

Für Bunker (Silos) mit keilförmigem Trichter und quadratischer Auslauföffnung:

$$B_{krit} [m] = H_q(\theta) * \frac{\sigma_{c,krit} [kPa] * 1000 [Pa / kPa]}{\rho_{S,krit} [kg / m^3] * g [m / s^2]} \quad (53)$$

$B_{krit}$                       Kritische Breite für quadratische Auslauföffnungen

Für Bunker (Silos) mit keilförmigem Trichter und länglicher Auslauföffnung:

$$B_{krit} [m] = H_e(\theta) * \frac{\sigma_{c,krit} [kPa] * 1000 [Pa / kPa]}{\rho_{S,krit} [kg / m^3] * g [m / s^2]} \quad (54)$$

$B_{krit}$                       Kritische Breite für längliche Auslauföffnungen

Die Werte der Hilfsfunktionen  $H_r(\theta)$ ,  $H_q(\theta)$  und  $H_e(\theta)$  sind vom Trichterwandneigungswinkel abhängig und können aus einem Diagramm von Jenike (Abbildung 55) abgelesen werden [12]:

Bei Kernfluss kann im ebenen Fall  $H_e(\theta)=1,35$  und im rotationssymmetrischen Fall  $H_r(\theta)=2,2$  genommen werden. [24]

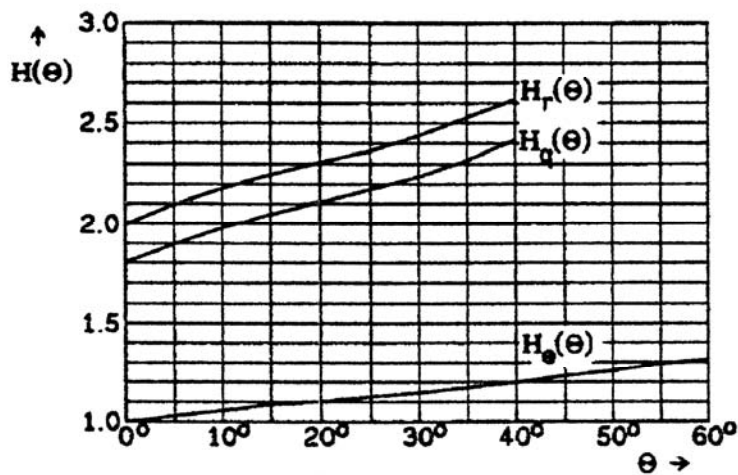


Abbildung 55: Hilfsfunktionen zur Berechnung der kritischen Auslaufweiten

Für die automatisierte Auswertung mittels Rechenprogramm sind diese Hilfsfunktionen  $H_r(\theta)$ ,  $H_q(\theta)$  und  $H_e(\theta)$  durch lineare Gleichungen der Form  $y=kx+d$  ersetzt, welche man durch lineare Regression der Hilfsfunktionen erhält:

$$H_r(\theta) = 0,014 * \theta + 2,022 \quad (55)$$

$$H_q(\theta) = 0,014 * \theta + 1,820 \quad (56)$$

$$H_e(\theta) = 0,005 * \theta + 0,998 \quad (57)$$

Zur Berechnung der kritischen Auslaufweiten (Gleichungen (52), (53) und (54)) werden noch die kritischen Werte  $\sigma_{c,krit} = \sigma'_{1,krit}$  und  $\rho_{S,krit}$  benötigt.  $\sigma_{c,krit} = \sigma'_{1,krit}$  kann aus dem Schnittpunkt der Kurve  $\sigma_c(\sigma_1)$  mit der Geraden  $\sigma'_1(\sigma_1)$ , die allerdings noch unbekannt ist, gewonnen werden. Jenike hat das Verhältnis  $\sigma_1/\sigma'_1$ , das vom effektiven Reibungswinkel  $\varphi_e$ , vom Wandreibungswinkel  $\varphi_w$  und vom Trichterwandneigungswinkel  $\theta$  abhängt, Fließfaktor  $ff$  genannt. [24]

$$ff = \frac{\sigma_1}{\sigma'_1} \quad (58)$$

Für die praktisch wichtigen Werte von  $\varphi_e$ ,  $\varphi_w$  und  $\theta$  hat Jenike die Fließfaktoren berechnet und in Diagrammen veröffentlicht [12]. Im Falle von Werten zwischen den angeführten

Kurven kann interpoliert werden. Aus Sicherheitsgründen empfiehlt es sich aber den größeren ff-Wert (Kurve mit dem größeren ff-Wert) zu nehmen. All diese veröffentlichten Diagramme für konische und keilförmige Trichter, aus denen ff abgelesen werden kann, sind im Anhang angeführt.

Der Fließfaktor ff nach Jenike kann aber auch durch nachfolgende Näherungsformeln bestimmt werden [16]:

Für konische Trichter gilt dabei:

$$ff = 1,76 * \left( \frac{31,3}{\varphi_e} \right)^{0,4675 + 0,53 * e^{-(\varphi_e - 31,3) / 10,7}} * \left( \frac{22,7}{\varphi_W} \right)^{0,06 * (0,7 + 0,07 * \varphi_W)} \quad (59)$$

mit der Einschränkung:  $\varphi_W > 3^\circ$ .

Bei keilförmigen Trichtern verwendet man:

$$ff = 1,2 * \left( \frac{54}{\varphi_e + 0,75 * D * e^{-D/D_m}} \right)^{0,48 + 0,42 * e^{-(\varphi_e - 32,5) / 12,75}} \quad (60)$$

wobei:

$$D = \varphi_{W,\max}(\varphi_e) - \varphi_W \quad (61)$$

$$D_m = \varphi_{W,\max}(\varphi_e) - \varphi_W^*(\varphi_e) \quad (62)$$

mit:

$$\varphi_{W,\max} = -3^\circ + \varphi_e \quad (63)$$

und

$$\varphi_W^* = 5,98^\circ + 0,56 * \varphi_e \quad (64)$$

wenn:  $\varphi_e < 48,5^\circ$ , und

$$\varphi_{W,\max} = 37,25^\circ + 0,175 * \varphi_e \quad (65)$$

und

$$\varphi_W^* = 22,03^\circ + 0,233 * \varphi_e \quad (66)$$

wenn:  $\varphi_e > 48,5^\circ$ .



$D$ ,  $D_m$ ,  $\varphi_{W,\max}$  und  $\varphi^*_W$  sind dabei Hilfsgrößen und die Gleichung (60) ist nur zulässig wenn gilt:  $\varphi_W < \varphi_{W,\max}$ .

Werden nun die Kurve  $\sigma_c(\sigma_1)$  und die Gerade  $\sigma'_1 = (1/ff) \cdot \sigma_1$  gemeinsam aufgetragen, so lässt sich leicht im Schnittpunkt der kritische Wert  $\sigma_{c,krit} = \sigma'_{1,krit}$  entnehmen. Danach kann aus der Kurve  $\rho_S(\sigma_1)$  bei  $\sigma_{1,krit}$  die kritische Schüttgutdichte  $\rho_{S,krit}$  abgelesen werden. [24]

Mathematisch bzw. per Rechner können die kritischen Werte ermittelt werden, indem man die Kurven  $\sigma_c(\sigma_1)$  und  $\rho_S(\sigma_1)$  jeweils durch eine quadratische Gleichung der Form  $y = ax^2 + bx + c$  beschreibt. Eine andere Möglichkeit wäre die Beschreibung durch lineare Gleichungen der Form:  $y = kx + d$ , wenn die Kurven annähernd eine Gerade darstellen.

Die Ermittlung dieser kritischen Werte sollte mit größter Sorgfalt erfolgen. Geringe Abweichungen führen meist zu großen Veränderungen bei der Größe der Auslauföffnung (nachfolgend berechnet durch Gleichung: (52), (53) und (54)).

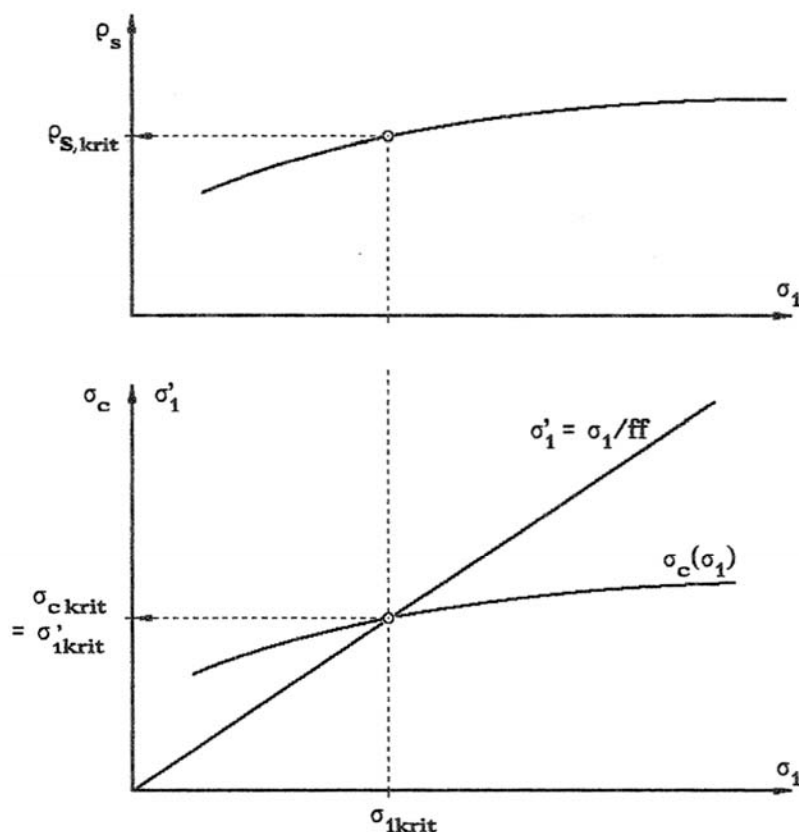


Abbildung 56: Ermittlung von  $\sigma'_{1,krit} = \sigma_{c,krit}$  und  $\rho_{S,krit}$

## 5 Ergebnisse / Diskussion

Nachdem nun das Rechenmodell und das Rechenprogramm zur Bunker- und Siloauslegung erarbeitet sind, werden hier noch einige Ergebnisse von Auslegungsberechnungen angeführt. Zehn Schüttgüter (sechs Birtrebern und vier Stäube) wurden dabei mit der Jenike Scherzelle am Institut für Verfahrenstechnik des industriellen Umweltschutzes untersucht. Für alle Schüttgüter wurden Bunker bzw. Silos nach dem altbewährten Auslegungsverfahren nach Jenike (per Hand) und parallel dazu mittels neuem Rechenprogramm ausgelegt. Diese berechneten Auslaufgrößen, sowie auch die ermittelten Trichterwandneigungswinkel werden für Bunker mit konischen Trichtern und runder Auslauföffnung und für Bunker mit keilförmigen Trichtern und quadratischer Auslauföffnung in Tabelle 8 und Tabelle 9 angeführt. Die Abweichungen der Ergebnisse des Rechenprogramms von der altbewährten Methode sind ebenso dargestellt wie einige dazu interessante, statistische Größen:

Tabelle 8: Ergebnisse der Bunker- und Siloauslegung bei konischen Trichtern

Konische Trichter						
Probe	Handauswertung nach Jenike		Neues Rechenprogramm		Abweichungen	
	$\theta$	$D_{krit}$	$\theta$	$D_{krit}$	$\theta$	$D_{krit}$
	[°]	[mm]	[°]	[mm]	[°]	[%]
Treber 1	18,03	1158,78	19,35	1152,80	1,32	-0,52
Treber 2	7,74	1460,79	6,96	1443,20	-0,78	-1,20
Treber 3	10,87	431,68	11,59	437,00	0,72	1,23
Treber 4	10,31	682,71	9,56	677,50	-0,75	-0,76
Treber 5	6,13	1328,99	7,86	1322,90	1,73	-0,46
Treber 6	12,85	1544,21	14,37	1605,20	1,52	3,95
Staub 1	7,50	1293,35	8,13	1333,40	0,63	3,10
Staub 2	8,08	339,81	9,15	332,40	1,07	-2,18
Staub 3	5,60	488,03	6,14	489,40	0,54	0,28
Staub 4	8,20	2212,03	7,93	2111,70	-0,27	-4,54
Arithmetischer Mittelwert der Abweichungen: Rechenprogramm von Handauswertung:					0,573	-0,110
Mittlere Abweichung vom arithmetischen Mittelwert der Abweichungen:					0,710	1,800
Standardabweichung vom arithmetischen Mittelwert der Abweichungen:					0,904	2,461
Varianz der Abweichungen:					0,818	6,056

Tabelle 9: Ergebnisse der Bunker- und Siloauslegung bei keilförmigen Trichtern

Keilförmige Trichter						
Probe	Handauswertung nach Jenike		Neues Rechenprogramm		Abweichungen	
	$\theta$	$B_{krit}$	$\theta$	$B_{krit}$	$\theta$	$B_{krit}$
	[°]	[mm]	[°]	[mm]	[°]	[%]
Treber 1	27,93	1101,46	30,00	1092,30	2,07	-0,83
Treber 2	17,37	1333,69	16,90	1281,10	-0,47	-3,94
Treber 3	22,23	418,12	22,49	419,50	0,26	0,33
Treber 4	20,43	659,77	20,43	657,00	0,00	-0,42
Treber 5	16,43	1297,65	18,42	1260,80	1,99	-2,84
Treber 6	22,47	1251,65	24,76	1231,50	2,29	-1,61
Staub 1	16,23	788,94	17,98	727,90	1,75	-7,74
Staub 2	17,59	317,19	19,30	313,80	1,71	-1,07
Staub 3	15,24	476,41	16,65	476,60	1,41	0,04
Staub 4	17,57	1622,08	17,88	1494,30	0,31	-7,88
Arithmetischer Mittelwert der Abweichungen: Rechenprogramm von Handauswertung:					1,132	-2,596
Mittlere Abweichung vom arithmetischen Mittelwert der Abweichungen:					0,886	2,403
Standardabweichung vom arithmetischen Mittelwert der Abweichungen:					1,002	3,034
Varianz der Abweichungen:					1,004	9,207

Der arithmetische Mittelwert der Abweichungen aller zehn Schüttgüter beim Trichterwandneigungswinkel beträgt bei konischen Trichtern nur  $0,573^\circ$  und bei keilförmigen Trichtern  $1,132^\circ$ . Da auch  $3^\circ$  zur Sicherheit bei der Berechnung berücksichtigt wurden liegt dies durchaus in einem vertretbaren Rahmen. Die Abweichung der Größe der Auslauföffnung ( $D_{krit}$  und  $B_{krit}$ ) wird für jedes Schüttgut in % angegeben. Der arithmetische Mittelwert der Abweichungen aller zehn Schüttgüter liegt bei  $-0,110\%$  und  $-2,596\%$ . Hier ist aber noch hinzuzufügen, dass es zu großen Abweichungen durch das Ablesen des Schnittpunktes der Geraden  $\sigma'_1 = (1/ff) \cdot \sigma_1$  (diese kennzeichnet die tatsächliche Belastung im Bunker) mit der Kurve  $\sigma_c(\sigma_1)$  (Fließfunktion – diese repräsentiert die mögliche Belastung des Schüttgutes) kommen kann (siehe auch: Abbildung 56). Diese Ermittlung dieses Schnittpunktes sollte deshalb mit größter Sorgfalt erfolgen.

## 6 Zusammenfassung

Neben der Ermittlung der theoretischen Grundlagen zu Schüttgütern und den Eigenschaften von Schüttgütern, im Speziellen auch den Fließeigenschaften von Schüttgütern, konnte auch näher auf die Schergeräte selbst eingegangen werden. Das Jenike Schergerät und das Ringschergerät sind dabei die am geeignetsten Kandidaten zur Ermittlung von Schüttguteigenschaften. Besonders wenn es um die Ermittlung von Fließeigenschaften von Schüttgütern geht, auf die aufbauend auch eine Silo- und Bunkerauslegung durchgeführt werden kann, haben sich diese beiden Schergeräte als besonders geeignet erwiesen. Das Jenike Schergerät ist dabei immer noch das Standardschergerät für solche Einsätze. Das Ringschergerät hat gegenüber dem Jenike Schergerät aber die Vorteile des geringeren Zeit- und Arbeitsaufwandes, der einfacheren Handhabung und der Möglichkeit zur Automatisierung. Durch einen unbegrenzten Scherweg gewährleistet es einen immer gleichbleibenden Verfestigungszustand des Schüttgutes nach dem Anscheren und kann auch für schwer messbare Schüttgüter (elastische, stark plastisch verformbare und grobkörnige Schüttgüter) eingesetzt werden. Der Vorteil des Jenike Schergerätes gegenüber dem Ringschergerät ist die gleichmäßige Verformung der Schüttgutprobe über den Querschnitt. Bei Ringschergeräten ist der Scherweg vom Durchmesser abhängig. Dies muss durch entsprechende Versuchsdurchführung und Schergerätgeometrie korrigiert werden. Auch bei der Ermittlung der Scherkraft ist eine Korrektur erforderlich. Ein weiterer Vorteil des Jenike Schergerätes gegenüber dem Ringschergerät ist der geringere apparative Aufwand bei der Messung der Wandreibung.

Beide Schergeräte eignen sich aber auch zum qualitativen Vergleich von Schüttgütern und zur Ermittlung des Verhaltens der Schüttgüter bei längerer Lagerungszeit. Außerdem wurde für beide Schergeräte die richtige Durchführung von Scherversuchen erarbeitet. Dabei wurde auch auf die speziellen Verhältnisse der Jenike Scherzelle am Institut für Verfahrenstechnik des Industriellen Umweltschutzes eingegangen.

Im Bereich der Bunker- und Siloauslegung konnte ein verbessertes Rechenmodell für die Jenike Scherzelle am Institut für Verfahrenstechnik des Industriellen Umweltschutzes erarbeitet werden. Aufbauend auf dieses Rechenmodell, welches auf den Auslegungsverfahren für Bunker und Silos nach Jenike beruht, wurde ein Rechenprogramm geschrieben. In dieses, auf Microsoft Office Excel beruhende, Rechenprogramm werden die Messwerte aus den Scherversuchen eingegeben. Anschließend erfolgt eine voll automatisierte Auslegung der Bunker und Silos für das jeweilige Schüttgut. Damit konnte eine Optimierung des Verfahrens zur Silo- und Bunkerauslegung erreicht werden.



## 7 Verzeichnisse

### 7.1 Literatur

- [1] ASTM International (American Society for testing and materials) (Hrsg.): Standard D6128-00 - Standard test method for shear testing of bulk solids using the Jenike Shear Cell. Online im WWW unter URL: <http://www.astm.org>. 1998
- [2] ASTM International (American Society for Testing and Materials) (Hrsg.): Standard D6773-02 - Standard shear test method for bulk solids using the Schulze ring shear tester. Online im WWW unter URL: <http://www.astm.org>.
- [3] Bell, T. A.; Ennis, B. J.; Grygo, R. J.; Scholten, W. J. F.; Schenkel, M. M.: Practical evaluation of the Johanson Hang-up Indicizer. In: Bulk Solids Handling. Vol. 14, Nr. 1. 1990. S. 117-125
- [4] Carr, J. F.; Walker D. M.: An annular shear cell for granular materials. In: Powder Technology. Vol. 1, Nr. 6. 1968. S. 369-373
- [5] Dobay, Franz M.: Stoffeigenschaften von Biertrebern – Lagerung von Biertrebern. Leoben: Montanuniversität Leoben, Institut für Verfahrenstechnik des industriellen Umweltschutzes, 2005. - Bakkalaureatsarbeit
- [6] Enstad, G. G.; Pitchumani, B.; Sharma, A.K.: A simplified procedure for flow property testing using the Jenike shear tester. In: Proc. "5<sup>th</sup> Intl. Conf. On Bulk Materials Storage, Handling and Transprtation". New-castle, Australien: 1995. S. 371-379
- [7] Haaker, G.; Schreuder, R.: Development of a constant volume translational shear tester. In: Proc. "Int. Conf. On Bulk Materials Handling and Transportation". Wollongong, Australien: 1992. S. 287-291
- [8] Haaker, G.; Wiesma-van Schendel, W. J. A.: A constant volume sheartester, development and experiences. In: Bulk Solids Handling. Vol. 13. 1993. S. 129-133
- [9] Hvorslev, Mikael Juul: Über die Festigkeitseigenschaften gestörter bindiger Böden. In: Ingeniørvidenskabelige Skrifter A. Nr. 45. Kopenhagen: Naturvidenskabelige Samfund, 1937
- [10] Institution of Chemical Engineers (IChemE), European Federation of Chemical Engineering (EFCE Working Party on the Mechanics of Particulate Solids) (Hrsg.): Standard Shear Testing Technique for particulate solids using the Jenike shear cell (SSTT). Rugby – Warwickshire - England: 1989. - ISBN 0-85295-232-5. Deutsche Übersetzung: Feise, Hermann. J. (Übs.): Standardmethode zur Charakterisierung von

- Schüttgütern mit dem Jenike Schergerät. Frankfurt a. M.: DECHEMA, 2005. - ISBN3-89746-058-02005
- [11] Jenike, Andrew W.: Gravity flow of bulk solids. Bulletin No. 108. Salt Lake City: University of Utah, 1961
- [12] Jenike, Andrew W.: Storage and flow of solids. Bulletin No. 123. Salt Lake City: University of Utah, 1964
- [13] Johanson, J. R.: Characterizing dry particulate solids for systems design. In: EFCHE Publ. (Hrsg.): Proc. Reliable flow of particulate solids II. Ser. No. 96. Oslo: 1993. S. 11-32
- [14] Johanson, J. R.: The Johanson Indicizer™ system vs. the Jenike shear tester. In: Bulk Solids Handling. Vol. 12, Nr. 2. 1992. S. 237-240
- [15] Kurz, H. P.: Messung von Schüttguteigenschaften am Schergerät nach Jenike. In: Kraußold, Hermann; Schlünder, Ernst U. (Hrsg.): Verfahrenstechnik. Vol. 10, Nr. 2. Mainz: Krausskopf, 1976. S. 68-72
- [16] McLean AG: Empirical critical flow factor equations. In: Wöhlbier, Reinhard H. (Hrsg.): Bulk Solids Handling. Vol. 6, Nr. 4. Clausthal-Zellerfeld: Trans Tech Publications, 1986. S. 779-782. - ISSN 0173-9980
- [17] Peschl, I. A. S. Z.: Bulk Handling Seminar. Pittsburgh: University of Pittsburgh, 1975
- [18] Peschl, I. A. S. Z.; Colijn, H.: New rotational shear testing technique. . In: Journ. Of Powder & Bulk Solids Technology. Vol. 1, Nr. 3. 1977. S. 55-60
- [19] Schulze, Dietmar: Fließeigenschaften von Schüttgütern und verfahrenstechnische Siloauslegung. Online im WWW unter URL: <http://www.dietmar-schulze.de>. Stand Oktober 2007.
- [20] Schulze, Dietmar: Informationen zum Ringschergerät RST-01.01. Online im WWW unter URL: <http://www.dietmar-schulze.de>. Stand Oktober 2007.
- [21] Schulze, Dietmar: Pulver und Schüttgüter - Fließeigenschaften und Handhabung. Berlin: Springer, 2006. -ISBN 3-540-34082-3
- [22] Schulze, Dietmar: Zur Fließfähigkeit von Schüttgütern - Definition und Messverfahren. In: Gesellschaft Deutscher Chemiker; DECHEMA Deutsche Gesellschaft für chemisches Apparatewesen; Chemische Technik und Biotechnologie GVC; VDI-

- Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen (Hrsg.): Chemie Ingenieur Technik. Vol. 67, Nr. 1. Weinheim: VCH, 1995. S. 60-68
- [23] Schwedes, Jörg; Schulze, Dietmar; Kwade, Arno; Heinrici, Harald: Lagern und Fließen von Schüttgütern. Braunschweig: Technische Universität Braunschweig, Institut für Mechanische Verfahrenstechnik, 1997 - 15. Hochschulkurs
- [24] Stieß, Matthias: Mechanische Verfahrenstechnik. Bd. 1, 2. Auflage. Berlin: Springer, 1995. - ISBN 3-540-59413-2
- [25] Ter Borg Lambertus: Einfluß des Wandmaterials auf das Auslaufverhalten von Schüttgütern aus Silos. In: Gesellschaft Deutscher Chemiker; DECHEMA Deutsche Gesellschaft für chemisches Apparatewesen; VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen (Hrsg.): Chemie Ingenieur Technik. Vol. 58, Nr. 7. Weinheim: Chemie, 1986. S. 588-590
- [26] Zentrum Geotechnik - Lehrstuhl und Prüfamnt für Grundbau, Bodenmechanik, Felsmechanik und Tunnelbau (Hrsg.): Scherfestigkeit. München: Technische Universität München, Zentrum Geotechnik - Lehrstuhl und Prüfamnt für Grundbau, Bodenmechanik, Felsmechanik und Tunnelbau, 2005 - Skriptum

## 7.2 Abkürzungsverzeichnis

°	Grad
$\Delta s$	Scherwegdifferenz
$\varepsilon$	Porosität der Schüttung einer Probe nach dem Anscheren
$\varepsilon_{MW}$	Arithmetischer Mittelwert der Porositäten nach dem Anscheren
$\theta$	Trichterwandneigungswinkel
$\theta_{krit}$	Nicht zu überschreitender Trichterwandneigungswinkel für Fließen im Bunker
$\mu m$	Mikrometer
$\pi$	Pi
$\rho_b$	Schüttgutdichte beim Fließen
$\rho_F$	Feststoffdichte - mittels Pyknometer bestimmt
$\rho_s$	Dichte der Schüttung einer Probe nach dem Anscheren bei der Jenike Scherzelle am VTU-Institut
$\rho_{S,krit}$	Kritische Schüttgutdichte
$\sigma$	Normalspannung



$\sigma'_1$	Auflagerspannung, Belastung des Schüttgutes im Bunker
$\sigma'_{1,krit}$	Kritische Auflagerspannung bzw. Belastung des Schüttgutes im Bunker
$\sigma_1$	Allgem. größte Hauptspannung; Verfestigungsspannung beim stationären Fließen, Vertikalspannung beim einachsigen Druckversuch
$\sigma_{1,krit}$	Kritische Verfestigungsspannung
$\sigma_{1,max}$	Größte Hauptnormalspannung beim Anscheren
$\sigma_{1,min}$	Verfestigungsspannung des Fließortes mit der kleinsten Verfestigungsspannung
$\sigma_2$	Allgem. kleinste Hauptspannung; Horizontalspannung beim einachsigen Druckversuch
$\sigma_{ab}$	Abschernormalspannung in der Scherebene
$\sigma_{ab,i}$	Abschernormalspannungen
$\sigma_{an}$	Anschernormalspannung in der Scherebene
$\sigma_c$	Schüttgutfestigkeit bzw. Druckfestigkeit
$\sigma_{c,krit}$	Kritische Schüttgutfestigkeit bzw. Druckfestigkeit im Bunker
$\sigma_E$	Normalspannung im Endpunkt des individuellen Fließortes
$\sigma_h$	Horizontalspannung beim Verfestigen
$\sigma_i$	Normalspannungen
$\sigma_M$	Mittelpunkt des End-Mohrkreises
$\sigma_R$	Radius des End-Mohrkreises
$\sigma_t$	Einachsige Zugfestigkeit
$\sigma_v$	Arithmetischer Mittelwert aus den Normalspannungen der Anschervorgänge
$\sigma_w$	Wandnormalspannung in der Scherebene
$\sigma_{w,1}$	Größte Wandnormalspannung eines Wandfließortes
$T$	Schubspannung
$T_{ab}$	Abscherschubspannung bei beginnendem Fließen in der Scherebene
$T_{an}$	Anscherschubspannung bei stationärem Fließen in der Scherebene
$T_c$	Kohäsion (Schnittpunkt des Fließortes mit der Ordinate)
$T_E$	Schubspannung im Endpunkt des individuellen Fließortes
$T_i$	Schubspannungen
$T_v$	Arithmetischer Mittelwert aus den Schubspannungen der Anschervorgänge
$T_w$	Wandschubspannung in der Scherebene
$\varphi^*_w$	Hilfsgröße zur Auslegung von Bunker mit keilförmigen Trichtern
$\varphi_e$	Effektiver Reibungswinkel
$\varphi_i$	Innerer Reibungswinkel beim beginnenden Fließen
$\varphi_{lin}$	Steigungswinkel des linearisierten Fließortes
$\varphi_{sf}$	Innerer Reibungswinkel beim stationären Fließen

$\varphi_t$	Innere Reibungswinkel bei beginnendem Fließen nach einer bestimmten Lagerzeit
$\varphi_w$	Wandreibungswinkel
$\varphi_{w,max}$	Hilfsgröße zur Auslegung von Bunker mit keilförmigen Trichtern
$\omega$	Winkelgeschwindigkeit
a	Steigung des individuellen Fließortes
a	Koeffizient des quadratischen Gliedes einer quadratischen Gleichung
A	Querschnittsfläche allgem.
$A_J$	Querschnittsfläche bei einer Jenike Scherzelle
allgem.	allgemein
$A_R$	Querschnittsfläche des Schüttgutringes bei einer Ringscherzelle
$A_{Sch}$	Scherfläche bzw. Querschnittsfläche der Probe bei der Jenike Scherzelle am VTU-Institut
b	Koeffizient des linearen Gliedes einer quadratischen Gleichung
B	Berührungspunkt des Fließortes mit dem Spannungskreis für die Druckfestigkeit $\sigma_c$ (Punkt B)
B	Breite der Auslauföffnung bei Bunker
$B_{krit}$	Kritische (kleinste) Breite für quadratische oder längliche Auslauföffnungen bei Bunker
Bsp.	Beispiel, Beispiele
bzgl.	bezüglich
bzw.	beziehungsweise
c	Konstantes Glied (Absolutglied) einer quadratischen Gleichung
ca.	circa
$cm^2$	Quadratcentimeter
$cm^3$	Kubikcentimeter
d	Ordinatenwert des Schnittpunktes einer Geraden mit der Ordinate
D	Durchmesser bei kreisrunder Auslauföffnung (rotationssymmetrisch) bei Bunker
D	Hilfsgröße zur Auslegung von Bunker mit keilförmigen Trichtern
d.h.	das heißt
$d_J$	Innendurchmesser einer Jenike Scherzelle (oberer und unterer Ring)
$D_{krit}$	Kritischer (kleinster) Durchmesser für runde Auslauföffnung bei Bunker
$D_m$	Hilfsgröße zur Auslegung von Bunker mit keilförmigen Trichtern
$D_{R,a}$	Durchmesser des äußeren Ringes bei einer Ringscherzelle (äußerer Durchmesser des Schüttgutringes)

$D_{R,i}$	Durchmesser des inneren Ringes bei einer Ringscherzelle (innerer Durchmesser des Schüttgutrings)
$d_z$	Innerer Durchmesser der Jenike Scherzelle am VTIU-Institut
E	Endpunkt
etc.	et cetera
EV	Einachsige Verdichtung
$F_1$	Die in einer Zugstange wirkende Kraft bei einem Ringschergerät
$F_2$	Die in einer Zugstange wirkende Kraft bei einem Ringschergerät
$F_A$	Vertikal wirkende Ausgleichskraft bei einem Ringschergerät
$f_c$	Schüttgutfestigkeit oder Druckfestigkeit
ff	Fließfaktor bei Bunker (nach Jenike)
$ff_c$	Fließfähigkeit, Fließfaktor eines Schüttgutes
$F_D$	Gewichtskraft des Deckels bei der Jenike Scherzelle am VTIU-Institut
$F_{N,ab}$	Normalkraft durch die Gewichte beim Abscheren bei der Jenike Scherzelle am VTIU-Institut
$F_{N,an}$	Normalkraft durch die Gewichte beim Anscheren bei der Jenike Scherzelle am VTIU-Institut
$F_{N,ges,ab}$	Gesamte Normalkraft in der Scherebene beim Abscheren in der Jenike Scherzelle am VTIU-Institut
$F_{N,ges,an}$	Gesamte Normalkraft in der Scherebene beim Anscheren in der Jenike Scherzelle am VTIU-Institut
$F_{N,ges,W}$	Gesamte Normalkraft in der Scherebene bei der Wandreibungsmessung in der Jenike Scherzelle am VTIU-Institut
$F_{N,W}$	Normalkraft durch die Gewichte bei der Wandreibungsmessung bei der Jenike Scherzelle am VTIU-Institut
$F_{oR}$	Gewichtskraft des oberen Ringes bei der Jenike Scherzelle am VTIU-Institut
FR	Normalkraft, Resultierende Kraft
$F_{Sch,ab}$	Scherkraft in der Scherebene beim Abscheren in der Jenike Scherzelle am VTIU-Institut
$F_{Sch,an}$	Scherkraft in der Scherebene beim Anscheren in der Jenike Scherzelle am VTIU-Institut
$F_{Sch,W}$	Scherkraft in der Scherebene bei der Wandreibungsmessung in der Jenike Scherzelle am VTIU-Institut
$F_{Sü}$	Gewichtskraft der Schüttung einer Probe über der Scherebene im oberen Ring nach dem Anscheren in der Jenike Scherzelle am VTIU-Institut
$F_{Sü,W}$	Gewichtskraft der Schüttung einer Probe über der Scherebene im oberen Ring bei der Wandreibungsmessung in der Jenike Scherzelle am VTIU-Institut
g	Gramm

$g$	Erdbeschleunigung
$H(\theta)$	Hilfsfunktion zur Auslegung von Bunker und Silos
$H_e(\theta)$	Hilfsfunktion für Bunker mit länglicher Auslauföffnung
$H_q(\theta)$	Hilfsfunktion für Bunker mit quadratischer Auslauföffnung
$H_r(\theta)$	Hilfsfunktion für Bunker mit runder Auslauföffnung
$h_D$	Höhe des Deckels bei der Jenike Scherzelle am VTU-Institut
$h_J$	Gesamthöhe des oberen & unteren Ringes bei einer Jenike Scherzelle (gesamte Schüttguthöhe in der Scherzelle)
$h_{J,o}$	Höhe des oberen Ringes bei einer Jenike Scherzelle (Schüttguthöhe über der Scherebene)
$h_{J,u}$	Höhe des unteren Ringes bei einer Jenike Scherzelle (Schüttguthöhe unter der Scherebene)
$h_{oR}$	Höhe des oberen Ringes bei der Jenike Scherzelle am VTU-Institut
$h_R$	Höhe des Bodenringes (im Inneren) bei einer Ringscherzelle ( $\neq$ Schüttguthöhe nach dem Anscheren)
$h_S$	Schüttguthöhe der Probe in der Jenike Scherzelle am VTU-Institut nach dem Anscheren
$h_{Sü}$	Höhe der Schüttung der Probe über der Scherebene im oberen Ring nach dem Anscheren in der Jenike Scherzelle am VTU-Institut
$h_Z$	Höhe der beiden Ringe der Jenike Scherzelle am VTU-Institut
i.a.	Im Allgemeinen
inkl.	inklusive
$k$	Multiplikationsfaktor
$k$	Steigung einer Geraden
kg	Kilogramm
kPa	Kilopascal
L	Länge der Auslauföffnung bei Bunker
m	Meter
M	Drehmoment
$m^2$	Quadratmeter
$m^3$	Kubikmeter
$m_{ab}$	Masse der Gewichte bei der Jenike Scherzelle am VTU-Institut mit der die Probe beschwert wird beim Abscheren
$m_{an}$	Masse der Gewichte bei der Jenike Scherzelle am VTU-Institut mit der die Probe beschwert wird beim Anscheren
max.	maximal
$m_D$	Masse des Deckels der Jenike Scherzelle am VTU-Institut
min	Minute
min.	mindestens
$m_K$	Masse eines Kübels bei der Jenike Scherzelle am VTU-Institut



mm	Millimeter
$m_{oR}$	Masse des oberen Ringes der Jenike Scherzelle am VTIU-Institut
$m_P$	Definierte Menge Probe zur Ermittlung des Fließortes mit der Jenike Scherzelle am VTIU-Institut
$m_{P,W}$	Definierte Menge Probe zur Ermittlung des Wandfließortes mit der Jenike Scherzelle am VTIU-Institut
$m_W$	Masse der Gewichte bei der Jenike Scherzelle am VTIU-Institut mit der die Probe beschwert wird bei der Wandfließortmessung
$m_{Wa,ab}$	Wassermasse beim Abscheren bei der Jenike Scherzelle am VTIU-Institut
$m_{Wa,an}$	Wassermasse beim Anscheren bei der Jenike Scherzelle am VTIU-Institut
$m_{Wa,W}$	Wassermasse bei der Messung des Wandfließortes mit der Jenike Scherzelle am VTIU-Institut
N	Newton
N	Normalkraft (Vertikallast)
Pa	Pascal
s	Sekunde
s	Scherweg
S	Scherkraft (Horizontalkraft)
SF	Stationäres Fließen
sog.	sogenannter, sogenannte, sogenanntes
$s_R$	Scherweg bei einer Ringscherzelle
t	Zeit
u.a.	unter anderem
usw.	und so weiter
v	Schergeschwindigkeit allgem.
V	Volumen allgem.
$V_J$	Gesamtvolumen in einer Jenike Scherzelle (gesamtes Schüttgutvolumen)
$V_{J,o}$	Volumen im oberen Ring bei einer Jenike Scherzelle (Schüttgutvolumen über der Scherebene)
$V_{J,u}$	Volumen im unteren Ring bei einer Jenike Scherzelle (Schüttgutvolumen unter der Scherebene)
$v_R$	Schergeschwindigkeit bei einer Ringscherzelle
$V_R$	Volumen bei einer Ringscherzelle ( $\neq$ Schüttgutvolumen nach dem Anscheren)
$V_S$	Schüttgutvolumen der Probe nach dem Anscheren bei der Jenike Scherzelle am VTIU-Institut
$V_{Sü}$	Volumen der Schüttung der Probe über der Scherebene im oberen Ring nach dem Anscheren bei der Jenike Scherzelle am VTIU-Institut
VTIU	Verfahrenstechnik des Industriellen Umweltschutzes
W	Weite bzw. Breite der Auslauföffnung bei Bunker

x	Bezeichnung der horizontalen Achse (Abszisse) eines Koordinatensystems
x	Einsacktiefe des Deckels nach dem Anscheren bzw. arithmetischer Mittelwert aus jeweils vier Messungen der Höhendifferenz zwischen Oberkante des oberen Ringes und Oberkante des Scherdeckels nach dem Anscheren bei der Jenike Scherzelle am VTU-Institut
$x_{\max}$	Maximale Partikelkorngröße
y	Bezeichnung der vertikalen Achse (Ordinate) eines Koordinatensystems
z.B.	zum Beispiel

### 7.3 Tabellen

Tabelle 1: Einteilung der Schüttgüter nach der Fließfähigkeit .....	12
Tabelle 2: Mögliche Standardabmessungen für Jenike Scherzellen .....	52
Tabelle 3: Standardabmessungen für eine Ringscherzellen .....	55
Tabelle 4: Beurteilung von Schergeräten hinsichtlich verschiedener Merkmale .....	58
Tabelle 5: Verfestigungsspannung $\sigma_1$ in Abhängigkeit von der Anwendung und der Schüttgutdichte $\rho_b$ (grobe Anhaltswerte zur Abschätzung der Verfestigungsspannung) 76	
Tabelle 6: Anhaltswerte zur Abschätzung der unteren Grenze für die Normalspannung beim Abscheren (Beispiele gelten grob für Anschernormalspannungen zwischen 2 bis 10 kPa) .....	79
Tabelle 7: Verfestigungsspannungen $\sigma_{1,\min}$ des Fließortes mit der kleinsten Verfestigungsspannung.....	82
Tabelle 8: Ergebnisse der Bunker- und Siloauslegung bei konischen Trichtern.....	103
Tabelle 9: Ergebnisse der Bunker- und Siloauslegung bei keilförmigen Trichtern.....	104

### 7.4 Abbildungen

Abbildung 1: Einfache Bauformen von Silos bzw. Bunkern.....	5
Abbildung 2: links: Brückenbildung, rechts: Schachtbildung .....	6
Abbildung 3: einachsiger Druckversuch.....	7
Abbildung 4: Schüttgutdichte $\rho_b$ und Druckfestigkeit $\sigma_c$ in Abhängigkeit von der Verfestigungsspannung $\sigma_1$ .....	8
Abbildung 5: Haftmechanismen zwischen Feststoffteilchen nach Rumpf und Schubert.....	9
Abbildung 6: Messung der Druckfestigkeit im $\sigma$ , $\tau$ -Diagramm .....	11

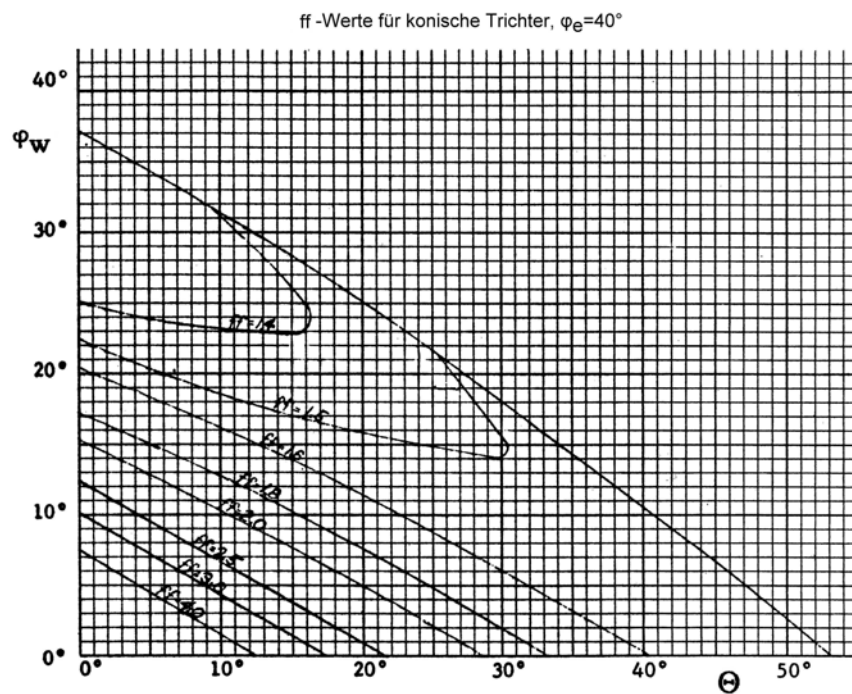
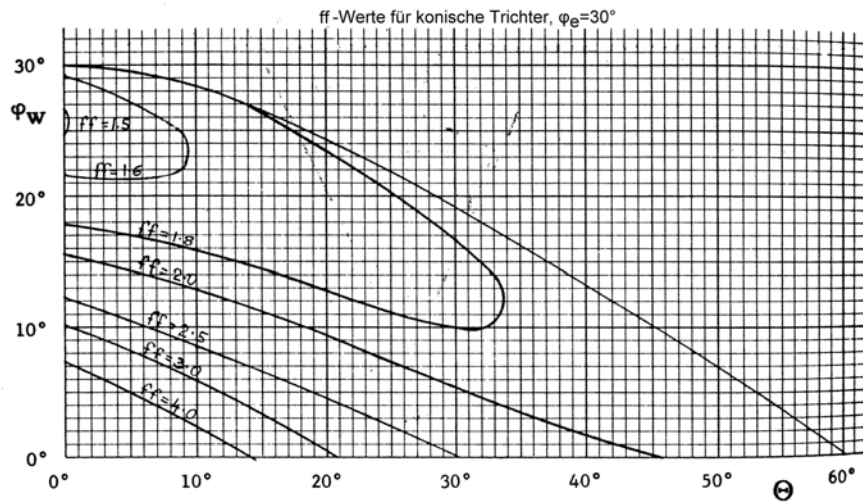
Abbildung 7: Bereiche unterschiedlicher Fließfähigkeiten.....	12
Abbildung 8: a) Erstbelastung der Schüttgutprobe mit der vertikalen Normalspannung $\sigma$ ; b) Scherverformung.....	13
Abbildung 9: Verlauf der Schubspannung $\tau$ und Schüttgutdichte $\rho_b$ in Abhängigkeit der Zeit beim Scheren einer a) unterverfestigten Probe; b) überverfestigten Probe mit jeweils der gleicher Normalspannung $\sigma$ .....	14
Abbildung 10: Anscherpunkt und Abscherpunkt im $\sigma$ , $\tau$ -Diagramm für a) kohäsives und b) kohäsionsloses Schüttgut.....	16
Abbildung 11: Ermittlung der Fließgrenze aus den gemessenen Schubspannungen.....	17
Abbildung 12: Fließort sowie Spannungskreise für die Druckfestigkeit $\sigma_c$ und die Verfestigungsspannung $\sigma_1$ .....	20
Abbildung 13: Fließort sowie Spannungskreise beim Anscheren.....	21
Abbildung 14: Fließort sowie Spannungskreise beim Abscheren.....	21
Abbildung 15: Weitere wichtige Fließeigenschaften.....	23
Abbildung 16: Drei unterschiedliche Fließorte eines Schüttgutes, effektive Fließorte und stationäre Fließorte .....	25
Abbildung 17: Fließeigenschaften in Abhängigkeit der Verfestigungsspannung (kohäsives Schüttgut).....	26
Abbildung 18: Prinzip der Zeitverfestigungsmessung mit dem Schergerät.....	27
Abbildung 19: Fließort und Zeitfließort.....	29
Abbildung 20: Aufbau zum Messen der Wandreibung .....	30
Abbildung 21: Verlauf der Wandschubspannung $\tau_w$ in Abhängigkeit der Zeit, Wandfließort ..	30
Abbildung 22: Wandfließorte; a) bei konstantem Wandreibungswinkel $\varphi_w$ ; b) Wandreibungswinkel $\varphi_w$ abhängig von der Wandnormalspannung $\sigma_w$ .....	32
Abbildung 23: Spannungskreise bei stationärem Fließen (SF) und bei einachsigen Verdichten (EV).....	33
Abbildung 24: a) Verlauf der Schubspannungen über der Zeit beim Messen mehrerer Abscherpunkte ohne zwischenzeitliches Anscheren; b) Spannungsverlauf in einem $\sigma$ , $\tau$ - Diagramm wenn nach dem Erreichen des stationären Zustandes die Normalspannung kontinuierlich verringert wird (Abschervorgang).....	35
Abbildung 25: Schergerät nach Peschl.....	36
Abbildung 26: Richtungen der Hauptspannung beim Anscheren ( $\sigma_{1,an}$ ) und Abscheren ( $\sigma_{1,ab}$ ) in einer Jenike Scherzelle (qualitativ) .....	36
Abbildung 27: Johanson Hang-up Indicizer und Verlauf der Vertikalspannung beim Verdichten (qualitativ).....	38

Abbildung 28: Übersicht über Schergeräte .....	40
Abbildung 29: Scherformen in der Scherzone .....	41
Abbildung 30: Rahmenschergerät .....	42
Abbildung 31: Einfachschergerät.....	43
Abbildung 32: Rotationsschergeräte: a) Torsionsschergerät; b-d) Ringschergeräte .....	44
Abbildung 33: Schubspannungsverlauf im Ringschergerät.....	45
Abbildung 34: Indirekte Schergeräte: a) Zwei axialgerät; b) Zwei axialbox; c) Drei axialgerät; d) Drei axialbox; e) modifiziertes Drei axialgerät.....	47
Abbildung 35: Jenike Schergerät: a) Anordnung zur Messung der Schüttguteigenschaften; b) Anordnung zur Messung der Wandreibung; 1 unterer Ring, 2 Zentrierplatte, 3 oberer Ring, 4 Scherdeckel, 5 Zentrierspitze, 6 Bügel, 7 Stift, 8 Scherstift, 9 Wandprobe, 10 Distanzring .....	48
Abbildung 36: Anordnung der Jenike Scherzelle für die Probenvorbereitung: 1 unterer Ring, 2 Zentrierplatte, 3 oberer Ring, 11 Füllring, 12 Belastungsdeckel, 13 Spitze des Belastungsdeckels .....	50
Abbildung 37: Jenike Scherzelle mit Twistvorrichtung: 1 unterer Ring, 2 Zentrierplatte, 3 oberer Ring, 11 Füllring, 14 Twistvorrichtung, 15 Hängersystem, 16 Twistdeckel, 17 Handhebel, 18 Twiststange .....	51
Abbildung 38: Ringschergerät nach Schulze .....	53
Abbildung 39: Messung eines Punktes eines Fließortes durch An- und Abscheren.....	67
Abbildung 40: Verlauf der Schubspannung über der Zeit beim Anscheren einer a) unterverfestigten Probe; b) überverfestigten Probe .....	68
Abbildung 41: Möglicher Verlauf der Schubspannung bei einer überverfestigten Probe bei großer erforderlicher Scherverformung.....	69
Abbildung 42: Fließortmessung durch An- und Abscheren mit einem Ringschergerät bei der Messung mehrerer Abscherpunkte mit einer Schüttgutprobe .....	71
Abbildung 43: Zeitverfestigungsbank mit Abdeckhaube (hier: Jenike Scherzelle).....	72
Abbildung 44: Fließort mit als Parallelen angenäherten Zeitfließorten .....	73
Abbildung 45: Wandschubspannung $\tau_w$ -Scherweg-Verläufe bei: a) slip-stick-Effekt und b) Kunststoffbeschichtungen .....	74
Abbildung 46: Messung der Wandreibung mit dem Ringschergerät.....	75
Abbildung 47: Anzustrebender Bereich für die Abschernormalspannungen $\sigma_{ab,i}$ .....	78
Abbildung 48: Flusstypen .....	83
Abbildung 49: Skizze der Jenike Scherzelle am Verfahrenstechnik Institut für industriellen Umweltschutz an der Montanuniversität Leoben .....	85

Abbildung 50: Abmessungen der Jenike Scherzelle am Verfahrenstechnik Institut für industriellen Umweltschutz an der Montanuniversität Leoben .....	87
Abbildung 51: Wichtige Größen eines Fließortes & Mohrsche Spannungskreise.....	93
Abbildung 52: Grenzen Massenfluss/Kernfluss für konische Trichter.....	96
Abbildung 53: Grenzen Massenfluss/Kernfluss für keilförmige Trichter .....	96
Abbildung 54: Spannungsverläufe in einem runden Silo zur Ableitung des bezüglich Brückenbildung kritischen Auslaufdurchmessers.....	98
Abbildung 55: Hilfsfunktionen zur Berechnung der kritischen Auslaufweiten .....	100
Abbildung 56: Ermittlung von $\sigma'_{1,krit}=\sigma_{c,krit}$ und $\rho_{S,krit}$ .....	102

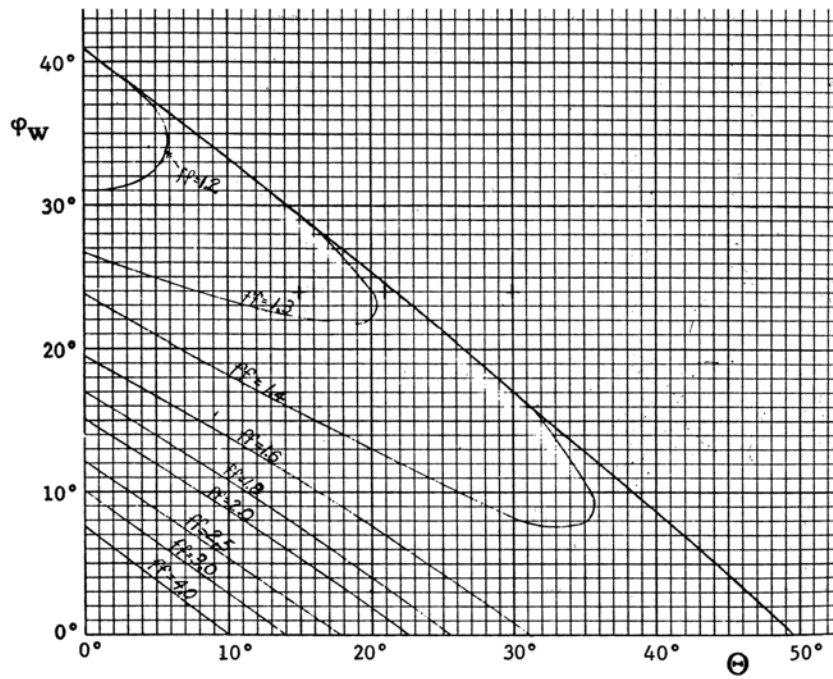
# Anhang

## Fließfaktor nach Jenike für konische Trichter [12]:

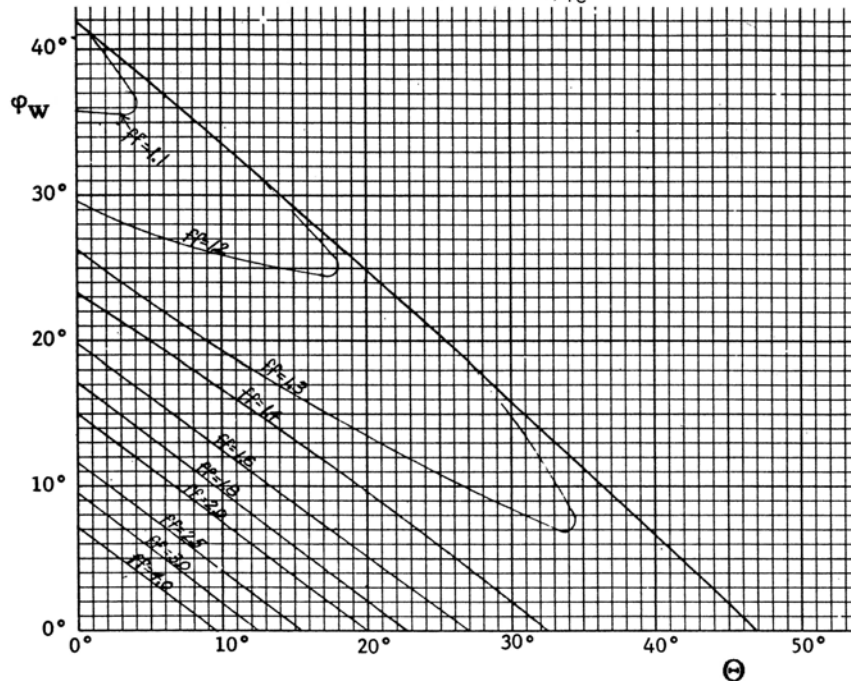




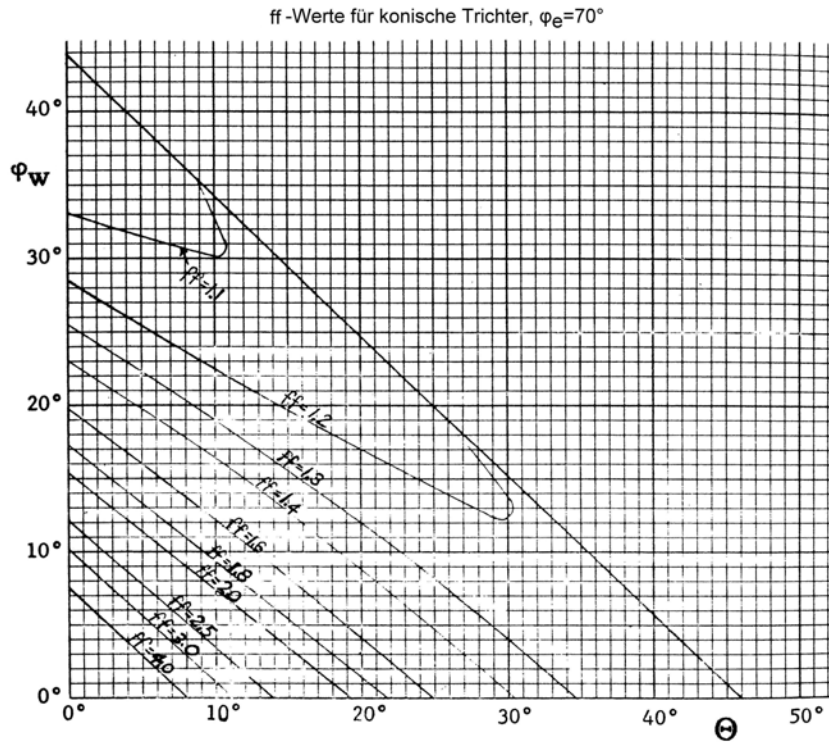
ff-Werte für konische Trichter,  $\varphi_e=50^\circ$



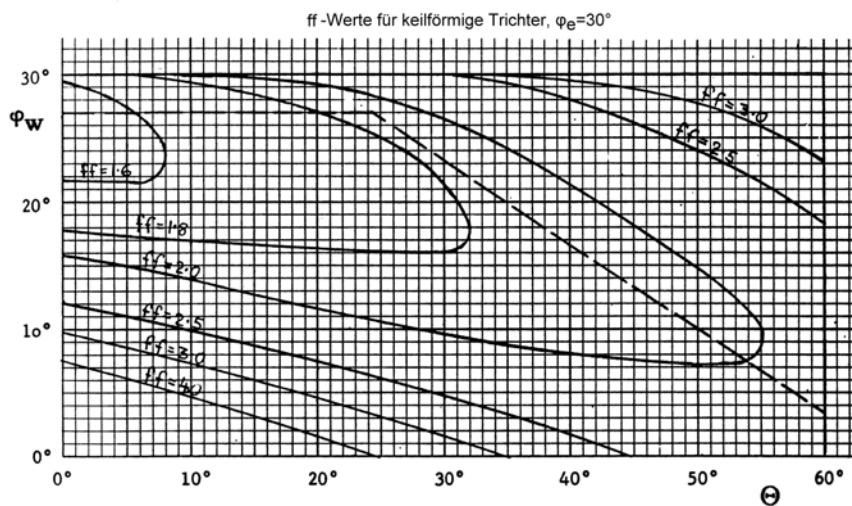
ff-Werte für konische Trichter,  $\varphi_e=60^\circ$

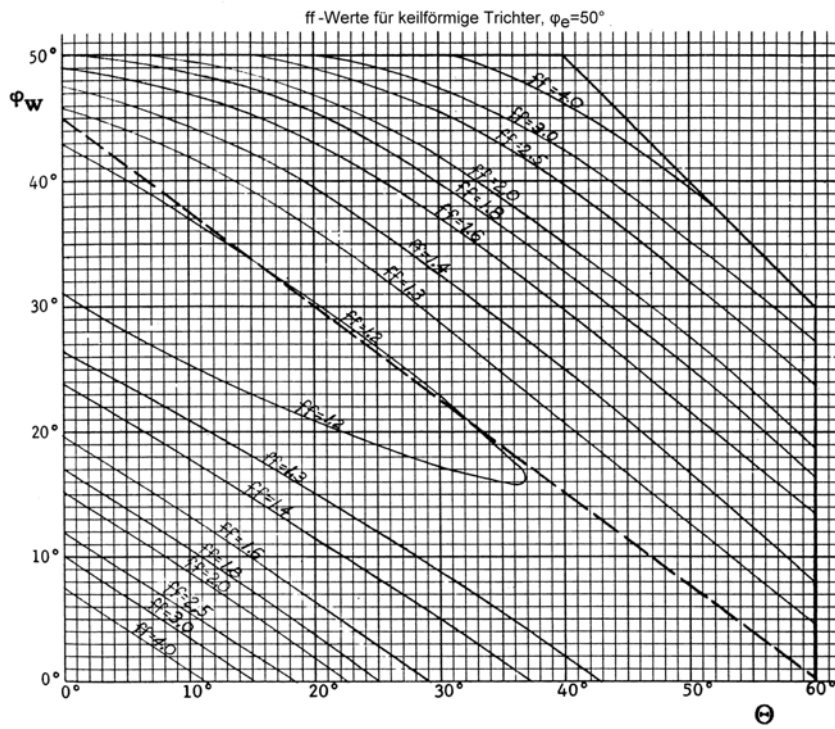
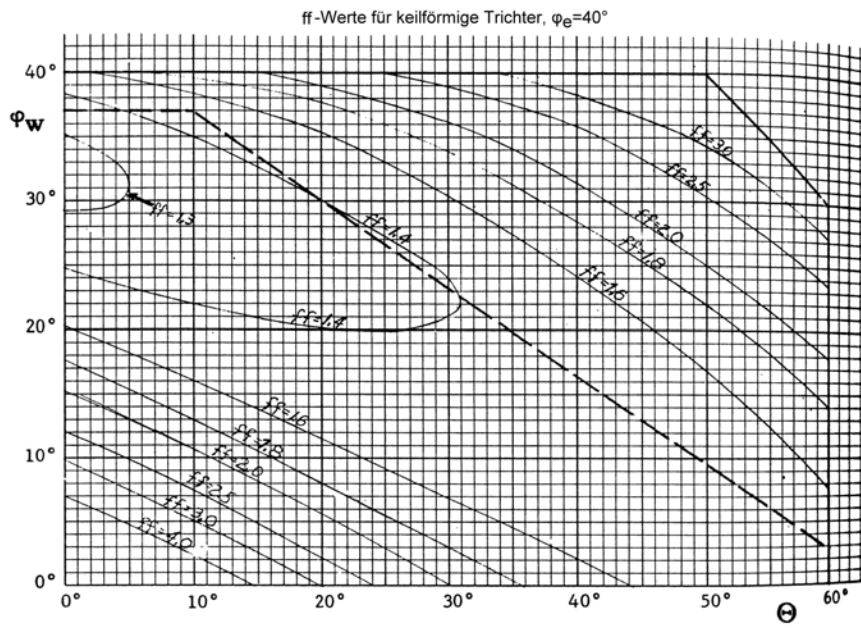






Fließfaktor nach Jenike für keilförmige Trichter [12]:





ff -Werte für keilförmige Trichter,  $\varphi_e=60^\circ$

