

III Physikalische Größen von Feststoffen

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	2
2	Grundlagen	3
2.1	Beschreibung von Schüttgütern	3
2.2	Physikalische Größen von Schüttgütern	4
2.2.1	Schüttdichte von Schüttgütern	4
2.2.2	Feststoffdichte von Schüttgütern	5
2.2.3	Porosität von Schüttgütern	6
3	Versuchsteil	8
3.1	Versuchsaufbau	8
3.2	Versuchsplanung	11
3.3	Rücksprache vor Versuchsbeginn	12
3.4	Versuchsdurchführung und -auswertung	13
3.5	Bewertung der Versuche	14
4	Was war wichtig?	15
5	Formelzeichen	16
6	Literaturverzeichnis	17

III Physikalische Größen von Feststoffen

1 Einleitung

Die meisten physikalischen Größen sind bestens bekannt und werden oft im Alltag verwendet. Die Masse, die Länge oder das Volumen eines Gegenstandes sind keine neuen Begriffe.



Wenn es darum geht, Messungen durchzuführen oder Versuche auszuwerten, werden einige dieser physikalischen Größen häufig verwendet.

Die Verfahrenstechnik handelt von der Umwandlung von Stoffen. Diese Stoffe können durch ihre physikalische Größen beschrieben werden. Dadurch erhält man ein Maß für die Ergebnisse der Versuche, bei denen die Stoffe hergestellt oder verändert wurden.

Bei diesen Stoffen handelt es sich um Feststoffe, Flüssigkeiten oder Gase. Die Feststoffe bestehen dabei meistens aus einer größeren Anzahl sehr kleiner Teilchen, man spricht von den Partikeln eines Schüttgutes.

Am Beispiel des Schüttgutes stellt sich die Problematik des Volumens oder der Dichte auf einmal neu. Zwischen den vielen Partikeln befinden sich Hohlräume mit Luft. Wie groß ist denn das eigentliche Volumen der Partikel? Welche Masse paßt in ein Vorratsgefäß von einem bestimmten Volumen?

Da es sich meistens um unregelmäßig geformte Partikel handelt, ist ein Ausmessen der einzelnen Partikel, die zudem nicht alle genau die gleiche Größe haben, unmöglich.

Wir müssen hier also unsere bekannten Begriffe Volumen und Dichte nochmals genauer definieren.

Welches sind nun die wichtigsten physikalischen Größen der Stoffe? Das müssen sinnvollerweise die Größen sein, die das Verhalten der Stoffe am besten beschreiben.

Diese physikalischen Größen werden als erstes festgelegt.

Dann wird gezeigt, wie diese Größen definiert sind und wie sie gemessen werden.

Durch Messung der Größen lernen wir nicht nur die dazu erforderlichen Vorgehensweisen. Darüber hinaus können wir die Ergebnisse zum Beurteilen anderer Versuche verwenden.

2 Grundlagen

2.1 Beschreibung von Schüttgütern

Schüttgüter sind disperse Systeme, die aus zwei Phasen bestehen: zum einen aus Feststoffteilchen (oder -partikeln) beliebiger Form und Größe, zum anderen aus einem Fluid (häufig Luft) als zusammenhängende Phase. Den Raum zwischen den einzelnen Feststoffteilchen, der im Falle von Luft als zweiter Phase quasi leer ist, bezeichnet man als Hohlraum. Den volumenmäßigen Anteil dieses Hohlräume am gesamten dispersen System, also am gesamten Schüttgut, bezeichnet man als Porosität oder Hohlraumvolumenanteil.

Die Porosität hängt hauptsächlich von der Form der Feststoffpartikel ab. Grundsätzlich ist sie nicht von der Größe der Partikel abhängig (Abb.III-1), jedoch von deren Korngrößenverteilung.

Abb.III-1: Korngrößenunabhängige Porosität

Bei entsprechenden Korngrößenunterschieden können sich die feinen Teilchen in den Lücken zwischen den groben Teilchen (Abb.III-2) sammeln.

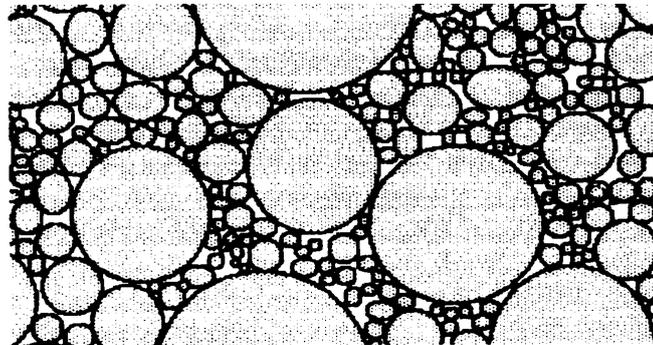


Abb.III-2: Kleine Porosität bei Korngrößenunterschieden

Auch die Behälterwand spielt eine Rolle, in Wandnähe sind mehr Hohlräume als mitten im Schüttgut, wo die einzelnen Partikel sich ineinander verschachteln können. Unterschiedliche Behältergrößen können daher bei gleichen Schüttgütern zu unterschiedlichen Porositäten führen.

Am Beispiel des Wandeinflusses wird bereits ersichtlich, daß es schwierig ist, genaue Werte für die Porosität zu bestimmen. In der Literatur [Zogg] findet man Anhaltswerte für die Porositäten verschiedener Stoffe.

Neben der hier beschriebenen Porosität findet man bei manchen Stoffen noch die sogenannte Partikelporosität [Stieß2] vor. Es handelt sich hierbei um Partikel, die im Inneren Hohlräume (Poren) haben (teils mit Verbindung zum Partikeläußeren (zugängliche Poren)) oder von feinen Kanälen durchdrungen werden (durchgehende Poren). Die Partikelporosität ist nur bei wenigen Schüttgütern vorhanden und spielt meistens eine untergeordnete Rolle. Sie soll hier nicht weiter betrachtet werden.

Die Porosität ist eine wichtige Größe, die fast alle Eigenschaften eines Schüttgutes stark beeinflußt. So hängt beispielsweise der Druckverlust eines Schüttgutes bei der Durchströmung mit einem Fluid sehr stark von ihr ab.

Eine andere, einfacher zu bestimmende Größe, die ebenfalls von der Porosität abhängt, ist die Schüttdichte. Als Schüttdichte oder scheinbare Dichte eines Schüttgutes bezeichnet man den Wert den man erhält, wenn man die Masse und das Volumen einer bestimmten Menge Schüttgut

bestimmt und das Verhältnis ausrechnet. In diesem Wert wird der Anteil an hohlem Raum zwischen den Feststoffpartikeln berücksichtigt, denn die Dichte eines einzelnen Feststoffteilchens, die sogenannte Feststoffdichte, liegt entsprechend höher.

Porosität und Schüttdichte sind zwei wichtige Größen zur Charakterisierung eines Schüttgutes. Daneben gibt es noch weitere Größen [Stieß1], auf die hier jedoch nicht weiter eingegangen werden soll.

2.2 Physikalische Größen von Schüttgütern

2.2.1 Schüttdichte von Schüttgütern

Als Schüttdichte oder scheinbare Dichte eines Schüttgutes bezeichnet man das Verhältnis der Masse des Schüttgutes zu seinem Volumen.

Betrachten wir einen Behälter mit Schüttgut. Alle Hohlräume zwischen den Feststoffteilchen sind unter normalen Bedingungen mit Luft gefüllt. Das Volumen eines Schüttgutes setzt sich demnach aus dem Eigenvolumen der Teilchen (=Partikel) und dem Volumen der Hohlräume zusammen:

$$V_{SG} = V_{Te} + V_{H,SG} \quad (III.1)$$

V_{SG} : Schüttvolumen oder Volumen des Schüttgutes in m^3
 V_{Te} : Volumen aller Schüttgutteilchen in m^3
 $V_{H,SG}$: Volumen der Hohlräume in m^3

Die Masse des Behälterinhaltes entspricht der Masse des Schüttgutes (aller Partikel zusammen), weil die Hohlräume mit Luft gefüllt sind.

Die Schüttdichte oder scheinbare Dichte des Schüttgutes errechnet sich somit aus der Masse des Schüttgutes (der Feststoffpartikel) und dem Schüttvolumen:

$$\rho_{s,SG} = \frac{m_{SG}}{V_{SG}} \quad (III.2)$$

$\rho_{s,SG}$: Schüttdichte oder scheinbare Dichte des Schüttgutes in kg/m^3
 m_{SG} : Masse aller Schüttgutteilchen in kg
 V_{SG} : Schüttvolumen (Schüttgut mit seinen Hohlräumen) in m^3

2.2.2 Feststoffdichte von Schüttgütern

Da die einzelnen Teilchen oder Partikel eines Schüttgutes häufig unregelmäßig geformt sind, ist es meistens schwierig, die Dichte des Stoffes zu bestimmen.

Betrachten wir einen Behälter, der mit Schüttgut und einem Fluid (Gas oder Flüssigkeit) gefüllt ist. Wir verwenden den Index "Te" für die Schüttgutteilchen und "Fl" für das Fluid.

Das Fluid nimmt alle Hohlräume zwischen den Feststoffteilchen ein. Das gesamte (Index "ges") Volumen setzt sich daher aus dem Volumen der Feststoffteilchen und dem Volumen des Fluids zusammen:

$$V_{\text{ges}} = V_{\text{Te}} + V_{\text{Fl}} \quad (\text{III.3})$$

Für die Feststoffdichte des Schüttgutes gilt ebenso wie für jeden anderen Stoff:

$$\rho_{\text{Te}} = \frac{m_{\text{Te}}}{V_{\text{Te}}}$$

und somit:

$$V_{\text{Te}} = \frac{m_{\text{Te}}}{\rho_{\text{Te}}} \quad (\text{III.4})$$

Ebenso für das Fluid:

$$V_{\text{Fl}} = \frac{m_{\text{Fl}}}{\rho_{\text{Fl}}} \quad (\text{III.5})$$

Setzen wir die Gleichungen (III.4) und (III.5) in Gleichung (III.3) ein, so erhalten wir:

$$V_{\text{ges}} = \frac{m_{\text{Te}}}{\rho_{\text{Te}}} + \frac{m_{\text{Fl}}}{\rho_{\text{Fl}}}$$

Die Gleichung umgestellt ergibt:

$$\frac{m_{\text{Te}}}{\rho_{\text{Te}}} = V_{\text{ges}} - \frac{m_{\text{Fl}}}{\rho_{\text{Fl}}}$$

Letztendlich erhält man:

$$\rho_{\text{Te}} = \frac{m_{\text{Te}}}{V_{\text{ges}} - \frac{m_{\text{Fl}}}{\rho_{\text{Fl}}}} \quad (\text{III.6})$$

ρ_{Te} : Feststoffdichte der Schüttgutteilchen (-partikel) in kg/m^3

m_{Te} : Masse an Schüttgutteilchen in kg

V_{ges} : Gesamtes Volumen (Schüttgut und Fluid) in m^3

m_{Fl} : Masse an Fluid in kg

ρ_{Fl} : Dichte des Fluids in kg/m^3



Dabei gilt natürlich, daß die Masse aller Feststoffteilchen die Masse an Schüttgut darstellt.

$$m_{SG} = m_{Te} \quad m_{SG} : \text{Masse eines Schüttgutes in kg} \\ m_{Te} : \text{Masse an Schüttgutteilchen in kg} \quad (III.7)$$

Mit Gleichung (III.7) ergibt sich aus Gleichung (III.6):

$$\rho_{SG} = \frac{m_{SG}}{V_{ges} - \frac{m_{Fl}}{\rho_{Fl}}} \quad (III.8)$$

ρ_{SG} : Feststoffdichte der Schüttgutteilchen (-partikel) in kg/m^3

m_{SG} : Masse an Schüttgut in kg

V_{ges} : Gesamtes Volumen (Schüttgut und Fluid) in m^3

m_{Fl} : Masse an Fluid in kg

ρ_{Fl} : Dichte des Fluids in kg/m^3

2.2.3 Porosität von Schüttgütern

Die Porosität oder der Hohlraumvolumenanteil ist definiert als das Volumen aller Hohlräume eines Schüttgutes zu dem gesamten Schüttvolumen [Löffler]:

$$\varepsilon = \frac{V_{H,SG}}{V_{SG}} \quad (III.9)$$

ε : Porosität oder Hohlraumvolumenanteil (ohne Einheit)

$V_{H,SG}$: Volumen der Hohlräume in m^3

V_{SG} : Schüttvolumen in m^3

Die Schüttdichte des Schüttgutes ist nach Gleichung (III.2):

$$\rho_{s,SG} = \frac{m_{SG}}{V_{SG}}$$

oder umgestellt:

$$m_{SG} = \rho_{s,SG} \cdot V_{SG} \quad (III.10)$$

Die Feststoffdichte der Schüttgutteilchen ist wie für jeden Stoff definiert zu:

$$\rho_{SG} = \frac{m_{SG}}{V_{Te}}$$

oder umgestellt:

$$m_{SG} = \rho_{SG} \cdot V_{Te} \quad (III.11)$$

Durch Gleichsetzen der Gleichungen (III.10) und (III.11) erhält man:

$$\rho_{s,SG} \cdot V_{SG} = \rho_{SG} \cdot V_{Te}$$

$$\text{oder } \rho_{s,SG} = \rho_{SG} \cdot \frac{V_{Te}}{V_{SG}} \quad (\text{III.12})$$

Das Schüttvolumen setzt sich aus dem Volumen der Schüttgutteilchen und dem Volumen der Hohlräume zusammen (entsprechend Gleichung (III.1)):

$$V_{SG} = V_{Te} + V_{H,SG}$$

$$\text{d.h. } V_{Te} = V_{SG} - V_{H,SG}$$

Eingesetzt in Gleichung (III.12) erhält man

$$\rho_{s,SG} = \rho_{SG} \cdot \frac{V_{SG} - V_{H,SG}}{V_{SG}}$$

$$\text{oder: } \rho_{s,SG} = \rho_{SG} \cdot \left(1 - \frac{V_{H,SG}}{V_{SG}}\right)$$

Berücksichtigt man Gleichung (III.8) ergibt sich:

$$\rho_{s,SG} = \rho_{SG} \cdot (1 - \varepsilon)$$

und daraus

$$\frac{\rho_{s,SG}}{\rho_{SG}} = 1 - \varepsilon$$

Man erhält letztendlich eine neue Formel zur Berechnung der Porosität:

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_{s,SG}}{\rho_{SG}}$$

(III.13)

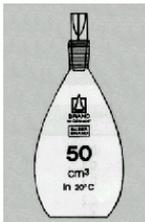
- ε : Porosität oder Hohlraumvolumenanteil (ohne Einheit)
- $\rho_{s,SG}$: Schüttdichte oder scheinbare Dichte des Schüttgutes in kg/m^3
- ρ_{SG} : Feststoffdichte der Schüttgutteilchen in kg/m^3

3 Versuchsteil

3.1 Versuchsaufbau

Zur Versuchsdurchführung werden insbesondere Pyknometer, ein Exsikkator, Meßzylinder und eine Waage benötigt.

Pyknometer



Ein Pyknometer (Abb.III-3) ist ein kleines Glasgefäß mit einem genau definierten Volumen, das einen geschliffenen Hals hat.

Der dazugehörige Stopfen hat eine kleine, mittige Durchgangsbohrung und ist ebenfalls geschliffen.

Abb.III-3: Pyknometer



Die exakten Volumina der vorhandenen Pyknometer (bei 20°C) sind in Abb.III-4 zu finden.

Pyknometer Nr.	V in ml
364	49,88
365	49,90
366	49,87
368	49,87
370	49,90

Abb.III-4: Volumina der Pyknometer

Abb.III-5: Pyknometer und Spritzflasche

Zur Bestimmung der exakten Volumina der Pyknometer wurden diese beim Hersteller zunächst bis fast zum Rand mit einer Flüssigkeit bekannter Dichte (z.B. destilliertem Wasser) gefüllt. Dann wurde der Stopfen mit einem Ruck eingedrückt, so daß die überschüssige Flüssigkeit durch die Bohrung herausgespritzt.

Das Flüssigkeitsvolumen war somit genau festgelegt, und durch Wiegen der Masse wurde mit der Dichte der Flüssigkeit das Volumen berechnet. Bei der Berechnung der Masse wurde die Abhängigkeit der Dichte von der Temperatur [$\rho = \rho(T)$] berücksichtigt.

Bei der Bestimmung der Feststoffdichte von Schüttgütern wird das Pyknometer mit einigen Feststoffpartikeln (ca. 1 g) und etwas Flüssigkeit gefüllt (Abb.III-5). Dann wird das offene Gefäß in einen Exsikkator (siehe nächsten Abschnitt) gestellt, damit kleine Luftblasen, die an den Feststoffpartikeln hängen, sich von diesen lösen und somit die Meßergebnisse nicht verfälschen.

Exsikkator

Ein Exsikkator (Abb.III-6) besteht aus einem Behälter und einem Deckel, beide aus Glas oder Kunststoff.

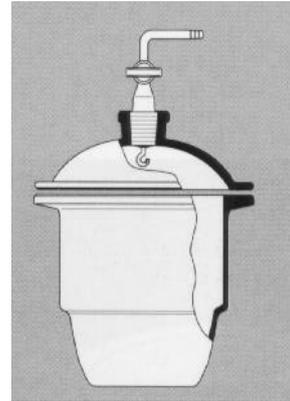


Abb.III-6: Exsikkator

Ein Exsikkator dient hauptsächlich zum Trocknen von Stoffen. Hierzu werden der zu trocknende Stoff und eine stark hygroskopische (wasseranziehende) Substanz in den Behälter gelegt.

Grundsätzlich kann man Stoffe aber auch trocknen, indem man ihnen durch Unterdruck die Feuchtigkeit entzieht.

Um im Inneren eines Exsikkators den erforderlichen Unterdruck zu erhalten, wird der Behälter an eine Wasserstrahlpumpe (Abb.III-7) oder an eine Vakuumpumpe angeschlossen.



Abb.III-7: Exsikkator mit Wasserstrahlpumpe

Meßzylinder

Meßzylinder (Abb.III-8) sind zylindrische Glasgefäße mit Markierungen, die den Inhalt d.h. das Volumen zu verschiedenen Höhen exakt angeben.

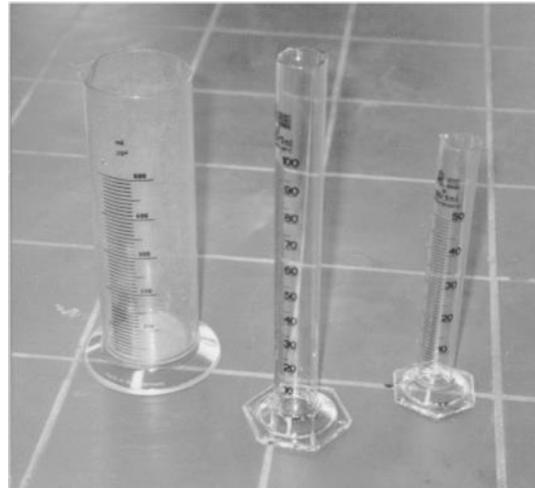


Abb.III-8: Meßzylinder

Waage



Abb.III-9: Präzisionswaage

Zum Wiegen von kleinen Massen (max. 2100 g) steht eine Präzisionswaage (Genauigkeit 0,01 g) (Abb.III-9) zur Verfügung.

Größere Massen müssen mit einer Balkenwaage (Abb.III-10) bestimmt werden.



Abb.III-10: Balkenwaage

3.2 Versuchsplanung

- Welche physikalischen Größen müßt Ihr ermitteln?
- Überlegt Euch genau, wie Ihr diese Größen bestimmen könnt. Notiert die wichtigsten Schritte in kurzen Sätzen.
- Schreibt die Formeln heraus, die Ihr braucht.
- Bereitet Tabellen vor, um die Meßwerte während der Versuchsdurchführung einzutragen. Seht dabei Platz vor, damit Ihr die Meßwerte mit Hilfe der Formeln auswerten und die Ergebnisse ebenfalls eintragen könnt.
- Verwendet zwei unterschiedliche Größen an Messzylindern.
- Was braucht Ihr alles zur Versuchsdurchführung?

Hinweis: Bestimmt auch die Porosität der Rapssamen.

3.3 Rücksprache vor Versuchsbeginn

Besprecht den Versuch mit dem Lehrer.

Zeigt ihm die geplante Vorgehensweise zur Versuchsdurchführung und die Tabellen zum Eintragen der Meßwerte und Berechnen der Ergebnisse.

3.4 Versuchsdurchführung und -auswertung

Vorsicht bei der Handhabung der Waage:

Es handelt sich um eine Präzisionswaage, die sehr empfindlich ist. Deshalb ist sie auch **sehr teuer**.

Die Drucksensoren zum Wiegen befinden sich an den vier Ecken unterhalb der Auflage. Nicht von oben auf diese Platte drücken!

Beim Transport darf die Waage nur von unten angehoben und getragen werden.

Achtet darauf, daß die Waage eben ("im Wasser") aufgestellt ist. Die Luftblase der Libelle muß in der Mitte sein.

Zum Ausrichten sind die Nivellierschrauben an den Stellfüßen zu verstellen.

Spült die Pyknometer nach Gebrauch mit destilliertem Wasser und setzt sie dann gleich zum Trocknen in den Ofen.

Während der Versuchsdurchführung sind die Meßwerte in die vorbereiteten Tabellen einzutragen.

! Vergeßt nach der Versuchsdurchführung nicht das **Auswerten** der Meßwerte.

Das Meßprotokoll ist mit der Versuchsauswertung abzugeben.

3.5 Bewertung der Versuche

Seid Ihr mit dem Ergebnis Eurer Arbeit zufrieden?

Beantwortet später in einer gemeinsamen Bewertung der Versuche II, III und IV die folgenden Fragen schriftlich:

- Wie könnt Ihr allgemein die Qualität Eurer Messungen überprüfen?
Was ergibt diese Überprüfung für Eure Messungen?
- Welche Faktoren konnten zu falschen Ergebnissen führen?
- Versuchskritik und Verbesserungsvorschläge!

4 Was war wichtig?

- Erklärt in eigenen Worten die Begriffe "Schüttvolumen", "scheinbare Dichte", "Feststoffdichte" und "Porosität".
- Von zwei Schüttgütern aus gleichem Material (Stoff) hat das zweite eine größere scheinbare Dichte als das erste. Wo liegen die Werte für das Schüttvolumen und die Porosität im Vergleich zum ersten Schüttgut?

5 Formelzeichen

Symbol	Bezeichnung	Einheit
m_{Fl}	Masse an Fluid	kg
m_{SG}	Masse an Schüttgut	kg
m_{Te}	Masse an Schüttgutteilchen	kg
t	Zeit	s
V_{Fl}	Volumen des Fluids	m^3
V_{ges}	Gesamtes Volumen (Schüttgut und Fluid)	m^3
$V_{\text{H,SG}}$	Volumen der Hohlräume im Schüttgut	m^3
V_{SG}	Schüttvolumen = Volumen der Schüttgutteilchen	m^3
ε	Porosität oder Hohlraumvolumenanteil	-
ρ_{Fl}	Dichte des Fluids	kg/m^3 , kg/L
ρ_{SG}	Feststoffdichte des Schüttgutes	kg/m^3 , kg/L
$\rho_{\text{s,SG}}$	Schüttdichte oder scheinbare Dichte des Schüttgutes	kg/m^3 , kg/L

6 Literaturverzeichnis

- [*Armco*] Armco Mineral Processing Vertriebsgesellschaft mbH:
Technische Produktinformationen Stahlmahlkugeln
- [*Kuchling*] Kuchling, Horst:
Taschenbuch der Physik
Verlag Harri Deutsch 1981
Thun und Frankfurt/Main
ISBN 3 87144 097 3
- [*Stieß1*] Stieß, Matthias:
Mechanische Verfahrenstechnik 1
Springer-Verlag
ISBN 3-540-59413-2
- [*Stieß2*] Stieß, Matthias:
Mechanische Verfahrenstechnik 2
Springer-Verlag
ISBN 3-540-55852-7
- [*Weast*] Weast, Robert C.:
Handbook of Chemistry and Physics
67th Edition 1986/87
CRC Press, Inc. Boca Raton, Florida
ISBN 0-8493-0467-9
- [*Zogg*] Zogg, Martin:
Einführung in die Mechanische Verfahrenstechnik
B.G.Teubner, Stuttgart
ISBN 3-519-16319-5e