



Handbuch wägetechnische Applikationen

Dichtebestimmung

Simplifying Progress

SARTORIUS



Bedeutung der verwendeten Formelzeichen

Zeichen	
a	air – Luft
fl	fluid – Fluid (fließfähiges System)
s	solid – Feststoff
(a)	in Luft bestimmt
(fl)	in einem Fluid bestimmt
B	buoyancy – Auftrieb
b	bulk – im Ganzen
tot	total – Gesamt

Zeichen	Größe	Einheit
m	Masse	kg
V	Volumen	m ³
A	Fläche	m ²
F	Kraft	N = kg × m/s ²
G = m × g	Gewichtskraft	N = kg × m/s ²
g (gravity)	Fallbeschleunigung	m/s ²
p = F / A	Druck	Pa = N / m ²
ρ (rho)	Dichte	kg/m ³ ; g/cm ³
T	Temperatur in Kelvin	K
t	Temperatur in °Celsius	°C, t = T - 273.15 K
γ (gamma)	spezifisches Gewicht (alt!)	kp / dm ³
α (alpha)	linearer Ausdehnungskoeffizient (von Feststoffen)	1/K = K ⁻¹
γ (gamma)	Volumen- ausdehnungskoeffizient (von Flüssigkeiten oder Gasen)	1/K = K ⁻¹
φ (phi)	relative Luftfeuchte	%
π (pi)	Porosität	Volumen %

Vorbemerkung

Dichtemessung

Das Thema Dichtemessung hat eine lange Historie. Der griechische Gelehrte Archimedes (287 bis 212 vor Christus) hatte als erster die Idee einen Festkörper in Wasser zu tauchen und anhand des von ihm verdrängten Flüssigkeitsvolumens und dem einer Referenzproben auf die Dichte des zu untersuchenden Körpers zu schließen. Archimedes machte sich dabei zu Nutze, dass die Auftriebskraft eines Körpers direkt proportional zum verdrängten Volumen ist und dieses umso kleiner, je höher die Dichte des Körpers ist:

$$F_{\text{Auftrieb}} = V_{\text{verdrängt}} \times \rho_{\text{Fluid}} \times g.$$

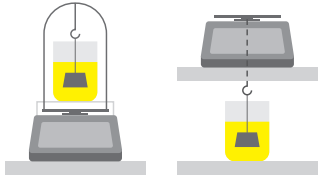
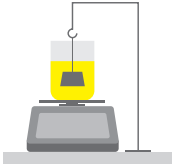

Der Universalgelehrte Abu Raihan Muhammad al-Biruni (973 bis 1048 nach Christus) konstruierte das erste Pyknometer und bestimmte die Dichte von verschiedenen Elementen. Das Messprinzip des Pyknometers beruht auf der Verdrängung der Flüssigkeit im Gefäß durch die zu messende Probe. Während des Messverfahrens wird zunächst das leere bzw. das mit Wasser gefüllte Gefäß gewogen und anschließend die zu messende Flüssigkeit oder Probe in das Gefäß gegeben. Aus den gemessenen Gewichtsunterschieden kann die Dichte von Flüssigkeiten oder Festkörpern ermittelt werden.

Die Entwicklung der Dichtemessung setzte sich im 18. Jahrhundert mit skalierten gläsernen Messapparaten wie zum Beispiel Aräometern fort, die abhängig von der Dichte einer Flüssigkeit unterschiedlich tief eintauchen und auch heutzutage zum Beispiel zur Bestimmung der Alkoholkonzentration noch verbreitet sind.

Auch heute spielt das Thema Dichtemessung, zum Beispiel für die Qualitätskontrolle von Rohstoffen und Waren, immer noch eine gewichtige Rolle. Moderne Laborwaagen bieten geführte Abläufe zur Dichtemessung mittels der Auftriebs- oder Verdrängungsmethode oder unter Verwendung von Pyknometern. Die Messverfahren sind zwar identisch geblieben, heutzutage aber spielt die elektronische Datenverarbeitung die entscheidende Rolle. Gemessene Wägewerte und Umgebungsbedingungen werden protokolliert und das Ergebnis automatisch berechnet. Nach Abschluss der Messung erhält der Anwender einen Ergebnisbericht mit allen aufgezeichneten Werten und dem berechneten Ergebnis. Das Risiko von fehlerhaft durchgeführten Messungen, falsch protokollierten Messwerten oder Rechenfehlern wird dadurch minimiert.

Kurze Zusammenfassung von Methoden zur Dichtebestimmung mittels Laborwaagen

Einen detaillierten Vergleich der verschiedenen Methoden zur Dichtebestimmung finden Sie auf Seite 35.

	Gravimetrisch, Auftrieb	Gravimetrisch, Verdrängung	Pyknometer
Methoden	 <p>Das Becherglas für die Hilfsflüssigkeit steht auf einer Plattform oder unterhalb der Waage</p>	 <p>Das Becherglas für die Hilfsflüssigkeit steht auf der Waage.</p>	 <p>Glasgefäß mit festem Volumen</p>
Geeignet für:	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Festkörper ▪ Flüssigkeiten (mit Glassenkörper) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Pastöse Substanzen (mit Gamma-Kugel) ▪ Flüssigkeiten (mit Glassenkörper) ▪ Festkörper 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Flüssigkeiten, Dispersionen ▪ Pulver ▪ Granulate
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Schnelles Verfahren ▪ Flexibel in Bezug auf die Probenmenge 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Schnelles Verfahren 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Genaue Methode
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Temperaturempfindlich ▪ Probe muss sehr vorsichtig benetzt werden. ▪ Es dürfen keine Luftblasen eingeschlossen werden. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Temperaturempfindlich ▪ Großes Probenvolumen erforderlich 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Temperaturempfindlich ▪ Hoher Arbeitsaufwand ▪ Hoher Zeitaufwand ▪ Es dürfen keine Luftblasen eingeschlossen werden

Inhalt

Allgemeine Grundlagen	6
Beispiele für Anwendungen der Dichtebestimmung	6
Definition der Dichte	6
Einheiten der Dichte	7
Abhängigkeit der Dichte von der Temperatur	7
Das Prinzip des Archimedes	9
Gravimetrische Methoden der Dichtebestimmung	11
Auf dem Archimedisches Prinzip basierende Dichtebestimmungsmethoden	11
Auftriebsmethode	12
Verdrängungsmethode	13
Bestimmung der Dichte von Luft	13
Dichtebestimmung mit Pyknometern	15
Wägen eines definierten Volumens („Litergewicht“)	16
Pycnometer Method	16
Andere Methoden zur Dichtebestimmung	17
Biege-Schwinger-Methode Schwingungsverfahren	17
Schwebeverfahren	18
Aräometer	18
Anwendungsbeispiele	19
Bestimmung der Dichte von Festkörpern	19
Besonderheiten der Proben	19
Geeignete Dichtebestimmungsmethoden	19
Durchführen einer Dichtebestimmung nach der Verdrängungsmethode	19
Bestimmung der Dichte von porösen Festkörpern	20
Besonderheiten der Proben	20
Geeignete Dichtebestimmungsmethoden	20
Durchführen einer Dichtebestimmung nach der Auftriebsmethode (in Anlehnung an EN 993-1)	21
Bestimmung der Dichte von Pulvern und Granulaten	22
Besonderheiten der Proben	22
Geeignete Dichtebestimmungsmethoden	22
Durchführung einer Dichtebestimmung nach der Pyknometermethode (in Anlehnung an DIN EN ISO 18753)	23
Bestimmung der Dichte von homogenen Flüssigkeiten	24
Besonderheiten der Proben	24
Geeignete Dichtebestimmungsmethoden	24
Durchführen einer Dichtebestimmung nach der Auftriebsmethode	24
Bestimmung der Dichte von Dispersionen	25
Besonderheiten der Proben	25
Geeignete Dichtebestimmungsmethoden	25
Durchführen einer Dichtebestimmung nach der Verdrängungsmethode	25

Fehler und Genauigkeit der Dichtebestimmung	26
Korrektur des Luftauftriebs	26
Verdrängungsverfahren	27
Auftriebsverfahren	27
Pyknometermethode	27
Korrektur des Auftriebs der Probenhalterung	27
Auftriebsmethode	27
Verdrängungsmethode	28
Vermeidung systematischer Fehler	29
Hydrostatische Verfahren	29
Pyknometerverfahren	30
Fehlerrechnung	30
Auftriebsverfahren	30
Verdrängungsverfahren	33
Pyknometerverfahren	33
 Vergleich verschiedener Methoden zur Dichtebestimmung	 35
 Anhang	 37
Temperaturabhängigkeit der Dichte	37
Hydrostatische Dichtebestimmung – Eliminieren des Volumens in den Gleichungen für ρ	37
Luftdichtebestimmung	38
Luftauftriebskorrektur	39
 Fragen zum Thema Dichte	 38
 Notes for Answering the Questions	 40
 Index	 41

Allgemeine Grundlagen

Beispiele für Anwendungen der Dichtebestimmung

In vielen verschiedenen Anwendungsbereichen wird die Dichte zur Kennzeichnung von Material oder Produkteigenschaften verwendet. Zusammen mit anderen Informationen kann die Dichte Auskunft geben über mögliche Ursachen für Änderungen von Produkteigenschaften. Die Dichtebestimmung zählt zu den am häufigsten angewandten gravimetrischen Verfahren im Labor.

Die Dichte kann einen Hinweis auf Veränderungen in der Zusammensetzung eines Materials geben oder auf Fehler in Form von Rissen oder Hohlräumen in gegossenen Teilen (sogen. Lunkern), z. B. in der Sanitärkeramik oder in Gießereien der Eisen- und Stahlindustrie.

In Aluminiumgießereien werden zur Überwachung der Schmelzequalität zwei Proben abgegossen, eine unter Atmosphärendruck, eine unter einem Unterdruck von z. B. 80 mbar. Nach dem Erstarren und Abkühlen werden die Dichten der Gußproben bestimmt, das Verhältnis der beiden Werte gibt Auskunft über die Reinheit der Schmelze.

Bei technischen Kunststoffen kann auf den Anteil an kristalliner Phase geschlossen werden, da Kristalle auf Grund der größeren geometrischen Ordnung eine höhere Dichte aufweisen als der nichtkristalline Anteil. Bei Glas wird die Dichte außer von der chemischen Zusammensetzung durch die Abkühlgeschwindigkeit aus der Schmelze bestimmt.

Bei porösen Materialien wird die Dichte durch den Anteil an Poren beeinflusst und bestimmt Eigenschaften wie z. B. die Frost-Tau-Wechselbeständigkeit von Dachziegeln oder die Wärmeisolationseigenschaften von Mauerziegeln, Kalksandsteinen oder Porenbeton.

Bei Wein wird die Qualität u. a. durch das sogenannte Mostgewicht (in °Oechsle) bestimmt – genau genommen auch ein Dichtewert, da die Dichte proportional der Konzentration eines Stoffes in dem Lösungsmittel ist (z. B. Zucker, Salz oder Alkohol in wässriger Lösung).

Eine wichtige Kenngröße stellt die Dichte im Bereich der Fertigpackungskontrolle dar, wenn auf den Verpackungen Volumenangaben gefordert sind, der Packungsinhalt aber mithilfe von Waagen ermittelt wird.

Definition der Dichte

Als Dichte ρ bezeichnet man das Verhältnis aus Masse m und Volumen V einer Stoffmenge. In der DIN 1306 sind die Bezeichnungen festgelegt.

Gleichung 1

$$\rho = \frac{m}{V}$$

Je nach Fachbereich werden außerdem noch spezielle zusammengesetzte Begriffe der Dichte verwendet:

- Normdichte – die Dichte von Gasen im Normzustand (0 °C und 1013 hPa)
- Schüttdichte – die Dichte eines Pulvers unter nicht definierten Bedingungen, z. B. beim Versand (nach DIN EN ISO 3252) oder der Quotient aus Masse der unverdichteten trockenen Gesteinskörnung in einem festgelegten Messgefäß dividiert durch das Volumen des Messgefäßes (nach DIN EN 1097-3)
- Füllichte – die nach festgelegten Prüfverfahren ermittelte Dichte eines Pulvers im Füllzustand, ist wichtig für die Füllmenge von Pressformen
- Rohdichte – der Quotient aus Masse und dem Volumen, das die Hohlräume eines porösen Stoffes mit einschließt
- Feststoffdichte – der Quotient aus Masse und Volumen des Feststoffes eines porenhaltigen Körpers, d. h. unter Ausschluss des Porenvolumens
- Reindichte – noch gebräuchlich für Feststoffdichte
- Relative Dichte – das Verhältnis einer Dichte ρ zu einer Bezugsdichte ρ_0 eines Bezugstoffes, die
- relative Dichte ist ein Größenverhältnis und hat die Dimension 1
- Teilweise findet man noch die Angabe der Gewichte oder des spezifischen Gewichts, es wird heute fast nicht mehr verwendet.

Gleichung 2

$$\gamma = \frac{G}{V} = \frac{m \times g}{V}$$

Dies ist im Unterschied zur Dichte eine Angabe der Gewichtskraft bezogen auf das Volumen, d. h. die Dichte und das spezifische Gewicht unterscheiden sich um den Faktor der Fallbeschleunigung g .

Einheiten der Dichte

Im Internationalen Einheitensystem ist die Einheit der Dichte kg/m^3 , am häufigsten wird die Einheit g/cm^3 benutzt – das entspricht der Angabe in g/ml . Teilweise findet man auch Angaben in kg/dm^3 .

$$1 \text{ kg/m}^3 = 0,001 \text{ g/cm}^3 \text{ oder: } 1 \text{ g/cm}^3 = 1 \text{ kg/dm}^3 = 1000 \text{ kg/m}^3$$

Abhängigkeit der Dichte von der Temperatur

- Die Dichte aller festen, flüssigen und gasförmigen Stoffe ist abhängig von der Temperatur.
- Die Dichte gasförmiger Stoffe ist außer von der Temperatur auch vom Druck abhängig. Gase sind kompressibel bei „normalen“ Drücken, das bedeutet, dass die Luftdichte sich mit Änderung des Luftdruckes ändert.
- Die Normdichte ist die Dichte eines Gases (oder Gasgemisches) bei Normbedingungen: Temperatur $T = 0 \text{ }^\circ\text{C}$, Druck $p = 101,325 \text{ kPa}$.
- Allgemein gilt: Je höher die Temperatur ist, desto niedriger ist die Dichte. Da sich Materialien bei Wärme ausdehnen, d. h. ihr Volumen zunimmt, nimmt die Dichte ab. Dieser Effekt ist bei Festkörpern weniger stark ausgeprägt als bei Flüssigkeiten, am stärksten macht er sich bei Gasen bemerkbar.
- Die Dichteänderung für ein bestimmtes Temperaturintervall lässt sich mithilfe des Wärmeausdehnungskoeffizienten berechnen; er gibt die Volumenänderung eines Stoffes bezogen auf die Temperatur an. (Siehe „Anhang“ auf Seite 37)
- In den folgenden Diagrammen sind die Dichten verschiedener Substanzen in Abhängigkeit von der Temperatur berechnet und graphisch dargestellt – die senkrechten Achsen zeigen (außer bei Luft) jeweils einen Dichtebereich von $0,06 \text{ g/cm}^3$.
- Die Diagramme zeigen, dass die Temperaturabhängigkeit der Dichte verschiedener Substanzen unterschiedlich stark ausgeprägt ist. Für Dichtemessungen bedeutet das, dass – in Abhängigkeit von der erforderlichen Messgenauigkeit – die Versuchstemperatur sehr genau eingestellt und konstant gehalten werden muss.
- Bei hydrostatischen Dichtebestimmungsmethoden ist es z. B. günstiger mit Wasser als Auftriebsmedium zu arbeiten als mit Ethanol: Bei einer Temperaturerhöhung von z. B. $20 \text{ }^\circ\text{C}$ auf $21 \text{ }^\circ\text{C}$ verringert sich die Dichte des Wassers um nur $0,00021 \text{ g/cm}^3$, die des Ethanols dagegen um $0,00085 \text{ g/cm}^3$ – mehr als das Vierfache. Das heißt, dass die Temperaturkonstanz sorgfältiger kontrolliert werden muss als bei Wasser, oder dass bei Temperaturänderungen während des Versuchs mit einem größeren Fehler bei der Dichtebestimmung gerechnet werden muss.

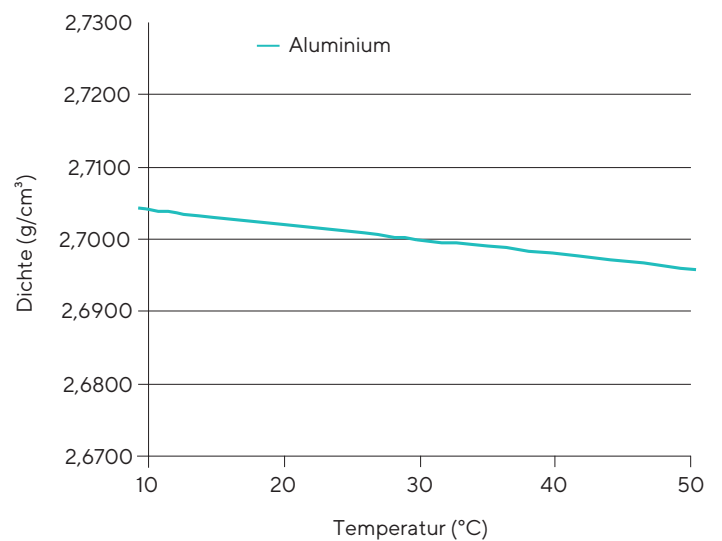
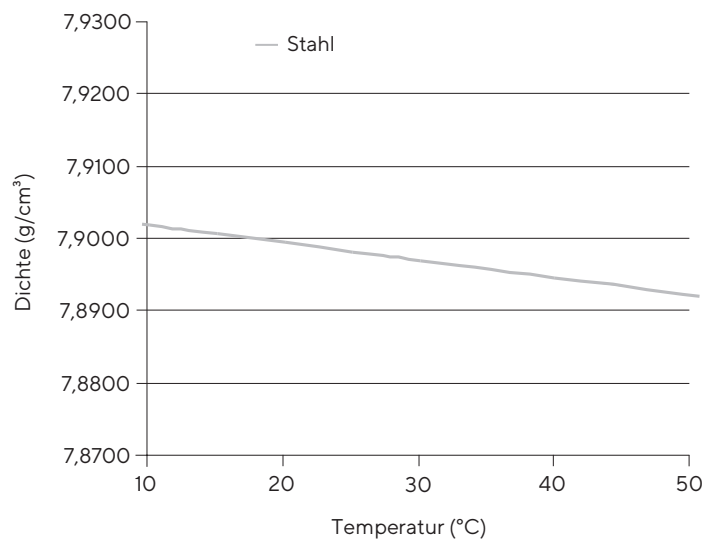
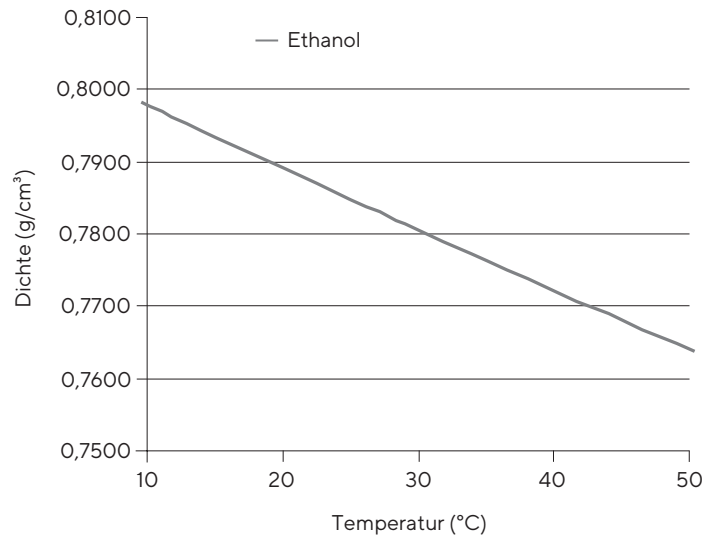
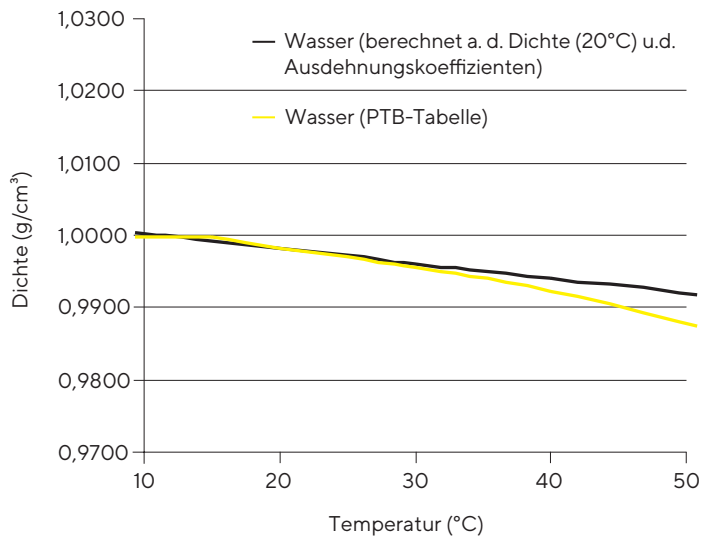
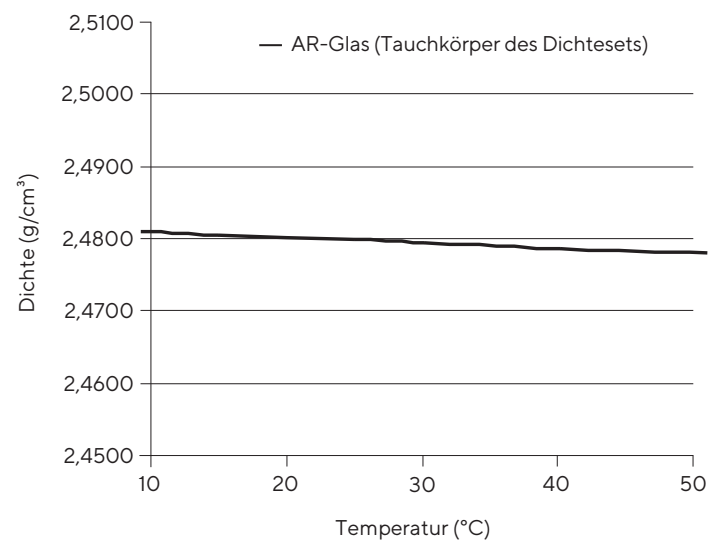
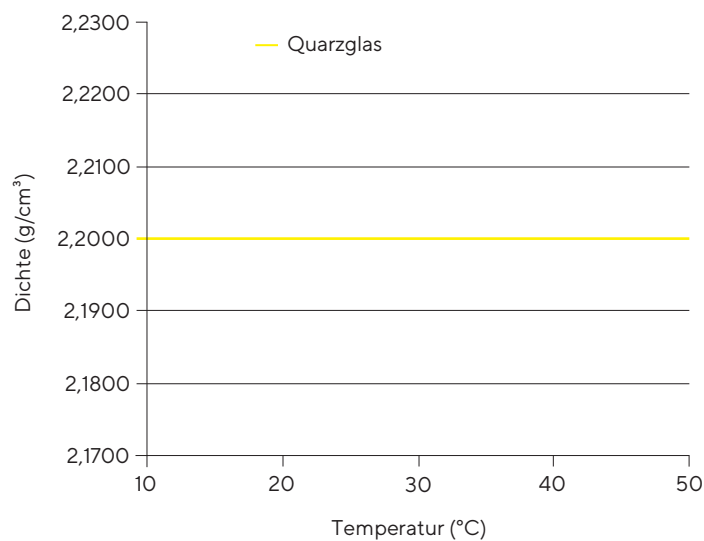


Abbildung 1: Temperaturabhängigkeit der Dichte für Wasser und Ethanol (oben) und für Stahl und Aluminium (unten)



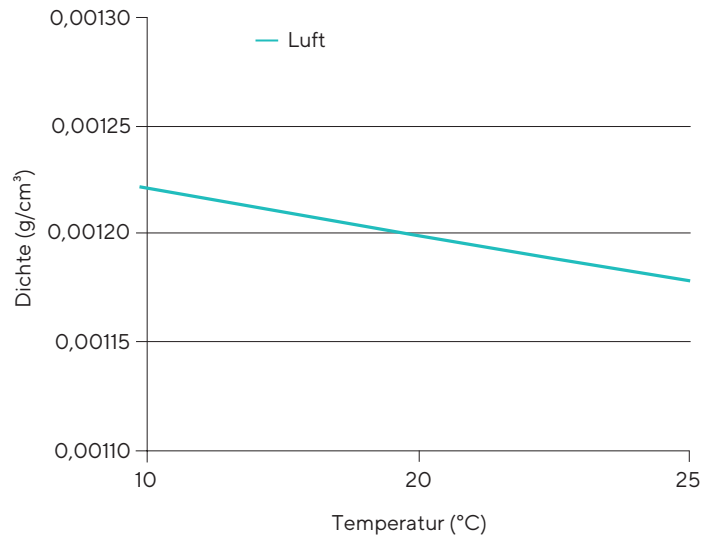
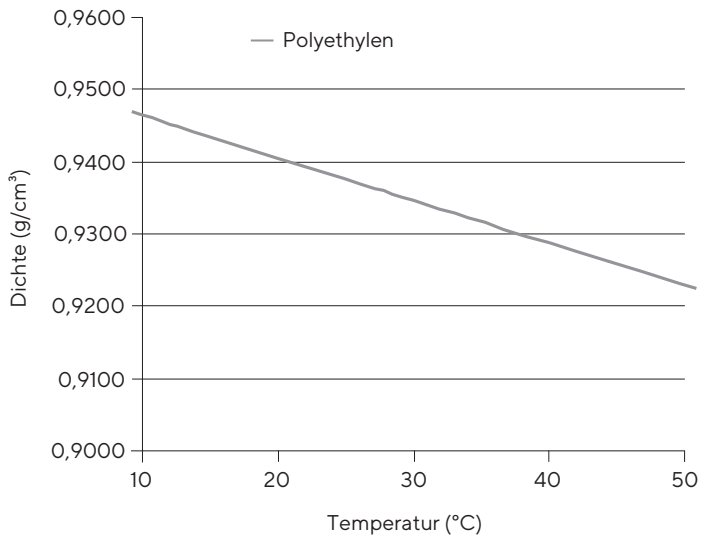


Abbildung 2: Temperaturabhängigkeit der Dichte für Glas, Polyethylen und Luft

Das Prinzip des Archimedes

Will man Materialdichten bestimmen, so benötigt man – laut Definition der Dichte

$$\rho = \frac{m}{V}$$

die Masse und das Volumen der Probe.

Die Bestimmung der Masse kann direkt mit Hilfe einer Waage vorgenommen werden. Die Bestimmung des Volumens kann im allgemeinen nicht direkt erfolgen; Ausnahmen sind geringe Anforderungen an die Genauigkeit und das Vorliegen einfacher geometrischer Körper, wie z. B. Würfel, Quader oder Zylinder, deren Volumen leicht aus den Kantenlängen bzw. Höhe und Durchmesser berechnet werden kann. Das Volumen von Flüssigkeiten kann man in Messzylindern oder Pipetten abmessen – das Volumen von Festkörpern kann man prinzipiell aus dem Anstieg des Flüssigkeitsspiegels nach Eintauchen eines Körpers in einen mit Wasser gefüllten Messzylinder bestimmen.

Auf Grund der Schwierigkeiten bei der genauen Bestimmung des Volumens insbesondere eines unregelmäßig geformten Körpers, geht man bei verschiedenen Verfahren zur Dichtebestimmung einen „Umweg“. Man arbeitet auf der Grundlage des Prinzip des Archimedes, das die Beziehung zwischen Kräften (oder Massen), Volumina und Dichten von in Flüssigkeit eingetauchten Festkörpern beschreibt:

Aus dem täglichen Leben kennt jeder den Effekt, dass Körper in Wasser leichter erscheinen als in Luft – auch der eigene Körper im Schwimmbad. Die Ursache hierfür und die Zusammenhänge zwischen den einzelnen Größen sollen in den folgenden Absätzen verdeutlicht werden.

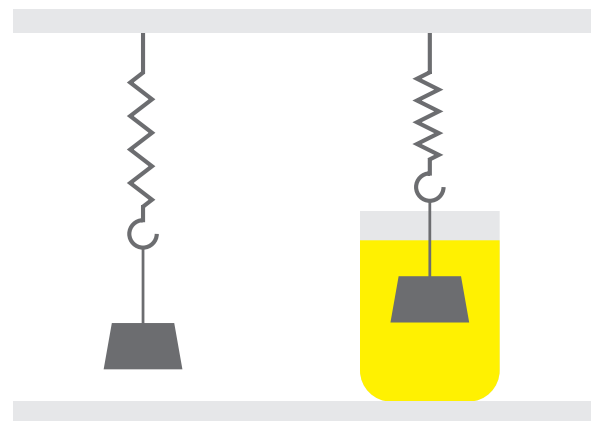


Abbildung 3: Kraft eines Körpers auf eine Federwaage in Luft (links) und in Wasser (rechts)

Auf einen in eine Flüssigkeit getauchten Körper wirken von allen Seiten Kräfte infolge des hydrostatischen Druckes. Die Kräfte in waagerechter Richtung sind entgegengesetzt gleich, d. h. sie heben sich gegenseitig auf.

In senkrechter Richtung nimmt der Druck – je tiefer man unter die Flüssigkeitsoberfläche kommt – immer weiter zu. Der Druck, der in einer Flüssigkeitsebene von der darüberliegenden Flüssigkeitsschicht hervorgerufen wird, wird Schweredruck genannt. Er wird aus der Dichte der Flüssigkeit, der Höhe der Flüssigkeitssäule und der Fallbeschleunigung berechnet:

$$p = \rho_{fl} \times g \times h$$

Entsprechend ist die Kraft, die auf eine Fläche A in der Tiefe h wirkt:

Gleichung 3

$$F = p \times A = \rho_{fl} \times g \times A \times h$$

mit $\rho_{fl} = 1 \text{ g/cm}^3$ und $g \cong 10 \text{ m/s}^2$

	h	p	A	F
1	1 cm	0.01 N/cm ²	1 cm ²	0.01 N
2	10 cm	0.1 N/cm ²	1 cm ²	0.1 N
3	50 cm	0.5 N/cm ²	1 cm ²	0.5 N

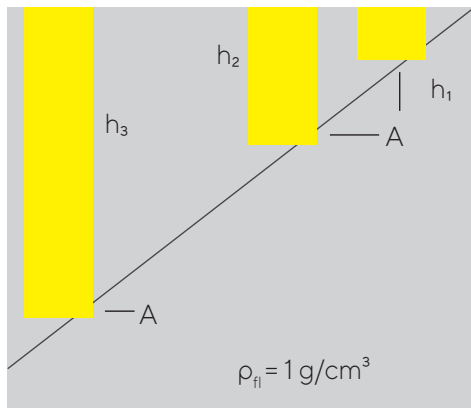


Abbildung 4: Verlauf des Druckes in einer Flüssigkeit

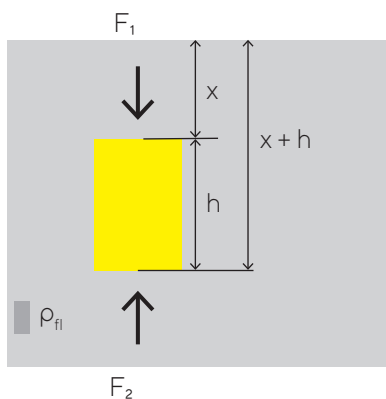


Abbildung 5: Das Zustandekommen des Auftriebs

Auf die Oberfläche eines vollständig in eine Flüssigkeit eingetauchten Körpers mit der Grundfläche A wirkt infolge des Schweredruckes auf die Oberseite die Kraft $F_1 = A \times x \times \rho_{fl} \times g$. Auf die Unterseite wirkt die Kraft $F_2 = A \times (x + h) \times \rho_{fl} \times g$.

Die resultierende Kraft, die auf den Körper wirkt, ergibt sich aus der Differenz dieser beiden Kräfte:

Gleichung 4

$$\begin{aligned} F_{res} &= F_2 - F_1 \\ &= [A \times (x + h) \times \rho_{fl} \times g] - [A \times x \times \rho_{fl} \times g] \\ &= A \times (x + h - x) \times \rho_{fl} \times g \\ &= A \times h \times \rho_{fl} \times g \end{aligned}$$

Das Produkt aus Grundfläche und Höhe des Körpers entspricht dem Volumen dieses Körpers. Gleichzeitig entspricht dieses Volumen dem der verdrängten Flüssigkeitsmenge.

Gleichung 5

$$(A \times h) = V_s - V_{fl}$$

Damit wird die resultierende Kraft zu

Gleichung 6

$$F_{res} = V_{fl} \times \rho_{fl} \times g = F_B$$

Sie wird Auftriebskraft oder kurz Auftrieb (engl. buoyancy) genannt und enthält direkt den Wert für das gesuchte Volumen.

Die Betrachtung der Kräfteverhältnisse auf den eingetauchten Festkörper und das durch ihn verdrängte Flüssigkeitselement zeigt: In senkrechter Richtung wirkt auf den Körper die nach unten gerichtete Gewichtskraft G_s , außerdem die nach oben gerichtete Auftriebskraft F_B . Die resultierende Kraft ergibt sich aus der Differenz dieser beiden Kräfte $F_{res} = G_s - F_B$. Dabei entspricht die auf den Körper wirkende Auftriebskraft F_B der Gewichtskraft G_{fl} der vom Körper verdrängten Flüssigkeitsmenge.

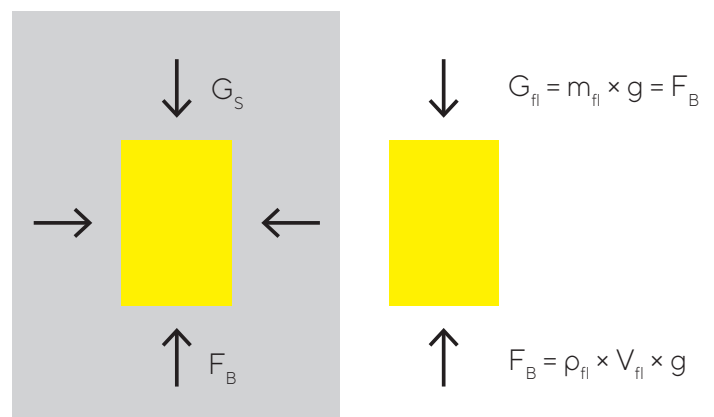


Abbildung 6: Zum Archimedischen Prinzip - links in Flüssigkeit eingetauchter Festkörper, rechts das Flüssigkeitselement

Diese beträgt

Gleichung 7

$$G_{fl} = m_{fl} \times g = \rho_{fl} \times V_{fl} \times g$$

Wenn Festkörper und Flüssigkeitselement sich im Gleichgewicht befinden, muss die Auftriebskraft F_B (dem Betrag nach) gleich der Gewichtskraft G_{fl} sein, d. h.

Gleichung 8

$$F_B = G_{fl}$$

Der Auftrieb entsteht also aufgrund der Druckverhältnisse in einer Flüssigkeit. Die Auftriebskraft ist der Gewichtskraft eines in eine Flüssigkeit eingetauchten Körpers entgegengesetzt. Daraus erklärt sich, dass Körper in einer Flüssigkeit leichter erscheinen als in Luft. In Abhängigkeit vom Verhältnis der Gewichtskraft des Körpers zur Auftriebskraft kann der eingetauchte Körper in der Flüssigkeit zu Boden sinken, schweben oder schwimmen.

Wenn die Auftriebskraft kleiner ist als die Gewichtskraft ($F_B < G_s$), sinkt der Körper zu Boden.

Die Dichte des Festkörpers ist in diesem Fall größer als die der Flüssigkeit ($\rho_s > \rho_{fl}$). Die weit verbreitete Art der Dichtebestimmung nach dem Auftriebsverfahren erfolgt meistens unter diesen Bedingungen.

Wenn die Auftriebskraft gleich der Gewichtskraft ist ($F_B = G_s$), bleibt der Körper vollständig eingetaucht und schwebt in der Flüssigkeit. Da das Volumen des Körpers gleich dem Volumen der verdrängten Flüssigkeit ist, und die Masse des Körpers der Masse der verdrängten Flüssigkeit entspricht, folgt, dass die Dichten von Festkörper und Flüssigkeit gleich sind. Es gibt verschiedene Dichtebestimmungsverfahren, die diese Bedingung ausnutzen (siehe Seite 17).

Wenn die Auftriebskraft größer ist als die Gewichtskraft ($F_B > G_s$), schwimmt der Körper, d. h. er steigt an die Flüssigkeitsoberfläche und taucht nur noch teilweise ein. Er taucht dabei genau so weit in die Flüssigkeit ein, bis das Gewicht des von ihm verdrängten Flüssigkeitsvolumens gleich seinem eigenen Gewicht ist: Im Fall des Schwimmens ist das Volumen der verdrängten Flüssigkeit kleiner als das Festkörpervolumen ($V_{fl} < V_s$), die Dichte der Flüssigkeit ist größer als die Dichte des Festkörpers $\rho_{fl} > \rho_s$. Diese Bedingung wird bei der Dichtebestimmung mit Aräometern (siehe Seite 18) ausgenutzt.

Gravimetrische Methoden der Dichtebestimmung

Auf dem Archimedischen Prinzip basierende Dichtebestimmungsmethoden

Die von Archimedes beschriebenen Zusammenhänge zwischen Masse, Volumen und Dichte von in Flüssigkeiten eingetauchten Festkörpern werden ausgenutzt, um die unbekannt Dichten von Substanzen zu bestimmen. Das Problem bei der Dichtebestimmung liegt in der genauen Bestimmung des Volumens des Probematerials. Wenn man einen Festkörper vollständig in eine Flüssigkeit eintaucht, ist durch die Versuchsanordnung gegeben, dass das Volumen des Festkörpers gleich dem Volumen der verdrängten Flüssigkeitsmenge ist. Unter dieser Voraussetzung lässt sich der folgende allgemeine Zusammenhang zwischen den Dichten und Massen von Flüssigkeit und Festkörper herleiten, in der das Volumen nicht mehr explizit enthalten ist (Herleitung siehe „Anhang“ auf Seite 37):

Gleichung 9

$$\rho_s = \rho_{fl} \times \frac{m_s}{m_{fl}}$$

Die unbekannte Dichte einer festen Substanz kann man also mit einer Hilfsflüssigkeit bekannter Dichte und mit zwei Masse-Messwerten bestimmen

Gleichung 10

$$\rho_{fl} = \rho_s \times \frac{m_{fl}}{m_s} \quad \text{resp.} \quad \rho_{fl} = \frac{m_{fl}}{V_s}$$

Umgekehrt kann die Dichte von Flüssigkeiten unter Verwendung eines Hilfs-Festkörpers aus einem Massewert und dem bekannten Volumenwert des Festkörpers ermittelt werden.

Man kann also die Volumenmessung ersetzen durch einfach und genau durchzuführende Massebestimmungen.

Zur Dichtemessung wird zum Teil noch die sogenannte hydrostatische Waage oder Mohr'sche Waage verwendet. Die Mohr'sche Waage, eine Hebelwaage, ist heute weitgehend ersetzt durch die Dichtesets als Zubehör zu Laborwaagen. Man muss grundsätzlich zwischen zwei hydrostatischen Wägeverfahren unterscheiden. In Abhängigkeit von der Versuchsanordnung haben die jeweils von der Waage angezeigten Messwerte eine andere Bedeutung: Bei der Auftriebsmethode (siehe Abbildung 7 und Abbildung 8) wird das um den Auftrieb verringerte Gewicht des Festkörpers in der Flüssigkeit ermittelt, bei der Verdrängungsmethode (siehe Abbildung 9) wird das Gewicht bzw. die Masse der verdrängten Flüssigkeitsmenge direkt bestimmt.

Weitere auf dem Archimedischen Prinzip basierende Methoden sind die Dichtebestimmung mit Aräometern und die verschiedenen Schwebemethoden (siehe Seite 18).

Auftriebsmethode

Mit Hilfe der Auftriebsmethode wird häufig die Dichte von Festkörpern und Flüssigkeiten bestimmt. Man misst das scheinbare Gewicht eines Körpers in einer Flüssigkeit, d. h. das Gewicht vermindert um die Auftriebskraft, und berechnet daraus und aus dem Gewicht in Luft die gesuchte Dichte.

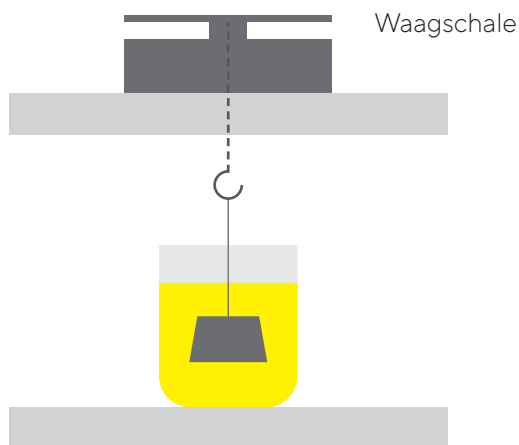


Abbildung 7: Prinzipielle Versuchsanordnungen bei der Auftriebsmethode mit Unterflurwägeeinrichtung

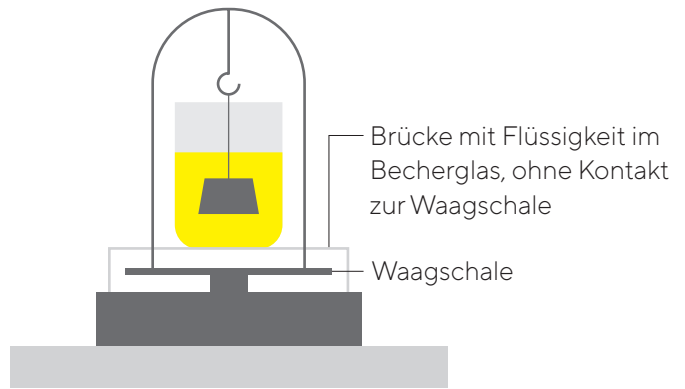


Abbildung 8: Prinzipielle Versuchsanordnungen bei der Auftriebsmethode mit Gestell mit Aufhängevorrichtung für den Tauchkörper und Brücke für den Flüssigkeitsbehälter

Bei der in Abbildung 7 und Abbildung 8 gezeigten Versuchsanordnung entspricht die Anzeige der Waage der um den Auftrieb verminderten Masse des eingetauchten Festkörpers (siehe Abbildung 3). Das heißt, betrachtet man die Gleichung $\rho_s = \rho_{fl} \times (m_s / m_{fl})$, so ist die Masse des Festkörpers in Luft gewogen $m_s = m_{(a)}$ bekannt. Die Masse der Flüssigkeit m_{fl} ist nicht unmittelbar bekannt, sie ergibt sich aber aus der Differenz der Wägung des Festkörpers in Luft ($m_{(a)}$) und der Wägung in Flüssigkeit ($m_{(fl)}$):

$$m_{fl} = m_{(a)} - m_{(fl)}$$

Damit wird Gleichung 2 für die Bestimmung der Festkörperdichte zu:

Gleichung 11

$$\rho_s = \rho_{fl} \times \frac{m_{(a)}}{m_{(a)} - m_{(fl)}}$$

Für den Fall, dass die Flüssigkeitsdichte bestimmt werden soll, so ist wieder m_{fl} aus den Messwerten der Festkörpermasse in Luft und in Flüssigkeit eingetaucht zu berechnen $m_{fl} = m_{(a)} - m_{(fl)}$ und dann in Gleichung 3 einzusetzen. Man erhält die Beziehung zur Bestimmung der Flüssigkeitsdichte mit der Auftriebsmethode

Gleichung 12

$$\rho_{fl} = \rho_s \times \frac{m_{(a)}}{m_{(a)} - m_{fl}} = \frac{m_{(a)} - m_{fl}}{V_s}$$

V_s ist das bekannte Volumen des Tauchkörpers, mit dessen Hilfe die Flüssigkeitsdichte berechnet werden kann. Man kann also mit Hilfe zweier Wägungen die Dichte einer Substanz bestimmen.

Verdrängungsmethode

Mit Hilfe der Verdrängungsmethode kann ebenfalls unter Ausnutzung des Archimedischen Prinzips die Dichte von Festkörpern und Flüssigkeiten bestimmt werden.

Bei der Versuchsanordnung nach dem Verdrängungsprinzip bestimmt man unmittelbar die Masse der durch den Festkörper verdrängten Flüssigkeitsmenge.

Ein Behälter mit Flüssigkeit steht direkt auf der Waagschale während der Festkörper eingetaucht wird. Dabei ist der Festkörper in der Regel an einem Stativ aufgehängt. Beim Eintauchen in die Flüssigkeit verdrängt der Festkörper das Flüssigkeitsvolumen V_{fl} mit der Dichte ρ_{fl} und der Masse m_{fl} . Die auf den Festkörper wirkende Auftriebskraft ist $F_B = \rho_{fl} \times V_{fl} \times g = m_{fl} \times g$. Da das Gewicht des Festkörpers $G_s = m_s \times g$ vom Stativ gehalten wird und die Waage nicht belastet, entspricht die Anzeige der Waage direkt der Flüssigkeitsmasse m_{fl} – vorausgesetzt, die Waage wurde vorher mit dem Flüssigkeitsbehälter tariert.

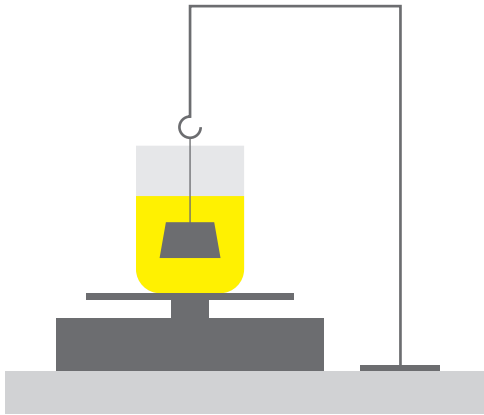


Abbildung 9: Prinzipielle Versuchsanordnung bei der Verdrängungsmethode

Das heißt, im Fall der Verdrängungsmethode können die Gleichungen 2 und 3 (siehe Seite 10) direkt zur Dichtebestimmung angewendet werden. Für die Festkörperdichte gilt:

Gleichung 13

$$\rho_s = \rho_{fl} \times \frac{m_s}{m_{fl}}$$

beziehungsweise zur Bestimmung der Flüssigkeitsdichte

Gleichung 14

$$\rho_{fl} = \rho_s \times \frac{m_{fl}}{m_s} = \frac{m_{fl}}{V_s}$$

Verwendet man einen Tauchkörper mit bekanntem Volumen V_s , so kann man die unbekannte Dichte ρ_{fl} einer Flüssigkeit aus nur einem Messwert errechnen.

Bestimmung der Dichte von Luft

Um den Wägewert in die wahre Masse umrechnen zu können, benötigt man den Wert der Luftdichte.

Diese kann im Laufe eines Tages um durchschnittlich $\pm 0,05 \text{ mg/cm}^3$ bezogen auf die Normdichte von $1,2 \text{ mg/cm}^3$ variieren. Daher muss die Luftdichte für Massebestimmungen mit einer relativen Messunsicherheit $< 5 \times 10^{-4}$ aktuell bestimmt werden. Die Luftdichte ρ_a ist abhängig von der Temperatur T , dem Druck p und der relativen Feuchte der Luft φ . Es gibt verschieden genaue Näherungsgleichungen, mit deren Hilfe die Luftdichte in Abhängigkeit von Luftdruck, Temperatur und Luftfeuchte, evtl. noch unter Berücksichtigung des CO_2 -Gehalts der Luft berechnet werden kann.

Außerdem ist es mit hochauflösenden Waagen möglich, die Luftdichte (mit einem Fehler von $\approx 1\%$) zu bestimmen. Man verwendet dazu zwei verschiedene kalibrierte Gewichtstücke aus Materialien unterschiedlicher Dichte (z. B. Aluminium und Stahl). Basis der Bestimmungsmethode ist auch hier das Prinzip des Archimedes. Da auch Luft aus Materie besteht, erfahren Körper in Luft genauso eine Auftriebskraft wie in einer Flüssigkeit. Es gelten dieselben Gesetzmäßigkeiten wie in Kapitel „Das Prinzip des Archimedes“ beschrieben.

Betrachtet man – zunächst in Vakuum – einen Aluminiumzylinder mit der Dichte $\rho_{Al} \approx 2,7 \text{ g/cm}^3$ (Abbildung 10, links), so befindet er sich im Gleichgewicht mit einem Gewichtsnorm ($\rho_N = 8,000 \text{ g/cm}^3$) derselben Masse.

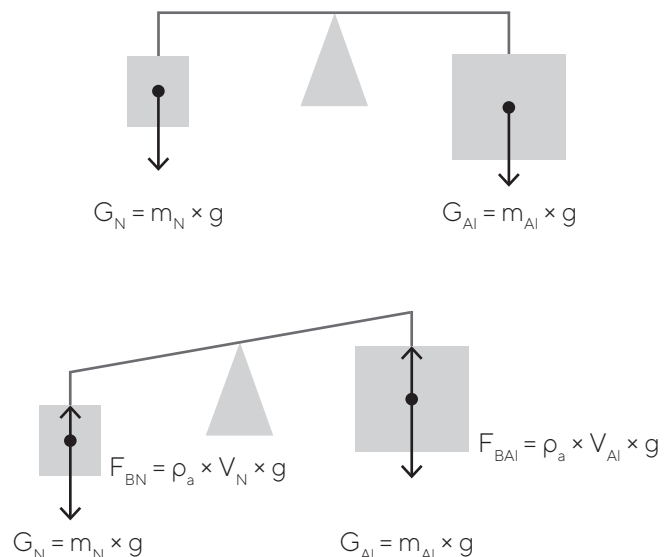


Abbildung 10: Einfluss des Luftauftriebs bei der Wägung in Vakuum (oben) und in Luft (unten)

Betrachtet man dieselbe Anordnung in Luft (Abbildung 10, rechts), so befinden sich der Aluminiumzylinder und das Norm nicht mehr im Gleichgewicht. Die Ursache sind die – aufgrund der unterschiedlichen Materialdichten und damit unterschiedlichen Volumina – unterschiedlichen Auftriebskräfte.

Um festzustellen, welche Masse m_N dem Aluminiumzylinder (m_{Al}) in Luft mit der Dichte ρ_a das Gleichgewicht hält, werden alle wirkenden Kräfte im Gleichgewicht betrachtet:

Gleichung 15

$$G_N - F_{BN} = G_{Al} - F_{BAI}$$

$$\underbrace{m_N \times g}_{\text{Gewichtskraft}} - \underbrace{\rho_a \times V_N \times g}_{\text{Auftriebskraft}} = \underbrace{m_{Al} \times g}_{\text{Gewichtskraft}} - \underbrace{\rho_a \times V_{Al} \times g}_{\text{Auftriebskraft}}$$

Nach Umformung und Einsetzen von

$$V_N = \frac{m_N}{\rho_N} \quad \text{und} \quad V_{Al} = \frac{m_{Al}}{\rho_{Al}}$$

erhält man schließlich

Gleichung 16

$$m_{Al} = m_n \times \frac{1 - \frac{\rho_a}{\rho_N}}{1 - \frac{\rho_a}{\rho_{Al}}}$$

m_N wird als Wägewert W bezeichnet. Der Wägewert entspricht im allgemeinen der Anzeige der Waage.

Der Wägewert

$$W_{Al} = m_{Al} \times \frac{1 - \frac{\rho_a}{\rho_{Al}}}{1 - \frac{\rho_a}{\rho_N}}$$

ist nicht konstant, sondern abhängig von der Luftdichte – sozusagen vom Wetter. Diese Beziehung gilt entsprechend für den Stahlzylinder des Luftdichtebestimmungssets:

$$W_{St} = m_{St} \times \frac{1 - \frac{\rho_a}{\rho_{St}}}{1 - \frac{\rho_a}{\rho_N}}$$

Aus diesen beiden Gleichungen lässt sich eine Beziehung zur Bestimmung der Luftdichte ableiten (siehe Anhang „Luftdichtebestimmung“ auf Seite 38):

Gleichung 17

$$\rho_a = \frac{\frac{m_{Al} \times W_{St}}{\rho_{Al}} - \frac{m_{St} \times W_{Al}}{\rho_{St}}}{\frac{m_{Al} \times W_{St}}{\rho_{Al}} - \frac{m_{St} \times W_{Al}}{\rho_{St}}}$$

W_{St} und W_{Al} sind die Wägewerte, die aktuell gemessen werden.

m_{St} und m_{Al} werden anhand der konventionellen Wägewerte und der Dichten der zertifizierten Gewichtsstücke berechnet nach der Beziehung

Gleichung 18

$$m_{St} = M_{St} \times \frac{1 - \frac{1.2 \text{ kg/m}^3}{8000 \text{ kg/m}^3}}{1 - \frac{1.2 \text{ kg/m}^3}{\rho_{St}}}$$

and

$$m_{Al} = M_{Al} \times \frac{1 - \frac{1.2 \text{ kg/m}^3}{8000 \text{ kg/m}^3}}{1 - \frac{1.2 \text{ kg/m}^3}{\rho_{Al}}}$$

Der konventionelle Wägewert M eines Gewichtstückes ist nicht die Masse dieses Stückes selbst, sondern er entspricht der Masse des Bezugsgewichtes (Massenormal), das unter definierten Bedingungen* mit dem betrachteten Gewichtsstück im Gleichgewicht steht.

Mit den im Luftdichtebestimmungsset angegebenen konventionellen Wägewerten der Gewichte (als Kennwerte der Gewichte bezeichnet), den Materialdichten der Gewichte und aus den aktuellen Wägewerten kann damit die Luftdichte ρ_a berechnet werden.

Die Formel zur Berechnung der Luftdichte einschließlich der Werte $\rho_{St} = 8,000 \text{ g/cm}^3$ und $\rho_{Al} = 2,700 \text{ g/cm}^3$ ist in der Software einiger Sartorius-Waagen integriert. Der aktuelle Wert der Luftdichte kann gespeichert werden und wird anschließend verwendet, um die Wägewerte in die tatsächlichen Massen des Wägeguts umzurechnen – nach der am Anfang des Kapitels hergeleiteten Formel

$$m = W \times \frac{1 - \frac{\rho_a}{\rho_N}}{1 - \frac{\rho_a}{\rho_x}}$$

*Temperatur $T = 20 \text{ °C}$
Dichte des Massennormal bei 20 °C : $\rho_N = 8000 \text{ kg/m}^3$
Luftdichte $\rho_a = 1,2 \text{ kg/m}^3$

Dichtebestimmung mit Pyknometern

Pyknometer sind Glas- oder Metallgefäße mit genau bestimmtem Volumen zur Ermittlung der Dichte von Flüssigkeiten und Dispersionen durch einfaches Auswägen des definierten Volumens, insbesondere aber auch zur Dichtebestimmung von Pulvern und Granulaten. Sie werden auch zur Bestimmung der Feststoffdichte von porösen Festkörpern verwendet, wobei das Material vor der Dichtebestimmung soweit zerkleinert werden muss, dass alle Poren geöffnet werden.

In verschiedenen Bereichen haben sich unterschiedlich geformte und genormte Pyknometer durchgesetzt. Bei den Messungen ist darauf zu achten, dass alle Wägungen bei konstanter Temperatur durchgeführt werden und dass weder in der Flüssigkeit noch zwischen den Partikeln Luft eingeschlossen ist.

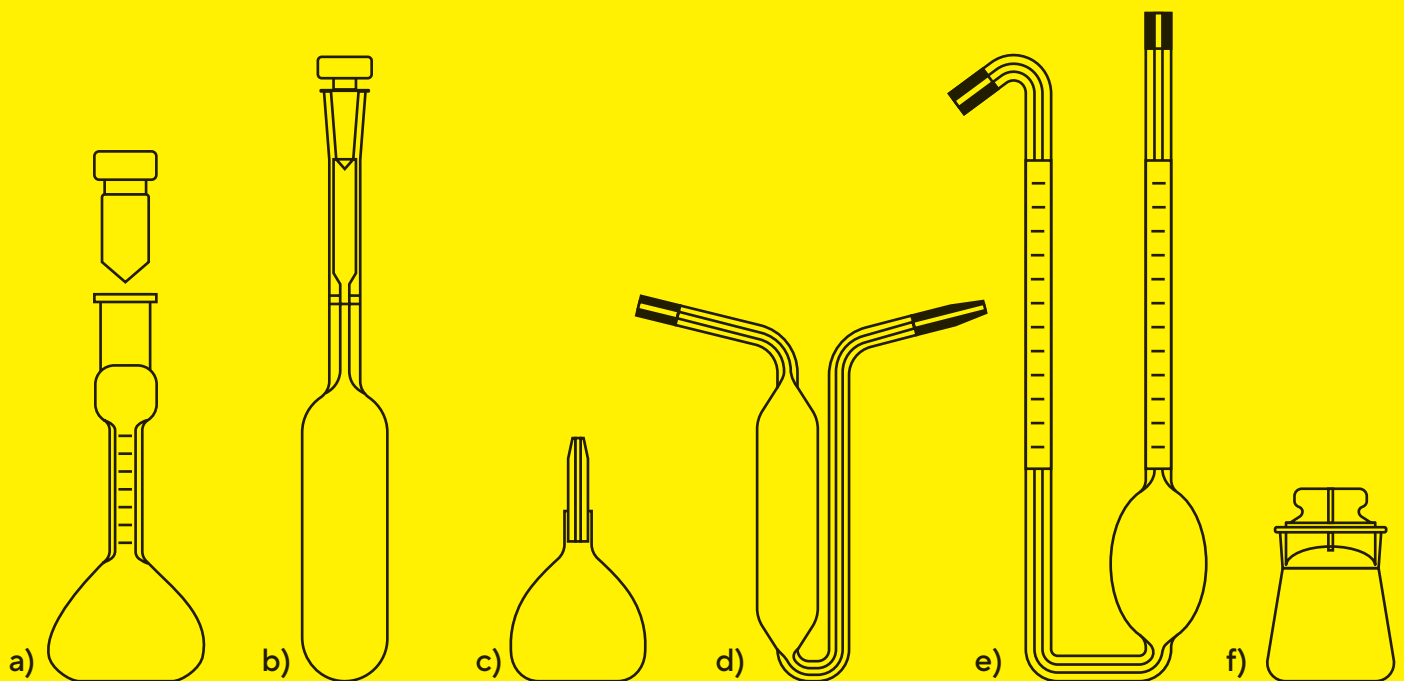


Abbildung 11: Beispiele für gebräuchliche Glaspyknometer für Dichtebestimmungen im Labormaßstab

Note: Die Pyknometer nach Gay-Lussac, DIN EN 12797 (c) und nach Hubbard, DIN EN 12806, (f) werden für Feststoffdichtebestimmungen verwendet, das angegebene Volumen gilt für vollständige Füllung nach Einsetzen des Stopfens; die Pyknometer nach Bingham, DIN 12807, (b) und nach Sprengel, ISO 12800, (d) haben eine Ringmarke, die das angegebene Volumen markiert; die Pyknometer nach Reischauer, DIN ISO 3507, (a) und Lipkin, DIN ISO 3507, (e) haben Skalen zum Ablesen des Volumens.

Wägen eines definierten Volumens („Litergewicht“)

Eine besonders einfache gravimetrische Methode zur Bestimmung der Dichte von fließfähigen Substanzen (Flüssigkeiten, Pulvern, dispersen Systemen) ist das Wägen einer Probemenge mit definiertem Volumen. Dabei wird die zu bestimmende Probe in ein Gefäß mit bekanntem Volumen eingefüllt und die Masse der Probe (nach dem Trieren) anhand einer einzigen Wägung bestimmt. Nach $\rho = m / V$ kann einfach die Dichte berechnet werden.

In verschiedenen Industriebereichen gibt es unterschiedliche standardisierte oder genormte Behälter, zum Beispiel kegelförmige 1 L-Gefäße zur Bestimmung der Dichte von Gießmassen (Schlickern) in der keramischen Industrie. In der Kalkindustrie wird die Schüttdichte von Branntkalk-Körnungen mit einem genormten Verfahren bestimmt. Dabei ist sowohl das Gefäß zur Aufnahme des Probematerials als auch die Vorgehensweise bei der Befüllung genau festgelegt. Nach U.S. und British Standard gibt es zylinderförmige Edelstahlbehälter, die sogenannten specific gravity cups, mit unterschiedlichen Volumina und unterschiedlicher Toleranz des Volumens.

Pyknometermethode

Die Pyknometermethode ist ein sehr genaues Verfahren zur Bestimmung der Dichte von Pulvern, Granulaten und schwer fließfähigen Dispersionen. Im Vergleich zum Auftriebs- und Verdrängungsverfahren ist es arbeits- und deutlich zeitintensiver.

Auch hier stellt sich wieder das Problem der genauen Volumenbestimmung einer Pulverprobe V_s für die Dichtebestimmung des Feststoffs ρ_s . Die explizite Volumenbestimmung an Pulvern oder Granulaten wird im Prinzip durch drei Wägungen und die Verwendung einer Hilfsflüssigkeit mit bekannter Dichte umgangen.

Gleichung 19

$$\rho_s = \frac{m_s}{V_s}$$

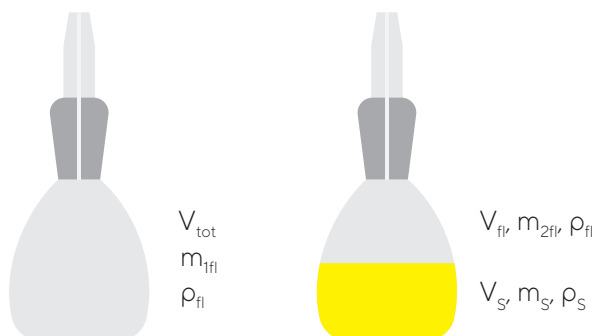


Abbildung 12: Pyknometer mit Inhalt

Das Volumen des Feststoffs V_s kann nur indirekt bestimmt werden:

Gleichung 20

$$V_s = V_{tot} - V_{fl}$$

Man geht dabei schrittweise vor:

- zunächst wird die Masse der Flüssigkeit des vollständig mit Flüssigkeit gefüllten Pyknometers bestimmt. Anhand der Flüssigkeitsdichte ist damit das Volumen des Pyknometers V_{tot} bekannt.

Gleichung 21

$$V_{tot} = \frac{m_{1fl}}{\rho_{fl}}$$

- Anschließend (nach Entleeren, Reinigen, Trocknen und Temperieren des Pyknometers) wird das mit Probenmaterial zu ca. $\frac{2}{3}$ gefüllte Pyknometer gewogen, man erhält also die Masse des verwendeten Pulvers m_s .
- Als nächstes wird das Pyknometer mit dem Probenmaterial vollständig mit der Flüssigkeit aufgefüllt und wieder gewogen, man bestimmt die Masse von Probe und Flüssigkeit gemeinsam $m_{(fl+s)}$.

Daraus lässt sich die Masse der Flüssigkeit m_{2fl} errechnen

Gleichung 22

$$m_{2fl} = m_{(fl+s)} - m_s$$

und damit auch das Volumen V_{fl} der Flüssigkeit in dem mit Probenmaterial und Flüssigkeit gefüllten Pyknometer

Gleichung 23

$$V_{fl} = \frac{m_{2fl}}{\rho_{fl}} = \frac{m_{(fl+s)} - m_s}{\rho_{fl}}$$

Das eigentlich interessierende Volumen der pulverförmigen Probe V_s ergibt sich aus der Differenz des Gesamtvolumens V_{tot} und dem Volumen der Flüssigkeit V_{fl} .

$$V_s = V_{tot} - V_{fl}$$

Gleichung 24

$$V_s = \frac{m_{1fl}}{\rho_{fl}} = \frac{m_{(fl+s)} - m_s}{\rho_{fl}}$$

Setzt man nun das Volumen V_s in die Ausgangsgleichung $\rho_s = m_s/V_s$ ein, so folgt nach Umformung*

Gleichung 25

$$\rho_s = \rho_{fl} \times \frac{m_s}{m_{fl} - m_{(fl+s)} + m_s} \quad \text{or} \quad \rho_s = \rho_{fl} \times \frac{m_2}{m_1 + m_2 - m_3}$$

$$*\rho_s = \frac{m_s}{V_s} = \frac{m_s}{\frac{m_{fl}}{\rho_{fl}} - \frac{m_{(fl+s)} - m_s}{\rho_{fl}}} = \frac{m_s}{\frac{m_{fl} - (m_{(fl+s)} - m_s)}{\rho_{fl}}} = \frac{\rho_{fl} \times m_s}{m_{fl} - (m_{(fl+s)} - m_s)}$$

mit den Massen m_1 , m_2 und m_3 in der Reihenfolge der durchzuführenden Arbeitsschritte:

Massen

m_1	Masse der Flüssigkeit im vollständig mit Flüssigkeit gefüllten Pyknometer
m_2	Masse des Probenmaterials
m_3	Masse von Probe und Flüssigkeit im aufgefüllten Pyknometer

Das heißt, auch mithilfe dieses Verfahrens ist es möglich, die Volumenmessung zur Dichtebestimmung „auf Umwegen“ durch mehrere Massenbestimmungen zu ersetzen.



Andere Methoden zur Dichtebestimmung

Es gibt noch andere Methoden zur Dichtebestimmung, die ebenfalls auf dem Archimedischen Prinzip basieren. Mit Hilfe von zwei Festkörpern unterschiedlicher Dichte (z. B. zwei Gewichtsstücken aus unterschiedlichen Metallen), kann die Dichte der Luft bestimmt werden.

Schließlich kann die Dichte noch über die Schwächung radioaktiver Strahlung durch das zu untersuchende Material bestimmt werden. Die Absorption der Strahlung ist abhängig vom Massenabsorptionskoeffizienten des Materials, dessen Schichtdicke und seiner Dichte. Bei Kenntnis der entsprechenden Größen und des physikalischen Zusammenhanges kann dann die Dichte einer Substanz berechnet werden.

Bei magnetischen Proben werden auch magnetische Kräfte ausgenutzt, um die Dichten von Festkörpern oder Flüssigkeiten zu bestimmen.

Biege-Schwinger-Methode | Schwingungsverfahren

Die Biegeschwinger-Methode ist ein verbreitetes Messverfahren zur Bestimmung der Dichte von homogenen Flüssigkeiten. Dieses Messverfahren ist nicht geeignet für Suspensionen oder Emulsionen, die, da sie aus mehreren Phasen bestehen, entmischen können.

Die zu untersuchende Probe wird in einer Messzelle (meist ein U-förmig gebogenes Glasrohr) in mechanische Schwingungen versetzt. Zur Berechnung der Probendichte wird der physikalische Zusammenhang zwischen der Eigenfrequenz der Schwingung und der Masse des Schwingers (U-Rohr mit Probe gefüllt) ausgenutzt. Die Geräte müssen mit Flüssigkeiten bekannter Dichte und einer der Probenflüssigkeit ähnlichen Viskosität kalibriert werden.

Schwebeverfahren

Die Schwebeverfahren nutzen das Prinzip des Archimedes, und zwar den Sonderfall des Schwebens, bei dem die Dichten der Flüssigkeit und des darin schwebenden Festkörpers gleich sind.

Festkörperdichten können bestimmt werden, indem die Dichte einer Testflüssigkeit so eingestellt wird, dass der Probekörper den Zustand des Schwebens erreicht. Die Dichteeinstellung der Testflüssigkeit kann über gezielte Temperaturveränderung erfolgen – bei genauer Kenntnis der Dichte der Testflüssigkeit in Abhängigkeit von der Temperatur. Die Dichteeinstellung der Flüssigkeit kann auch über die Mischung zweier Flüssigkeiten unterschiedlicher Dichten erfolgen, die Dichte ist dann über das Mischungsverhältnis der Flüssigkeiten bestimmt oder muss zum Beispiel mit der Biege-Schwinger-Methode (siehe Seite 17) oder dem Verdrängungsverfahren bestimmt werden.

Dichtegradientensäule

Bei Dichtegradientensäulen werden zwei Flüssigkeiten unterschiedlicher Dichte in einem Glasrohr übereinander geschichtet, sodass sich im Laufe der Zeit durch Diffusion ein senkrechter Dichtegradient (eine kontinuierliche Änderung der Dichte über die Höhe der Säule) einstellt. Kleine Festkörper unterschiedlicher Dichte schweben dann in unterschiedlicher Höhe. Zur Kalibrierung gibt es farbige Glaskugeln bekannter Dichte.

Außer kleinen Festkörpern (zum Beispiel Fasern, Pulverpartikeln, Folienstücken) können auch Flüssigkeitstropfen in Dichtegradientensäulen auf ihre Dichte untersucht werden – die Flüssigkeit sollte allerdings unlöslich in den Flüssigkeiten der Gradientensäule sein.

Schlierenmethode

Hält man ein mit Flüssigkeit gefülltes Kapillarrohr, das im unteren Bereich waagrecht verläuft, in eine andere Flüssigkeit, so strömt die Flüssigkeit aus dem Kapillarrohr nur dann waagrecht aus, wenn die Dichten der beiden Flüssigkeiten übereinstimmen. Wenn die Dichte der ausströmenden Flüssigkeit niedriger ist, bilden sich Schlieren, die aufsteigen. Ist die Dichte der ausströmenden Flüssigkeit höher als die der umgebenden Flüssigkeit, so bilden sich nach unten absinkende Schlieren aus.

Aräometer

Aräometer, auch als Spindeln oder Senkwaagen (engl. hydrometer) bezeichnet, sind einfache Messgeräte zur Bestimmung der Dichte von Flüssigkeiten oder Dispersionen. Es handelt sich dabei um Tauchkörper, die an der Oberfläche schwimmen und je nach Dichte der Flüssigkeit unterschiedlich tief eintauchen. Der Dichtewert der Flüssigkeit kann an Hand der Eintauchtiefe (des Volumens der verdrängten Flüssigkeitsmenge) auf einer Skala am Aräometer direkt abgelesen werden. – Für bestimmte Anwendungsbereiche gibt es auch Aräometer, die auf ihrer Skala nicht Zahlenwerte für die Dichte angeben sondern unmittelbar die Konzentration von Zucker (Saccharimeter), Alkohol (Alkoholometer), Batteriesäure oder Frostschutzmittel in wässriger Lösung.

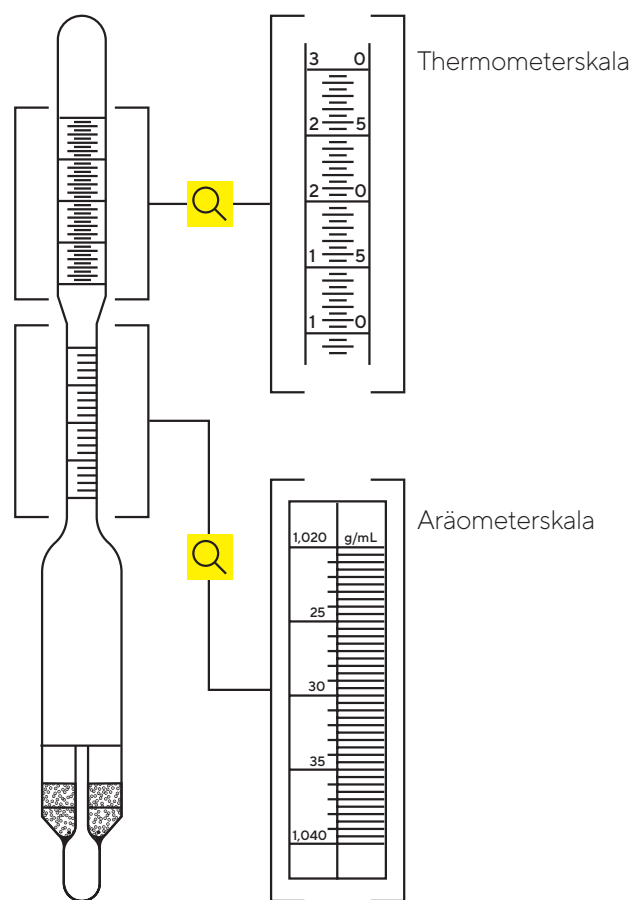


Abbildung 13: Spezielles Aräometer mit integriertem Thermometer nach DIN 10290 zur Bestimmung der Dichte von Milch und Magermilch – die Dichte ist abhängig vom Fettgehalt der Milch



Anwendungsbeispiele

Bestimmung der Dichte von Festkörpern

Besonderheiten der Proben

Festkörper sind bei Atmosphärendruck volumen- und formbeständig. Beispiele für Festkörper, deren Dichte von Interesse ist, sind Metalle, Glas, oder Kunststoffe. Diese Festkörper können aus nur einer oder aus mehreren festen Phasen bestehen, dabei kann eine Phase in eine andere eingebettet sein (glasfaserverstärkter Kunststoff) oder die festen Phasen können fest miteinander „verzahnt“ sein – wie die vielen kleinen Kristalle in einem homogenen metallischen Werkstoff. Wichtig bei der Probenahme für die Dichtebestimmung ist die Frage, ob die Dichte als Werkstoffeigenschaft ermittelt werden soll oder ob die Dichtebestimmung als einfaches Verfahren zur Suche von Materialfehlern – z. B. Rissen oder Hohlräumen im Werkstoff – eingesetzt wird. Davon abhängig ist auch die Auswahl der Messmethode.

Geeignete Dichtebestimmungsmethoden

Für Festkörper geeignete Dichtebestimmungsmethoden sind die auf dem Archimedischen Prinzip basierende Auftriebs- und die Verdrängungsmethode, außerdem können auch Schwebeverfahren eingesetzt werden. Voraussetzung bei der Auftriebs- oder Verdrängungsmethode ist das Arbeiten mit einer Auftriebsflüssigkeit, die nicht mit der eingetauchten Probe reagiert, diese aber möglichst gut benetzt. Das Schwebeverfahren ist zum Beispiel in der Glasindustrie verbreitet: Die Glasproben werden in eine organische Flüssigkeit gegeben, auf der sie bei Raumtemperatur schwimmen. Da die Temperaturabhängigkeit der Dichte der verwendeten Flüssigkeit ungefähr 100 mal größer ist als die Temperaturabhängigkeit

der Dichte des Glases, kann die Glasprobe durch langsame Temperaturerhöhung des Systems zum Schweben gebracht werden und so die Dichte des Glases bestimmt werden.

Durchführen einer Dichtebestimmung nach der Verdrängungsmethode

Benötigte Hilfsmittel und Geräte

- Waage
- Thermometer
- Stativ mit Haltevorrichtung für den Probekörper
- Becherglas mit Auftriebsflüssigkeit bekannter Dichte – destilliertes Wasser für alle Werkstoffe, die nicht mit Wasser reagieren

Probenvorbereitung, Versuchsdurchführung und Auswertung

Auf die Waage wird ein Becherglas mit Flüssigkeit gestellt und die Haltevorrichtung für den Probekörper in die Flüssigkeit eingetaucht – genau so tief wie anschließend bei der Wägung mit Probekörper. Die Waage wird tariert.

- Der Probekörper wird neben das Becherglas auf die Waagschale gelegt. Die Masse des Probekörpers in Luft $m_{(a)}$ wird ermittelt.
- Der Probekörper wird in die Haltevorrichtung gebracht und in die Flüssigkeit eingetaucht. Die Waage zeigt direkt die Masse der verdrängten Flüssigkeit $m_{(fl)}$ an.

Die Dichte des Probekörpers ρ berechnet sich nach

$$\rho = \rho_{fl} \frac{m_{(a)}}{m_{(fl)}}$$

Bestimmung der Dichte von porösen Festkörpern

Besonderheiten der Proben

Bei porösen Werkstoffen sind mit der Dichte eng verknüpft Begriffe wie Feststoffdichte, Reindichte, Rohdichte, Gesamtporosität, offene Porosität oder geschlossene Porosität.

Poröse Festkörper bestehen aus einer oder mehreren festen Phasen und den Poren. Poren sind mit Luft (oder einem anderen Gas) gefüllte Hohlräume. Sie befinden sich entweder zwischen einzelnen Kristallen des Feststoffs oder als Gasblasen eingeschlossen in Glasphasen, d. h. nichtkristallin erstarrten Schmelzphasen. Damit gibt es grundsätzlich zwei Arten von Poren: offene und geschlossene. Von den offenen Poren wiederum gehört nur ein Teil zu den sogenannten durchströmbaren Poren, oder ein anderer Teil zu den tränkbaaren Poren – bei diesen Bezeichnungen sind immer zusätzliche Angaben zur Art des Tränkungsmediums und den Umgebungsbedingungen erforderlich (z. B. Wasser bei einer Temperatur von 22 °C und einem Druck von 2500 Pa).

Man spricht von Poren, wenn der „Durchmesser“ in der Größenordnung von 1 nm bis 1 mm liegt – bei Abmessungen >1 mm spricht man von Rissen oder Lunkern, < 1 nm handelt es sich um Hohlräume im Kristallgitter. Poren sind wichtige Bestandteile des Gefüges zahlreicher unterschiedlicher Werkstoffe; ihre Menge, Art, Form, Orientierung, Größe und Größenverteilung hat einen großen Einfluss auf wichtige Werkstoff- und Endprodukteigenschaften, z. B. die Frostbeständigkeit von Dachziegeln oder die Isolierfähigkeit von Kalksandsteinen oder Porenbeton. Auch die mechanische Festigkeit oder die Korrosionsbeständigkeit werden durch Poren im Werkstoff beeinflusst.

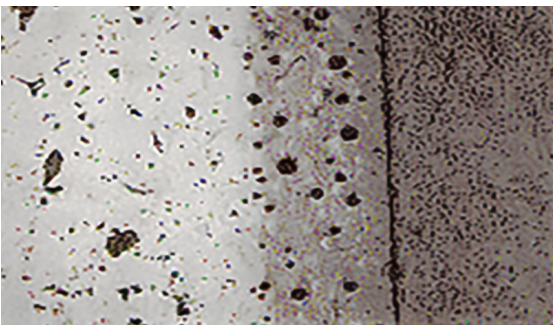


Abbildung 14: Gefüge eines Porzellantellers im Anschliff, ca. 80fache Vergrößerung

Note: links das Porzellan mit unregelmäßig geformten Poren zwischen verschiedenen Phasen, rechts die während des Brennens aufgeschmolzene Glasurschicht mit geschlossenen kugelförmigen Poren (Blasen), ganz rechts Kunstharz als Einbettungsmedium für die Anschliffpräparation

Bei der Dichtebestimmung ist zu unterscheiden, ob die Dichte des reinen Feststoffs bestimmt werden soll oder die Dichte des Festkörpers einschließlich Feststoff und Poren; schließlich kann auch die Porosität von Interesse sein.

- Die reine Feststoffdichte (nicht die Festkörperdichte) wird einfach als „Dichte“ bezeichnet, früher häufig als „Reindichte“: $\rho_t = m/V_{\text{Feststoff}}$. Die Poren gehen also nicht mit in diesen Dichtewert ein.
-
- Als Rohdichte (bulk density) bezeichnet man den Quotienten aus Masse und Gesamtvolumen der Probe: $\rho_b = m/V_b$. Die Rohdichte ist eine mittlere Dichte aus der Dichte des Feststoffs und dem in den Poren enthaltenen Gas.
- Die offene Porosität ist das Volumenverhältnis von offenen Poren zum Gesamtvolumen des porösen Körpers in Prozent: $\pi_a = V_a/V_b$.
- Die geschlossene Porosität ist das Volumenverhältnis von geschlossenen Poren zum Gesamtvolumen des porösen Körpers in Prozent: $\pi_f = V_f/V_b$.
- Die Gesamtporosität ist das Verhältnis des Volumens aller Poren zum Gesamtvolumen des Werkstoffes in Prozent: $\pi_t = V_t/V_b$.
- Die Gesamtporosität ist die Summe aus offener und geschlossener Porosität: $\pi_t = \pi_a + \pi_f$.

Geeignete Dichtebestimmungsmethoden

Geeignete Dichtebestimmungsverfahren für poröse Festkörper sind sowohl die Auftriebs- als auch die Verdrängungsmethode. Die Bestimmung der Feststoffdichte kann – nach Aufmahlen der Proben bis zu einer mittleren Korngröße in der Größenordnung der Porengröße – auch nach der Pyknometermethode durchgeführt werden.

Will man die Rohdichte von porösen Festkörpern bestimmen, so werden manchmal die Probekörper mit einer Wachs- oder Latexhülle überzogen (siehe z. B. DIN EN ISO 2738) sodass offene Poren während des Versuchs keine Flüssigkeit aufnehmen können. Anschließend kann eine Dichtebestimmung nach dem Auftriebsverfahren durchgeführt werden.

Durchführen einer Dichtebestimmung nach der Auftriebsmethode (in Anlehnung an EN 993-1)

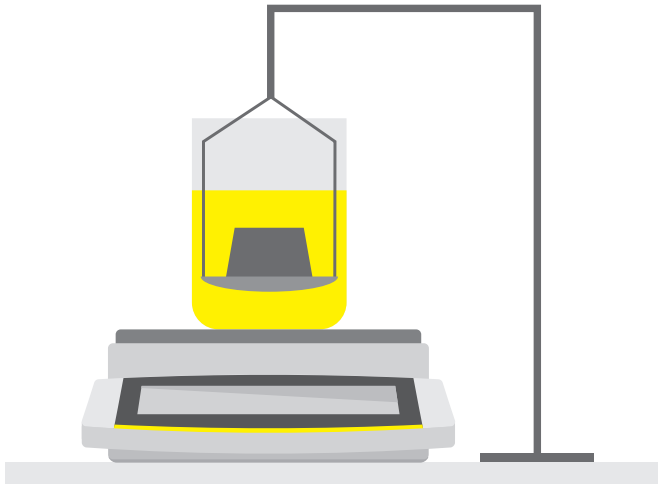


Abbildung 15: Versuchsanordnung bei der Dichtebestimmung nach der Auftriebsmethode mit dem Sartorius-Dichteset

Benötigte Hilfsmittel und Geräte

- Trockenschrank bei einer Temperatur von $(110 \pm 5)^\circ\text{C}$
- Waage – Fehlergrenze von 0,01 g
- Steg, der über der Waagschale zu plazieren ist – Dichtebestimmungsset
- Vakuumeinrichtung mit reduzierbarem Druck und Druckmessgerät
- Thermometer mit Fehlergrenze von 1°C
- Tränkflüssigkeit – destilliertes Wasser für alle Werkstoffe, die nicht mit Wasser reagieren
- Exsikkator

Probenvorbereitung

Form und Größe (Gesamtvolumen zwischen 50 cm^3 und 200 cm^3) der Probekörper sowie die Anzahl der zu prüfenden Proben sind in der Norm festgelegt.

Versuchsdurchführung und Auswertung

Zunächst werden die Probekörper bis zur Massenkonstanz im Trockenschrank getrocknet, im Exsikkator auf Raumtemperatur abgekühlt und anschließend die Masse durch Wägen in Luft bestimmt. $\rightarrow m_1$

Unter genau definierten Bedingungen wird der Probekörper evakuiert und anschließend mit der Tränkflüssigkeit (im Vakuum) getränkt bis die offenen Poren – den Versuchsbedingungen entsprechend – mit der Flüssigkeit gefüllt sind. Die scheinbare Masse des getränkten Probekörpers wird dann mit einer hydrostatischen Waage (bzw. unter Verwendung des Dichtesets) bestimmt. Der Probekörper muss vollständig in ein Becherglas mit der Tränkflüssigkeit als Auftriebsmedium eintauchen. $\rightarrow m_2$

Die Temperatur der Tränkflüssigkeit muss bestimmt werden.

Schließlich muss noch die Masse des getränkten Probekörpers durch Wägung in Luft bestimmt werden. Oberflächlich anhaftende Flüssigkeit muss vor dem Wägen mit einem feuchten Schwamm entfernt werden, die Wägung muss zügig erfolgen, sodass ein Masseverlust durch Verdunstung ausgeschlossen wird. $\rightarrow m_3$

Die Dichte der Tränkflüssigkeit ρ_{fl} muss gemessen oder in Abhängigkeit von der Temperatur einer Tabelle entnommen werden.

Die Rohdichte ρ_b in g/cm^3 berechnet sich nach der folgenden Gleichung:

Gleichung 26

$$\rho_b = \frac{m_1}{m_3 - m_2} \times \rho_{fl}$$

Die offenen Porosität π_a in Volumenprozent berechnet sich wie folgt:

Gleichung 27

$$\pi_a = \frac{m_3 - m_1}{m_3 - m_2} \times 100$$

Die Gesamtporosität π_t berechnet sich aus den Werten der:

Gleichung 28

$$\pi_t = \frac{\rho_t - \rho_b}{\rho_t} \times 100$$

Die Gesamtporosität ist die Summe aus offener und geschlossener Porosität ($\pi_t = \pi_o + \pi_c$) daraus folgt dann für die geschlossene Porosität π_c :

Gleichung 29

$$\pi_c = \pi_t - \pi_o$$

Variablen zur Berechnung der Dichte poröser Proben

m_1	Masse des trockenen Probenkörpers
m_2	Scheinbare Masse des getränkten Probekörpers in Flüssigkeit gewogen
m_3	Masse des getränkten Probekörpers in Luft gewogen
ρ_t	Dichte des reinen Feststoffs, bestimmt nach DIN EN 993-2 (oder aus der Zusammensetzung berechnet)
ρ_f	Dichte der Auftriebsflüssigkeit
ρ_b	Rohdichte des Probekörpers

Häufig findet man in der Keramik als Maßzahl für die offene Porosität außer den oben angegebenen Größen die sogenannte Wasseraufnahme. Die Wasseraufnahme in Prozent errechnet sich aus der Massedifferenz der mit Flüssigkeit getränkten Probe und der trockenen Probe bezogen auf die Masse der trockenen Probe. Der Zahlenwert wird unter anderem als Vergleichswert verwendet, um keramische Werkstoffe in „dicht“ und „porös“ einzuteilen.

Zusätzliche Informationen über die Art und die Größenverteilung der Poren kann man mithilfe des Quecksilberporosimeters gewinnen: Die porösen Proben werden mit Quecksilber unter Druck gefüllt, dabei wird der Druck in bestimmten Stufen erhöht, sodass jeweils – abhängig vom Porendurchmesser – eine bestimmte Menge an Poren mit Quecksilber aufgefüllt wird. Daraus können Aussagen über den Anteil und den Durchmesser von offenen, von außen zugänglichen Poren abgeleitet werden.

Eine andere Methode zur Bestimmung von Porenanteil, Porenform und -größe ist die Bildanalyse, die quantitative statistische Auswertung von Anschliffen, ähnlich wie in Abbildung 14 gezeigt, unter dem Mikroskop.

Bestimmung der Dichte von Pulvern und Granulaten

Besonderheiten der Proben

Unter einem Pulver versteht man ein „Haufwerk von Teilchen, üblicherweise mit Maßen kleiner als 1 mm“.

Ein Granulat besteht aus gröberen Partikeln als ein Pulver, dabei wird der Begriff Granulat unterschiedlich verwendet: mit Granulat bezeichnet wird je nach Fachgebiet

- Material, das aus „Sekundär“-Partikeln besteht, die aus zusammengeballten (agglomerierten) feinen Pulverteilchen („Primärpartikel“) zusammengesetzt sind
- Material – zum Beispiel Zwischenprodukte im Bereich Kunststoff oder Email – das aus der Schmelzphase schnell abgekühlt wurde und eine tropfenähnliche Form aufweisen kann.

Geeignete Dichtebestimmungsmethoden

Zur Dichtebestimmung von Pulvern und Granulaten kommt nur die Pyknometermethode in Frage.

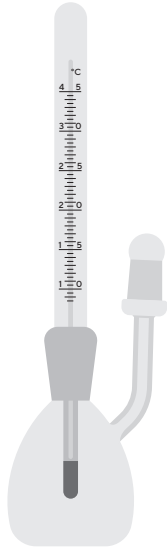


Abbildung 16: Pycnometer mit integriertem Thermometer

Durchführung einer Dichtebestimmung nach der Pycnometermethode (in Anlehnung an DIN EN ISO 18753)

Benötigte Hilfsmittel und Geräte

- Destilliertes Wasser und eine andere Hilfsflüssigkeit z. B. Ethanol
- Pycnometer mit Thermometer und Seitenarm mit Schliffglasstopfen
- Wasserbad
- Vakuumpumpe
- Waage mit Fehlergrenze 0,0001 g

Versuchsdurchführung und Auswertung

Das sorgfältig gereinigte und getrocknete Pycnometer wird mit destilliertem Wasser gefüllt und unter definierten Bedingungen evakuiert und anschließend im Wasserbad auf $\pm 0,1$ K genau temperiert. Dann wird das Pycnometer endgültig gefüllt. Aus der Masse des Wassers bei der Prüftemperatur wird das Volumen des Pycnometers berechnet: $V_{\text{Pycnometer}} = m_{\text{Wasser}} / \rho_{\text{Wasser}}$

Das Pycnometer wird wieder getrocknet und nun entsprechend der oben beschriebenen Vorgehensweise mit Ethanol gefüllt und schließlich gewogen. Aus der Masse des Ethanols und dem Volumen des Pycnometers kann dann die Dichte des Ethanols bei der Prüftemperatur genau ermittelt werden: $\rho_{\text{Ethanol}} = m_{\text{Ethanol}} / V_{\text{Pycnometer}}$

$$m_{\text{Ethanol}} = m_1$$

In das gereinigte und getrocknete Pycnometer* werden etwa 10 g (bei Pulverdichten zwischen $2,5$ und 4 g/cm^3) des bei 10 K unter seiner Zersetzungstemperatur getrockneten Pulvers ins Pycnometer eingewogen $\rightarrow m_2$

Das Pycnometer wird nun mit etwas Ethanol gefüllt, sodass das Pulver befeuchtet ist, anschließend wird wieder evakuiert und gerüttelt, so dass möglichst alle Luftblasen entweichen können. Das Pycnometer wird weiter mit Ethanol gefüllt, auf die Prüftemperatur gebracht und dann endgültig aufgefüllt. Die Gesamtmasse aus Pulver und Ethanol wird bestimmt. $\rightarrow m_3$

Die Auswertung erfolgt nach der Formel

$$\rho = \rho_{\text{Ethanol}} \times \frac{m_2}{m_1 + m_2 - m_3}$$

die Dichte der Probesubstanz wird auf $0,001 \text{ g/cm}^3$ genau angegeben.

* Bei der Verwendung von modernen Sartorius-Waagen mit integrierter Software zur Dichtebestimmung kann dieser – zeitaufwendige – Vorgang des Trocknens im Trockenschrank und anschließenden Abkühlens im Exsikkator durch Verwendung eines zweiten, applikativen Taraspeichers entfallen und so die Arbeit im Labor deutlich vereinfachen.

Bestimmung der Dichte von homogenen Flüssigkeiten

Besonderheiten der Proben

Homogene Flüssigkeiten sind relativ einfache Systeme; es sind immer – im Gegensatz zu Dispersionen – einphasige Systeme. Beim Vorliegen von Stoffgemischen, zum Beispiel Alkohol und Wasser oder Zucker und Wasser, handelt es sich um Lösungen der einen Substanz in der anderen. Echte Lösungen sind immer durchsichtig, die Partikel des gelösten Stoffes liegen als Moleküle oder Ionen im Lösungsmittel vor.

Die Dichte einer Lösung ist abhängig von der Konzentration des gelösten Stoffes, d.h. bei Kenntnis des Zusammenhanges kann man aus Dichtebestimmungen Konzentrationsangaben berechnen.

Die Dichten der meisten Flüssigkeiten liegen bei 20 °C zwischen 600 kg/m³ und 2000 kg/m³ oder 0,6 g/cm³ bis 2,0 g/cm³. Die Dichten von Flüssigkeiten sind wesentlich stärker temperaturabhängig als die von Feststoffen. Das bedeutet, dass zur Dichtemessung immer eine Temperaturmessung gehört und | oder eine sorgfältige Temperierung der Probe.

Geeignete Dichtebestimmungsmethoden

Zur Bestimmung von Flüssigkeitsdichten sind verschiedene Methoden geeignet: Aräometer, Pyknometer, Schwingermessgeräte, die Auftriebs- und Verdrängungsmethode. Die Auswahl des Verfahrens ist unter anderem abhängig von der geforderten Genauigkeit und der zur Verfügung stehenden Probenmenge.

Durchführen einer Dichtebestimmung nach der Auftriebsmethode



Abbildung 17: Bestimmung der Flüssigkeitsdichte nach der Auftriebsmethode

Benötigte Hilfsmittel und Geräte

- Waage
- Dichteset
- Tauchkörper mit bekanntem Volumen (10 cm³ beim Sartorius-Dichteset, siehe Abbildung 17)
- Thermometer
- evt. Wasserbad zum Thermostatisieren der Probe

Probenvorbereitung, Versuchsdurchführung und Auswertung

- Leeres Becherglas auf der Brücke ausrichten, Tauchkörper am Gestell des Dichtebestimmungssets aufhängen.
- Tarieren der Waage mit angehängtem Tauchkörper.
- Zu messende Flüssigkeit in das Becherglas einfüllen, bis der Flüssigkeitsspiegel 10 mm über dem Glaskörper steht.
- Der von der Waage angezeigte (negative) Messwert entspricht dem Auftrieb des Glaskörpers in der Probeflüssigkeit.
- Durch Division des Messwertes durch das Volumen des Tauchkörpers erhält man die zu bestimmende Dichte

$$\rho = \frac{m_{fl}}{V_{TK}}$$

Bestimmung der Dichte von Dispersionen

Besonderheiten der Proben

Disperse Systeme oder Dispersionen sind Mischungen aus zwei oder mehr Phasen, die ineinander unlöslich sind. Dabei ist eine Phase kontinuierlich zusammenhängend – das sogenannte Dispersionsmittel – die andere Phase (oder Phasen) sind im Dispersionsmittel in Form winziger isolierter Partikel fein verteilt. Die Partikelgrößen liegen bei den sogenannten kolloiddispersen Systemen im allgemeinen zwischen 1 µm und 1 nm. Bei einer Größe der dispersen Partikel > 1 µm spricht man von grobdispersen Systemen, bei einer Größe der Partikel < 1 nm von molekulardispersen Systemen. Beispiele für Dispersionen gibt es beliebig viele, dabei ist Dispersion der Oberbegriff für alle Systeme – unabhängig vom Aggregatzustand der beteiligten Phasen.

Disperse Probentypen

Suspensionen	Mischungen aus festen Partikeln in einer Flüssigkeit Beispiele: „Dispersions“farben, keramische Gießmassen, Scheuermilch, Zahnpasta, Tinte, ...
Emulsionen	Mischungen von zwei ineinander unlöslichen Flüssigkeiten, von denen die eine in Form kleiner Tropfen in der anderen fein verteilt ist Beispiele: Cremes, Lotionen, Mayonnaise, Milch, die klassische Salatsoße aus Öl und Essig, ...
Schäume	Mischungen von kleinen Gasblasen in einer Flüssigkeit (oder einem Feststoff)
Nebel	Mischungen von kleinen Flüssigkeitstropfen in einer Gasphase
Rauch	Mischungen von Feststoffpartikeln in einer Gasphase

Etwas problematisch ist die Verwendung des Begriffes „Stabilität“ in Zusammenhang mit dispersen Systemen, da diese streng betrachtet instabile Systeme sind. Das zeigt sich in ihrer Neigung zur Entmischung. Als „stabile“ Suspension oder Emulsion bezeichnet man aber häufig Systeme, die über bestimmte Zeiträume konstante Eigenschaften zeigen.

Geeignete Dichtebestimmungsmethoden

In Abhängigkeit von der Konsistenz des Probenmaterials kommen Dichtebestimmungsmethoden in Frage, wie sie für Flüssigkeiten oder Feststoffe auch verwendet werden. Die Dichtebestimmung nach der Biege-Schwinger-Methode eignet sich nicht so gut, da die vielen Phasengrenzen stören, die Dichtebestimmung bei diesem Messverfahren geringfügig durch die Viskosität beeinflusst wird und außerdem die Vibration während der Messung die Phasentrennung begünstigen kann. Dabei wird bei dieser Methode nicht ein Mittelwert für die gesamte Probe bestimmt. Bei der Arbeit mit Aräometern, die grundsätzlich möglich ist, muss sorgfältig darauf geachtet werden, dass die

Suspension oder die Emulsion keine Entmischungerscheinungen aufweist. Entsprechend der Dichtebestimmung an Flüssigkeiten oder Pulvern kann auch bei dispersen Systemen mit Pyknometern gearbeitet werden. Branchenabhängig sind verschiedene Gefäße gebräuchlich, die bis zum Rand (oder bis zu einer Markierung) mit der Probesubstanz gefüllt und ausgewogen werden. Hier führt die mögliche Entmischung der Probe während der Messung nicht zu einem Messfehler. Für viele Suspensionen und Emulsionen bietet sich die Auftriebs- oder Verdrängungsmethode an – auch hier ist darauf zu achten, dass die Dispersion nicht entmischt und dass das Fließverhalten der Suspension es zulässt, dass der Tauchkörper schnell genug in die Probe eintaucht.

Durchführen einer Dichtebestimmung nach der Verdrängungsmethode

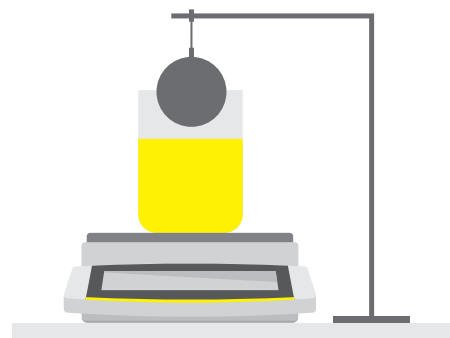


Abbildung 18: Dichtebestimmung nach der Verdrängungsmethode mit Gammakugel als Tauchkörper, befestigt an einem neben der Waage stehenden Stativ

Benötigte Hilfsmittel und Geräte

- Waage
- Tauchkörper mit bekanntem Volumen
- Stativ
- Thermometer
- evt. Wasserbad zum Thermostatisieren der Probe

Probenvorbereitung, Versuchsdurchführung und Auswertung

(Temperierte) Probe in ein Becherglas füllen. Das Becherglas auf die Waage stellen und auf Null tarieren. Den am Stativ befestigten Tauchkörper in die Probesubstanz absenken und bis zur Markierung eintauchen. Die Waage zeigt den Wert der Masse der verdrängten Flüssigkeit direkt an (siehe Seite 13). Aus der Division des Messwertes durch das Volumen des Tauchkörpers ergibt sich die Dichte der Probensubstanz

$$\rho = \frac{m_{fl}}{V_{TK}}$$



Fehler und Genauigkeit der Dichtebestimmung

In den beiden vorausgehenden Kapiteln (Auftriebsmethode und Verdrängungsmethode) wurden allgemein die Grundlagen der beiden hydrostatischen Dichtebestimmungsmethoden erläutert und die Formeln zur Berechnung der Dichte abgeleitet.

Bei hohen geforderten Messgenauigkeiten sind die realen Messbedingungen zu berücksichtigen. Genaugenommen zeigt die Waage nicht direkt die Masse der Proben an – wie in den allgemeinen Formeln angegeben – sondern deren Wägewert in Luft. In die Grundgleichungen sind also die um den Luftauftrieb korrigierten Wägewerte einzusetzen.

Außerdem ist beim Auftriebsverfahren der Einfluss des zusätzlichen Auftriebs durch das tiefere Eintauchen der Probenhalterung nach Flüssigkeitsanstieg durch Eintauchen der Probe zu berücksichtigen.

Allgemein ist bei der Durchführung der Dichtebestimmungen auf sorgfältiges Arbeiten, insbesondere auf die Konstanz der Temperatur während des Versuches zu achten.

Beim Eintauchen des Festkörpers in die Flüssigkeit dürfen keine Luftblasen in die Flüssigkeit geraten – am Festkörper anhaftend verfälschen sie dessen Messwert.

Korrektur des Luftauftriebs

Für genauere Dichtebestimmungen muss berücksichtigt werden, dass die Waagen nicht direkt die Masse der Probe, sondern deren Wägewert bestimmen. Dieser ist jedoch von der – druck- und temperaturabhängigen – Luftdichte abhängig und muss um den Einfluss des Auftriebs in Luft korrigiert werden.

Zwischen der Masse des Festkörpers m und seinem Wägewert in Luft W , d. h. unter Berücksichtigung des Luftauftriebs auf das Wägegut, gilt allgemein die Beziehung (ρ_G = Dichte des Normals)

Gleichung 30

$$m = W \times \frac{1 - \frac{\rho_a}{\rho_G}}{1 - \frac{\rho_a}{\rho}}$$

Verdrängungsverfahren

Setzt man diese Gleichung in die Beziehung zur Berechnung der Dichte nach der Verdrängungsmethode ein, so folgt schließlich unter Berücksichtigung des Luftauftriebs die Gleichung zur Bestimmung der Festkörperdichte (Herleitung siehe Seite 39)

Gleichung 31

$$\rho_s = \rho_{fl} \times \frac{m_s}{m_{fl}} = (\rho_{fl} - \rho_a) \times \frac{W_s}{W_{fl}} + \rho_a$$

In dieser Form wird die Dichte in der integrierten Software der Sartorius-Waagen berechnet.

Auftriebsverfahren

Setzt man die Beziehung

$$m = W \times \frac{1 - \frac{\rho_a}{\rho_G}}{1 - \frac{\rho_a}{\rho}}$$

für $m_{(a)}$ und $m_{(fl)}$ in die Gleichung zur Dichtebestimmung nach dem Auftriebsverfahren

$$\rho_s = \rho_{fl} \times \frac{m_{(a)}}{m_{(a)} - m_{(fl)}}$$

ein, so folgt nach mathematischer Umformung

Gleichung 32

$$\rho_s = (\rho_{fl} - \rho_a) \times \frac{W_{(a)}}{W_{(a)} - W_{(fl)}} + \rho_a$$

die Formel zur Berechnung der Dichte von Festkörpern unter Beachtung des Luftauftriebs.

Pyknometermethode

Unter Berücksichtigung der Luftauftriebskorrektur lautet die Formel für die Dichtebestimmung nach der Pyknometermethode:

Gleichung 33

$$\rho_s = (\rho_{fl} - \rho_a) \times \frac{W_2}{W_1 + W_2 - W_3} + \rho_a$$

Mit dieser Formel werden die Messwerte in der integrierten Software der Sartorius-Waagen ausgewertet.

Korrektur des Auftriebs der Probenhalterung

Auftriebsmethode

Außer dem Luftauftrieb muss bei exakten Messungen auch noch der zusätzliche Auftrieb der Aufhängung berücksichtigt werden, der dadurch entsteht, dass infolge des Flüssigkeitsanstiegs nach dem Eintauchen der Probe die Drähte tiefer in die Flüssigkeit tauchen als vor dem Eintauchen der Probe. (Der Auftrieb der Probenhalterung geht – wenn man die Waage mit in die Flüssigkeit eingetauchter Halterung tariert – nicht mit in die Berechnung der Dichte ein.)

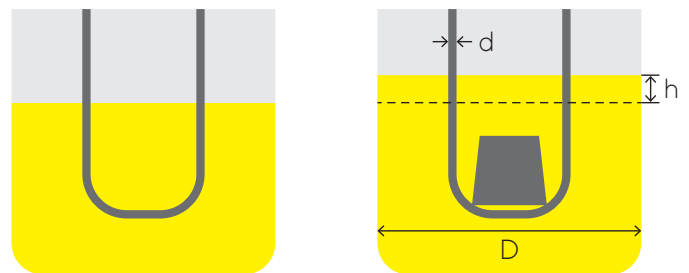


Abbildung 19: Skizze zur Berechnung des Auftriebs durch den Flüssigkeitsanstieg nach Eintauchen des Probekörpers in die Auftriebsflüssigkeit

Die Versuchsanordnung mit den Dichtebestimmungssets bei der Auftriebsmethode hat zur Folge, dass die Drähte der Aufhängung der Probenhalterung aufgrund des Flüssigkeitsanstiegs im Behälter tiefer eintauchen als ursprünglich. Das heißt, da „mehr“ Draht eintaucht, entsteht ein zusätzlicher Auftrieb, der berechnet werden kann und bei der Korrektur des Ergebnisses berücksichtigt werden muss.

Das Volumen, um das die Flüssigkeit im Behälter mit dem Durchmesser D zunimmt, entspricht dem Volumen V_{fl} in Abbildung 19

Gleichung 34

$$V_{fl} = \frac{\pi \times D^2}{4} \times h$$

Das Volumen V_s des Probekörpers ist

Gleichung 35

$$V_s = \frac{m_{(a)} - m_{(fl)}}{\rho_{fl}}$$

Diese beiden Volumina sind identisch, $V_{fl} = V_s$. Durch einsetzen der oben angegebenen Beziehungen und auflösen nach h , der Höhe des Flüssigkeitsanstiegs, erhält man

Gleichung 35

$$h = \frac{(m_{(a)} - m_{(fl)}) \times 4}{\rho_{fl} \times \pi \times D^2}$$

Die in der Flüssigkeitsschicht h auf zwei Drähte mit dem Durchmesser d wirkende Auftriebskraft F_{BD} ist

Gleichung 37

$$F_{BD} = \rho_{fl} \times V_D \times g = \rho_{fl} \times \left(2 \times \frac{\pi \times d^2}{4} \times h\right) \times g$$

und nach einsetzen von h folgt

$$F_{BD} = \rho_{fl} \times 2 \times \frac{\pi \times d^2}{4} \times \frac{(m_{(a)} - m_{(fl)}) \times 4}{\rho_{fl} \times \pi \times D^2} \times g$$

Gleichung 38

$$F_{BD} = \frac{\rho_{fl} \times 2 \times \pi \times d^2 \times (m_{(a)} - m_{(fl)}) \times 4 \times g}{4 \times \rho_{fl} \times \pi \times D^2}$$

$$= 2 \times \frac{d^2}{D^2} \times (m_{(a)} - m_{(fl)}) \times g$$

D. h. die durch die Drähte verursachte Auftriebskraft ist proportional dem Durchmesser Verhältnis von Draht und Becherglas.

Der Messwert enthält außer dem Auftrieb der Probe – der bestimmt werden soll – einen Anteil des „Drahtauftriebs“; der Drahtauftrieb muss also vom Messwert subtrahiert werden, um den Auftrieb der Probe $F_{BS}(\text{korr})$ allein zu ergeben:

Gleichung 39

$$F_{BS}(\text{corr}) = \left[(m_{(a)} - m_{(fl)}) - \left(2 \frac{d^2}{D^2} \times (m_{(a)} - m_{(fl)})\right) \right] \times g$$

$$F_{BS}(\text{corr}) = \underbrace{\left(1 - 2 \frac{d^2}{D^2}\right)}_{\text{Korrekturfaktor}} \times (m_{(a)} - m_{(fl)}) \times g$$

Bei bekanntem Durchmesser von Draht und Becherglas kann der Faktor, mit dem der gemessene Wert des Auftriebs multipliziert werden muss, berechnet werden.

Bei den Sartorius Dichtesets beträgt der Drahtdurchmesser $d = 0,7 \text{ mm}$, der Becherglasdurchmesser $D = 76 \text{ mm}$, die Probenhalterung hat 2 Drähte. Der Korrekturfaktor ist dann

$$\text{Corr} = 1 - 2 \frac{d^2}{D^2} = 1 - 2 \frac{0,7^2}{76^2} = 0,99983$$

Je kleiner der Drahtdurchmesser d , je größer der Becherglasdurchmesser D und je niedriger die Anzahl der Drähte der Aufhängung ist, desto näher ist der Korrekturfaktor dem Zahlenwert 1, d. h. die Korrektur kann dann vernachlässigt werden. Diese Bedingungen kann man leicht bei der Dichtebestimmung im Unterflurwägebetrieb einhalten.

Zurück zur Formel für die Dichtebestimmung nach dem Auftriebsverfahren: Man erhält unter Berücksichtigung der Auftriebskorrektur für die Drähte aus

$$\rho_s = \rho_{fl} \times \frac{m_{(a)}}{m_{(a)} - m_{(fl)}}$$

$$\rho_s = \rho_{fl} \times \frac{m_{(a)}}{[m_{(a)} - m_{(fl)}] \times \text{Corr}}$$

bzw. unter gleichzeitiger Berücksichtigung des Luftauftriebs:

Gleichung 40

$$\rho_s = (\rho_{fl} - \rho_a) \times \frac{W_{(a)}}{[W_{(a)} - W_{(fl)}] \times \text{Corr}} + \rho_a$$

Mit dieser Formel zur Dichtebestimmung arbeitet die in Sartorius-Waagen integrierte Software. Dabei kann mit den voreingestellten Werten der Normluftdichte von $\rho_a = 0,0012 \text{ g/cm}^3$ und dem Korrekturfaktor von 0,99983 für das Sartorius Dichteset gearbeitet werden. Alternativ können auch vom Benutzer berechnete Korrekturen eingesetzt werden.

Verdrängungsmethode

Fehler durch den zusätzlichen Auftrieb durch das Eintauchen der Haltevorrichtung für den Probekörper oder Fäden oder Drähte der Aufhängung können von vorne herein eliminiert werden, indem man diese bei der Leertwägung bzw. beim Trieren des Flüssigkeitsbehälters genau so weit in die Flüssigkeit eintaucht, wie später beim Wägen mit Probekörper.

Außerdem wird auch hier durch die entsprechenden Versuchsbedingungen der Korrekturfaktor ≈ 1 (großer Gefäßdurchmesser, kleiner Durchmesser der Halterung, möglichst nur eine Halterung).

Die Gleichung zur Berechnung der Festkörperdichte nach der Verdrängungsmethode – unter Berücksichtigung von Luftauftrieb und Korrekturfaktor für die Probenaufhängung – lautet:

Gleichung 41

$$\rho_s = (\rho_{fl} - \rho_a) \times \frac{W_{(a)}}{W_{(fl)} \times Corr} + \rho_a$$

Mit dieser Formel arbeitet die in Sartorius-Waagen integrierte Software. Dabei hat die Grundeinstellung den Zahlenwert von 1,0 für den Korrekturfaktor und von $\rho_a = 0,0012 \text{ g/cm}^3$ für die Normluftdichte. Es können auch vom Benutzer berechnete Korrekturen eingesetzt werden.

Bei Einsatz der Verdrängungsmethode zur Dichtebestimmung von Flüssigkeiten, unter anderem Farben und Lacken, sind Tauchkugeln aus Metall (Gammakugel) verbreitet, die am Stab eine Verjüngung aufweisen (siehe Abbildung 20), bis zu deren Mitte das Nennvolumen des Tauchkörpers berechnet ist. Es gibt Ausführungen für unterschiedliche Größenordnungen der Oberflächenspannung der zu untersuchenden Flüssigkeiten. Dabei wird der Einfluss des sich bildenden Flüssigkeitswulstes um den Stab berücksichtigt.

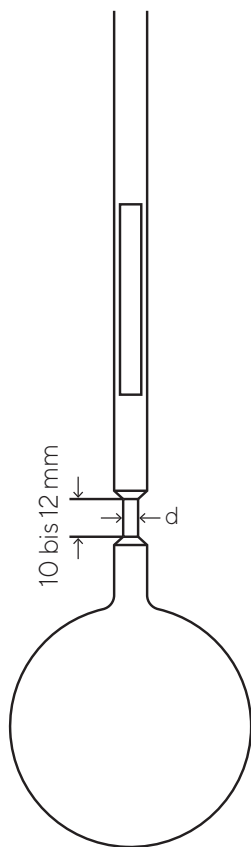


Abbildung 20: Tauchkugel nach DIN EN ISO 2811 Teil 3 zur Bestimmung der Dichte von Lacken und Anstrichstoffen nach dem Verdrängungsverfahren

Vermeidung systematischer Fehler

Hydrostatische Verfahren

Um die Fehler bei der Dichtebestimmung mit den verschiedenen hydrostatischen Verfahren möglichst gering zu halten, ist insbesondere auf folgendes zu achten:

- Die Temperatur muss während der gesamten Versuchsdurchführung konstant gehalten werden. Bei Wasser als Auftriebsmedium bewirkt z. B. eine Temperaturänderung von 0,1 °C eine Dichteänderung von 0,00002 bis 0,00003 g/cm³, bei Alkoholen von $\approx 0,0001 \text{ g/cm}^3$.
- Die Waage muss genau mittig belastet werden, um den Ecklastfehler möglichst gering zu halten. Bei der Wägung in Luft bei Verwendung des Sartorius-Dichtesets mit der Probenaufnahme oben am Gestell tritt durch die Form des Gestells und die Krafteinleitung an zwei Punkten außen an der Grundplatte des Gestells bei außermittiger Position der Probe ein größeres Drehmoment auf als bei der Verwendung der „normalen“ Waagschalen und derselben vom Mittelpunkt abweichenden Position.
- Es dürfen – nach dem Eintauchen in die Flüssigkeit – keine Luftblasen an der Probe selbst oder an der Probenhalterung haften. Diese erzeugen einen zusätzlichen Auftrieb und verfälschen damit das Wäageergebnis. Zur Vermeidung kann man die Probe vor der eigentlichen Messung in einem separaten Gefäß befeuchten – oder auch in einem Ultraschallbad.
- Ein Fehler durch Adhäsion von Flüssigkeit am Draht der Probenhalterung kann vernachlässigt werden, indem man die Waage vor der Messung mit eingetauchter Probenhalterung tariert.
- Der Luftauftrieb verursacht einen Fehler der Dichte von $\approx 0,0012 \text{ g/cm}^3$ (entsprechend der Luftdichte bei Normalbedingungen) – deshalb sollten zur Berechnung der Dichte die Formeln verwendet werden, die den Luftauftrieb berücksichtigen (siehe Seite 26).
- Nach dem Eintauchen der Probe in das Gefäß steigt der Flüssigkeitsspiegel an, sodass die Drähte der Probenhalterung einen zusätzlichen Auftrieb erzeugen. In Abhängigkeit vom Durchmesser des verwendeten Gefäßes und von Durchmesser und Anzahl der Drähte der Halterung kann dieser zusätzliche Auftrieb korrigiert werden (siehe Seite 26).

Pyknometerverfahren

Um die Fehler bei der Dichtebestimmung mit der Pyknometermethode möglichst gering zu halten, ist insbesondere auf folgendes zu achten:

- Die Temperatur muss während der gesamten Versuchsdurchführung konstant gehalten werden bzw. die Proben müssen sorgfältig thermostatisiert werden. Bei Wasser als Hilfsflüssigkeit bewirkt z. B. eine Temperaturänderung von 0,1 °C eine Dichteänderung von 0,00002 bis 0,00003 g/cm³, bei Alkoholen von ≈ 0,0001 g/cm³.
- In der Hilfsflüssigkeit oder an der Probe selbst dürfen sich keine Luftblasen befinden.
- Der Luftauftrieb verursacht einen Fehler der Dichte von ≈ 0,0012 g/cm³ (entsprechend der Luftdichte bei Normalbedingungen) – deshalb sollten zur Berechnung der Dichte die Formeln verwendet werden, die den Luftauftrieb berücksichtigen. („Korrektur des Luftauftriebs“ auf Seite 26.)

Bei sorgfältigem Arbeiten handelt es sich bei dem Pyknometerverfahren um ein Messverfahren, mit dem Materialdichten sehr genau bestimmt werden können.

Fehlerrechnung

Bei sorgfältigem Arbeiten und unter Vermeidung der oben genannten systematischen Fehler, kann man den Fehler der Dichtebestimmung nach den Regeln der Fehlerfortpflanzung berechnen. Der Fehler der Dichte $\Delta\rho$ basiert hauptsächlich auf den Messfehlern der Massebestimmung.

Allgemein gilt für die Bestimmung des Gesamtfehlers ΔF von Größen, die aus mehreren Messwerten berechnet werden:

Bei Summen (und Differenzen) addieren sich die absoluten Einzelfehler quadratisch:

Gleichung 42

$$\Delta F = \sqrt{\Delta F_1^2 + F_2^2 + \dots}$$

Bei Produkten (und Quotienten) addieren sich die relativen Einzelfehler quadratisch. (Der relative Fehler ist der absolute Fehler bezogen auf den Messwert.):

Gleichung 43

$$\Delta F = \sqrt{\left[\frac{\Delta F_1}{F_1}\right]^2 + \left[\frac{\Delta F_2}{F_2}\right]^2 + \dots}$$

Auftriebsverfahren

Für die Dichtebestimmung von Festkörpern nach dem Auftriebsverfahren gilt die Beziehung

$$\rho_s = \rho_{fl} \times \frac{m_{(a)}}{m_{(a)} - m_{(fl)}}$$

oder

$$\rho_s = (\rho_{fl} - \rho_a) \times \frac{W_{(a)}}{[W_{(a)} - W_{(fl)}] \times \text{Corr}} + \rho_a$$

Da der Korrekturfaktor für die Probenhalterung und die Dichte der Luft keinen merklichen Einfluss auf den Fehler der Dichte haben, brauchen sie bei der Fehlerrechnung nicht berücksichtigt zu werden. Wendet man die Grundregeln der Fehlerrechnung an, wird zunächst der absolute Fehler des Nenners $\Delta[m_{(a)} - m_{(fl)}]$ berechnet

Gleichung 44

$$\Delta[m_{(a)} - m_{(fl)}] = \sqrt{\Delta m_{(a)}^2 + m_{(fl)}^2}$$

und anschließend der gesamte relative Fehler der Dichte $\Delta\rho/\rho$

Gleichung 45

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = \sqrt{\left[\frac{\Delta\rho_{fl}}{\rho_{fl}}\right]^2 + \left[\frac{\Delta m_{(a)}}{m_{(a)}}\right]^2 + \left[\frac{\Delta m_{(a)} - m_{(fl)}}{m_{(fl)}}\right]^2}$$

Der Gesamtfehler der Wägung in Luft ($\Delta m_{(a)}$) ist die Summe aus Reproduzierbarkeit und einem Linearitätsfehler von einem Digit – unabhängig von Waagentyp, da es sich um Differenzwägungen handelt.

Der maximale Fehler der Wägung in Flüssigkeit ($\Delta m_{(a)} - \Delta m_{(fl)}$) wird im Durchschnitt als 10mal so groß angenommen wie der bei Wägung in Luft – diese Annahme basiert auf umfangreichen Messungen zur Dichtebestimmung nach dem Auftriebsverfahren.

Für den Fehler der Flüssigkeitsdichte wird der Wert von $0,00003 \text{ g/cm}^3$ für Wasser bzw. $0,00009 \text{ g/cm}^3$ für Ethanol eingesetzt, d. h. der Wert, der einer Fehlablesung des Thermometers um $\pm 0,1 \text{ }^\circ\text{C}$ entspricht oder einer Temperaturänderung während der Messung um $\pm 0,1 \text{ }^\circ\text{C}$.

Die folgenden Diagramme (siehe Abbildung 21 bis Abbildung 26) zeigen am Beispiel einiger Sartorius-Waagen mit unterschiedlichen Ablesbarkeiten und Wägebereichen den relativen Fehler der Festkörperdichte beim Auftriebsverfahren in Wasser oder Ethanol als Auftriebsmedium in Abhängigkeit von der Probengröße und der Dichte des Probekörpers.

Es zeigt sich, dass der Fehler bei der Dichtebestimmung deutlich von der Dichte der untersuchten Proben abhängt: je niedriger die Dichte des Probekörpers ist, desto größer ist der Fehler des Endergebnis.

Bei der Berechnung von $\Delta\rho/\rho$ wird für $m_{(fl)}$ eingesetzt:

$$m_{(fl)} = m_{(a)} \times \left[1 - \frac{\rho_{fl}}{\rho_s}\right]$$

für ρ_{fl} wird die Dichte von Wasser mit $1,0 \text{ g/cm}^3$ angenommen, die Dichte von Ethanol mit $0,789 \text{ g/cm}^3$.

Ein weiteres Diagramm (siehe Abbildung 27) zeigt den Fehler der Dichtebestimmung von Flüssigkeiten nach der Auftriebsmethode für Flüssigkeitsdichten zwischen $0,5$ und $2,2 \text{ g/cm}^3$ unter Verwendung des Glaskörpers aus dem Sartorius-Dichteset. Der Tauchkörper hat ein Volumen von $(10 + 0,01) \text{ cm}^3$, eine Dichte von $2,48 \text{ g/cm}^3$ und eine Toleranz von $0,5 \text{ mg}$ bezogen auf den Auftrieb in Wasser. Auch hier ist der Fehler der Dichte abhängig vom Dichtewert der untersuchten Probe.

Ablesbarkeit der Waage: 1 mg

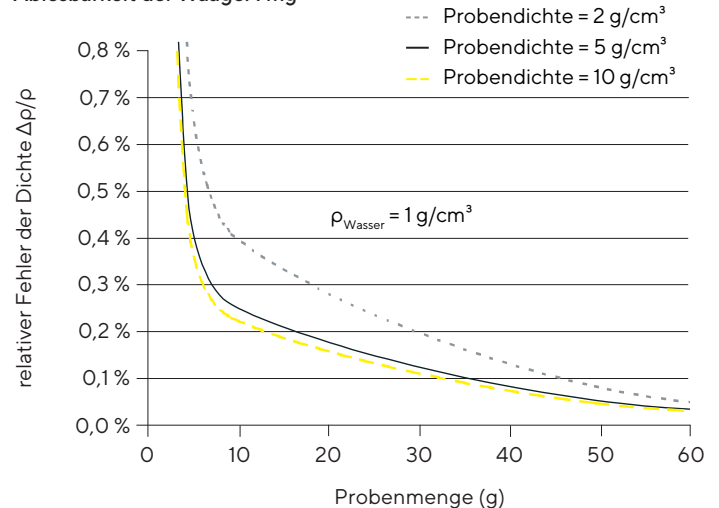


Abbildung 21: Festkörperdichtebestimmung nach dem Auftriebsverfahren – relativer Fehler der Dichte in Abhängigkeit von der Probengröße und der Probendichte

Ablesbarkeit der Waage: 0,1 mg

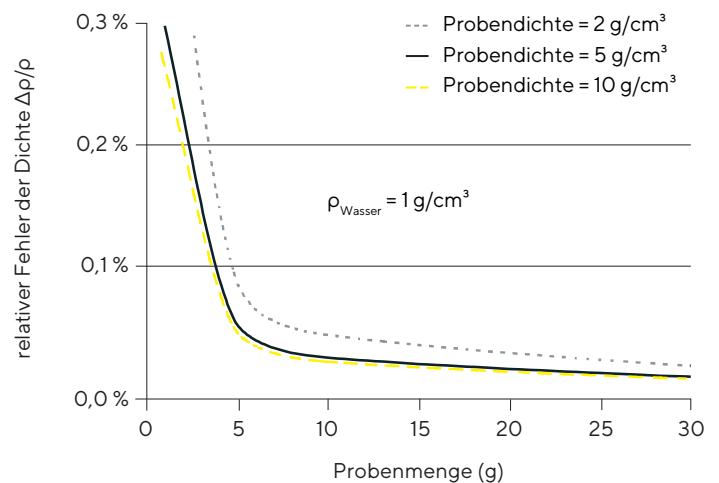


Abbildung 22: Festkörperdichtebestimmung nach dem Auftriebsverfahren – relativer Fehler der Dichte in Abhängigkeit von der Probengröße und der Probendichte

Ablesbarkeit der Waage: 0,01 mg

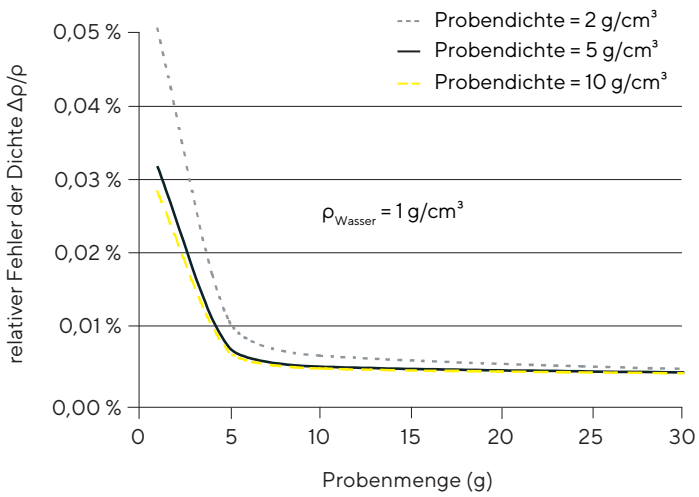


Abbildung 23: Festkörperdichtebestimmung nach dem Auftriebsverfahren – relativer Fehler der Dichte in Abhängigkeit von der Probengröße und der Probendichte

Ablesbarkeit der Waage: 0,1 mg

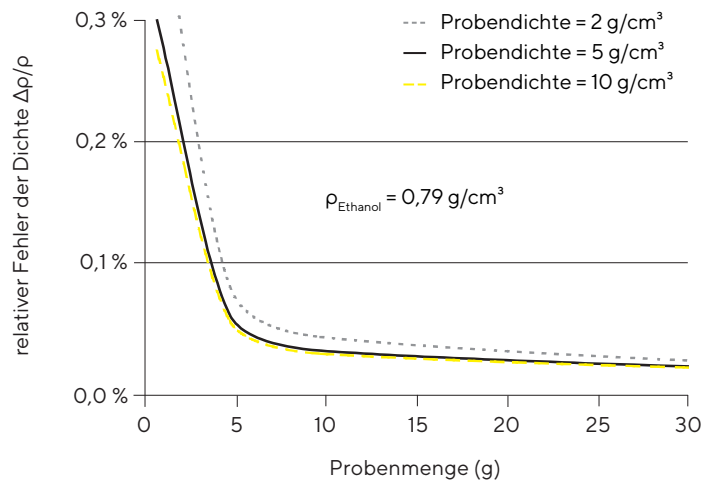


Abbildung 25: Festkörperdichtebestimmung nach dem Auftriebsverfahren – relativer Fehler der Dichte in Abhängigkeit von der Probengröße und der Probendichte

Ablesbarkeit der Waage: 1 mg

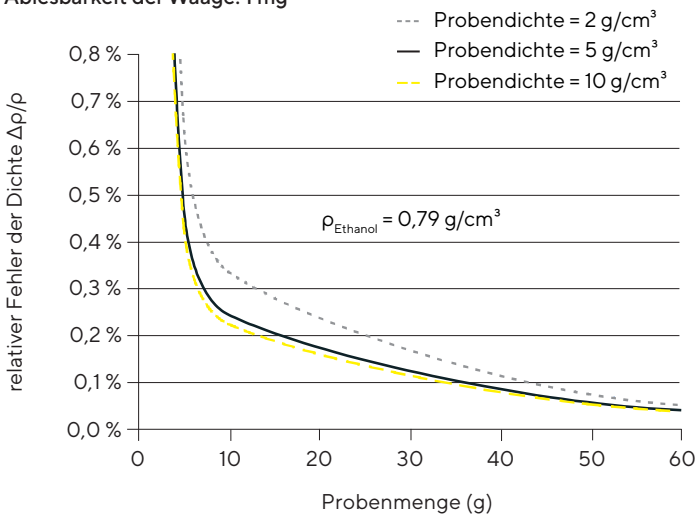


Abbildung 24: Festkörperdichtebestimmung nach dem Auftriebsverfahren – relativer Fehler der Dichte in Abhängigkeit von der Probengröße und der Probendichte

Ablesbarkeit der Waage: 0,01 mg

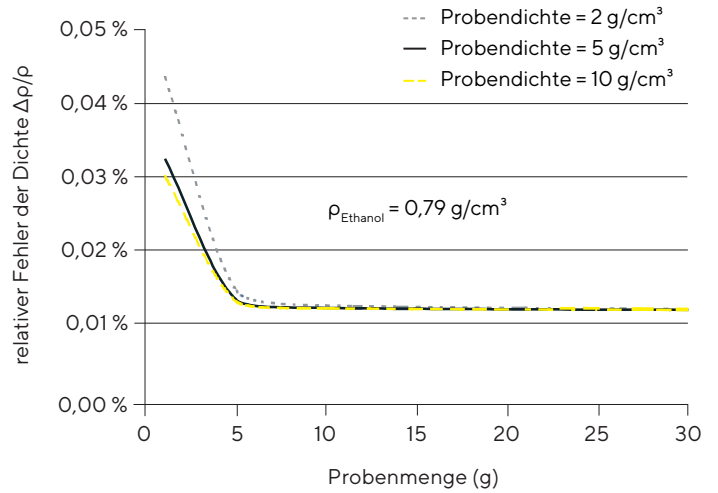


Abbildung 26: Festkörperdichtebestimmung nach dem Auftriebsverfahren – relativer Fehler der Dichte in Abhängigkeit von der Probengröße und der Probendichte

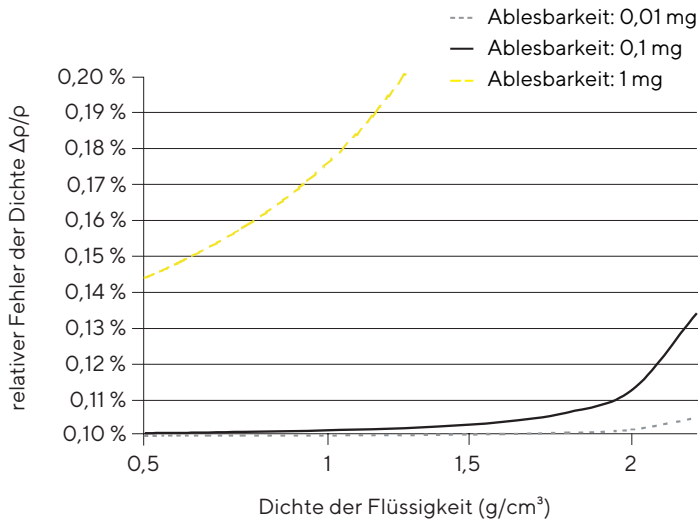


Abbildung 27: Flüssigkeitsdichtebestimmung nach dem Auftriebsverfahren – relativer Fehler der Dichte in Abhängigkeit von der Probedichte und der Ablesbarkeit der Waage für die Dichtebestimmung mit dem Sartorius-Dichteset

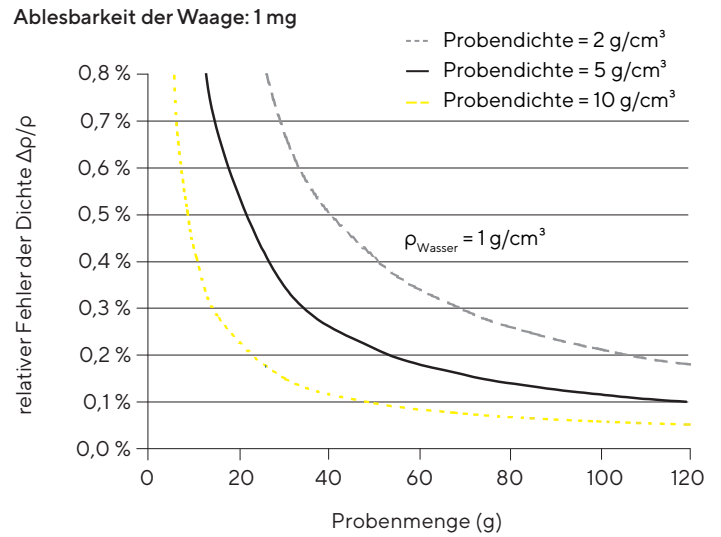


Abbildung 28: Festkörperdichtebestimmung nach dem Verdrängungsverfahren – relativer Fehler der Dichte in Abhängigkeit von der Probengröße und der Probedichte

Verdrängungsverfahren

Für die Festkörperdichtebestimmung nach dem Verdrängungsverfahren gilt die folgende Beziehung, wobei die Luftdichte ρ_a als konstant angenommen wird und nicht in die Fehlerrechnung mit einbezogen wird.

$$\rho_s = \rho_{fl} \times \frac{m_s}{m_{fl}} = (\rho_{fl} - \rho_a) \times \frac{W_s}{W_{fl}} + \rho_a$$

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = \sqrt{\left[\frac{\Delta\rho_{fl}}{\rho_{fl}}\right]^2 + \left[\frac{\Delta m_{(a)}}{m_{(a)}}\right]^2 + \left[\frac{m_{(fl)}}{m_{(fl)}}\right]^2}^*$$

mit

$$*m_{fl} = \frac{\rho_{fl}}{\rho_s} \times m_{(a)}$$

Im Vergleich zur Auftriebsmethode fällt auf (siehe Abbildung 21 bis Abbildung 26), dass die Ergebnisse der Festkörperdichtebestimmung bei der Auftriebsmethode einen kleineren Fehler aufweisen als bei der Verdrängungsmethode (siehe Abbildung 28). Außerdem wird deutlich, dass beim Auftriebsverfahren der Fehler mit zunehmender Probedichte abnimmt, während er beim Verdrängungsverfahren mit steigender Probedichte zunimmt.

Pyknometerverfahren

Für die Dichtebestimmung nach der Pyknometermethode gilt die Beziehung

$$\rho_s = \rho_{fl} \times \frac{m_1}{m_1 + m_2 - m_3} \quad \text{or} \quad \rho_s = (\rho_{fl} - \rho_a) \times \frac{W_2}{W_1 + W_2 - W_3} + \rho_a$$

Der Fehler der Luftdichte wird wieder vernachlässigt. Als Gesamtfehler des Wägewertes wird die Summe aus Reproduzierbarkeit des Waagentyps und ein Linearitätsfehler von einem Digit eingesetzt. Für den Fehler der Flüssigkeitsdichte wird der Wert von $0,00003 \text{ g/cm}^3$ eingesetzt, d. h. der Wert, der einer Fehlablesung des Thermometers um $\pm 0,1 \text{ }^\circ\text{C}$ entspricht – oder einer Temperaturänderung um $\pm 0,1 \text{ }^\circ\text{C}$. Die Flüssigkeitsdichte wird mit $1,0 \text{ g/cm}^3$ für Wasser als Hilfsflüssigkeit eingesetzt.

Zunächst wird der Fehler des Nenners $\Delta[m_1 + m_2 - m_3]$ berechnet

$$\Delta[m_1 + m_2 - m_3] = \sqrt{\Delta m_1^2 + \Delta m_2^2 + \Delta m_3^2}$$

und anschließend der gesamte relative Fehler der Dichte $\Delta\rho/\rho$

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = \sqrt{\left[\frac{\Delta\rho_{fl}}{\rho_{fl}}\right]^2 + \left[\frac{\Delta m_2}{m_2}\right]^2 + \left[\frac{\Delta(m_1 + m_2 - m_3)}{(m_1 + m_2 - m_3)}\right]^2}$$

Die folgenden Diagramme (siehe Abbildung 29 bis Abbildung 31) für Waagen mit unterschiedlichen Ablesbarkeiten und Wägebereichen zeigen den relativen Fehler der Dichtebestimmung in Abhängigkeit von der Probenmenge und der Probendichte.

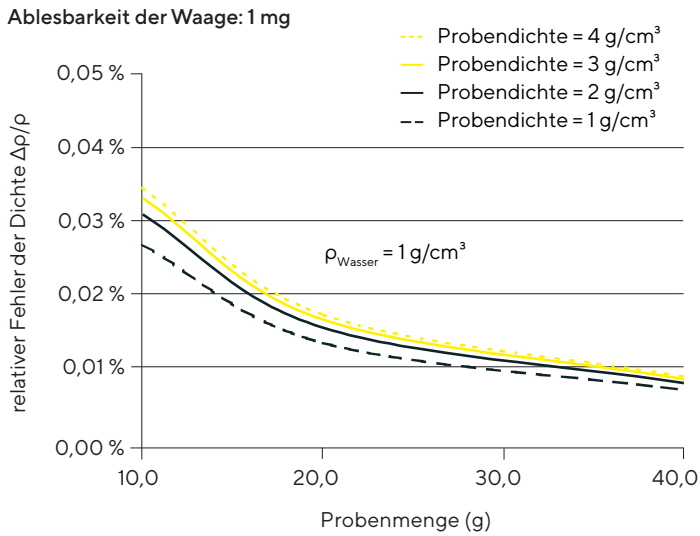


Abbildung 29: Dichtebestimmung nach dem Pyknometerverfahren – relativer Fehler der Dichte in Abhängigkeit von der Probenmenge und der Probendichte

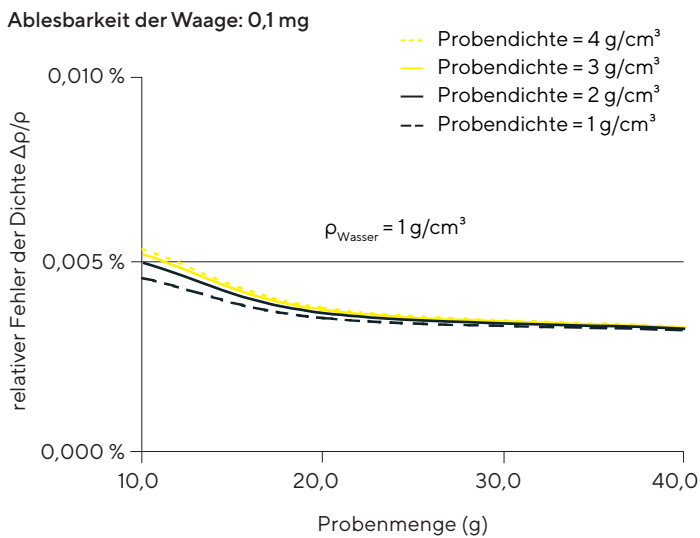


Abbildung 30: Dichtebestimmung nach dem Pyknometerverfahren – relativer Fehler der Dichte in Abhängigkeit von der Probenmenge und der Probendichte

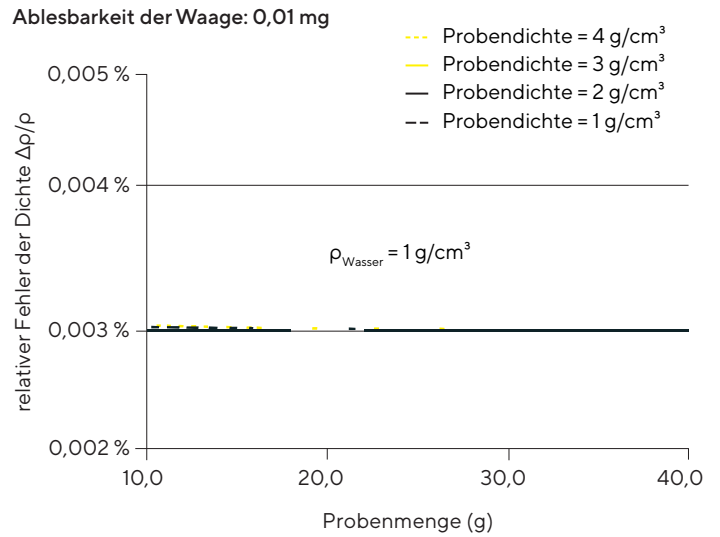


Abbildung 31: Dichtebestimmung nach dem Pyknometerverfahren – relativer Fehler der Dichte in Abhängigkeit von der Probenmenge und der Probendichte



Vergleich verschiedener Methoden zur Dichtebestimmung

Auf den folgenden Seiten sind verschiedene Methoden der Dichtebestimmung gegenübergestellt, so dass die wichtigsten Vor- und Nachteile der einzelnen Verfahren auf einen Blick zu erkennen sind.

	Auftriebs-Methode	Verdrängungs-Methode	Pyknometer-Methode	Wägen eines definierten Volumens
Geeignet für:	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Festkörper ▪ Flüssigkeiten ▪ Dispersionen ▪ Gase 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Festkörper ▪ Flüssigkeiten ▪ Dispersionen 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Festkörper ▪ Pulver, ▪ Granulate ▪ Flüssigkeiten ▪ Dispersionen 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Pulver (Schüttdichte) ▪ Flüssigkeiten ▪ Dispersionen
Vorteile	Geeignet für fast alle Probenarten	Geeignet für fast alle Probenarten	Geeignet für alle Probenarten	
	Flexibel hinsichtlich der Probengröße	Flexibel hinsichtlich der Probengröße		
	Waagen sind ohnehin vorhanden	Waagen sind ohnehin vorhanden	Waagen sind ohnehin vorhanden	Waagen sind ohnehin vorhanden
	Schnell durchzuführen	Schnell durchzuführen	Sehr genaues Verfahren	Sehr genaues Verfahren
	Besonders einfache Versuchsdurchführung durch Waagen mit integrierter Software mit Bedienungsführung und Auswertung	Besonders einfache Versuchsdurchführung durch Waagen mit integrierter Software mit Bedienungsführung und Auswertung	Besonders einfache Versuchsdurchführung durch Waagen mit integrierter Software mit Bedienungsführung und Auswertung	
Nachteile	Temperieren von Festkörper und Flüssigkeit aufwendig	Temperieren von Festkörper und Flüssigkeit aufwendig	Temperieren von Festkörper und Flüssigkeit aufwendig	
	Bei Flüssigkeitsdichtebestimmung großes Probenvolumen erforderlich!	Bei Flüssigkeitsdichtebestimmung großes Probenvolumen erforderlich!	Arbeitsintensiv	
		Flüssigkeitsverdunstung beachten	Zeitintensiv	
	Benetzung der Probe in der Flüssigkeit beachten	Benetzung der Probe in der Flüssigkeit beachten		
	Keine Luftblasen einschließen	Keine Luftblasen einschließen	Keine Luftblasen einschließen	

	Auftriebs-Methode	Verdrängungs-Methode	Pyknometer-Methode	Wägen eines definierten Volumens
Messunsicherheit*	Abhängig von der verwendeten Waage und der Probenmenge bzw. der Probedichte	Abhängig von der verwendeten Waage und der Probenmenge bzw. der Probedichte	Abhängig von der verwendeten Waage und der Probenmenge	Abhängig von der verwendeten Waage und der Probenmenge
Ablesbarkeit 1 mg	Festkörper: <0,4 % für m > 10 g Flüssigkeiten: ** <0,20 % for $\rho = 1.3 \text{ g/cm}^3$	Festkörper: <0,2 % für m > 50g (water), $\rho = 5 \text{ g/cm}^3$	< 0,02 % für m > 20 g	Flüssigkeiten, Dispersionen <1 % für V=100 ml, <0.1 % für V=1000 ml and $\rho < 2 \text{ g/cm}^3$
Ablesbarkeit 0,1 mg	Festkörper: <0,1 % für m > 5 g Flüssigkeiten: ** <0,11 % for $\rho < 1,8 \text{ g/cm}^3$	Festkörper: <0,02 % für m > 50 g (water), $\rho = 5 \text{ g/cm}^3$	<0,005 % für m > 10 g	
Ablesbarkeit 0,01 mg	Festkörper: <0,10 % für m > 5g (water) <0,15 % für m > 5g (ethanol) Flüssigkeiten: ** ~0,1 % für $\rho < 1,5 \text{ g/cm}^3$		<0,003 % für m > 10 g	

* genauere Angaben siehe Kapitel Fehler der Dichtebestimmung
** mit dem Tauchkörper des Sartorius Dichte-Set

	Aräometer	Biegeschwinger-Methode	Dichtegradienten-Säule
Geeignet für:	▪ Flüssigkeiten (Dispersionen)	▪ (homogene) Flüssigkeiten	▪ Festkörper (kleine Probekörper) ▪ Flüssigkeiten
Vorteile	Messung einfach durchzuführen Schnell durchzuführen Preisgünstige Schwimmkörper	geringe Probenmenge von ca. 1 ml Schnell durchzuführen	mehrere Probekörper können gleichzeitig geprüft werden
Nachteile	Bei Dispersionen: Messfehler durch Entmischung der Probe	Bei Dispersionen: Messfehler durch Entmischung der Probe Dichte wird geringfügig durch Viskosität der Probe beeinflusst. Teures Gerät muss angeschafft werden	Aufwendige Versuchsvorbereitung
Messunsicherheit	0,1 bis 10 kg/m^3 oder 0,0001 bis $0,01 \text{ g/cm}^3$ für $\rho = 0,6$ bis $2,0 \text{ g/cm}^3$	Es gibt Messgeräte mit Unsicherheiten von $0,001 \text{ g/cm}^3$, $0,0001 \text{ g/cm}^3$ oder $0,00001 \text{ g/cm}^3$	Kalibrierte Glas-Vergleichskörper mit Dichten von 0,8 bis $2,0 \text{ g/cm}^3$ $\pm 0,0002 \text{ g/cm}^3$
	Aräometer sind jeweils für bestimmte Bereiche der Oberflächen-spannung der Probe geeignet		



Anhang

Temperaturabhängigkeit der Dichte

Die Dichte in Abhängigkeit von der Temperatur lässt sich mit Hilfe des Volumenausdehnungskoeffizienten γ berechnen. Im allgemeinen ist der Ausdehnungskoeffizient nur für einen bestimmten Temperaturbereich angegeben (z. B. 20 °C bis 100 °C), für den eine lineare Näherung zulässig ist. Zahlenwerte für γ von unterschiedlichen Gasen und Flüssigkeiten findet man in physikalisch-chemischen Tabellenwerken.

Bei Festkörpern wird meistens der lineare Ausdehnungskoeffizient α angegeben. Für die Umrechnung des linearen in den Volumenausdehnungskoeffizienten gilt die Beziehung $\gamma \approx 3 \alpha$.

Die Dichte einer Substanz bei einer Temperatur T_2 kann mithilfe der Dichte bei der Temperatur T_1 und dem Volumenausdehnungskoeffizienten berechnet werden:

$$\rho(T_2) = \frac{\rho(T_1)}{1 + \gamma (T_2 - T_1)}$$

Hydrostatische Dichtebestimmung – Eliminieren des Volumens in den Gleichungen für ρ

Durch vollständiges Eintauchen des Festkörpers in die Flüssigkeit ist durch die Versuchsanordnung gegeben, dass die Volumina von Festkörper und Flüssigkeit gleich sind.

Man kann dann eine Beziehung zwischen den Massen und den Dichten der beiden Substanzen herleiten, in der das Volumen nicht mehr explizit enthalten ist.

$$\rho_{fl} = \frac{m_{fl}}{V_{fl}} \qquad \rho_s = \frac{m_s}{V_s}$$

umgeformt:

$$V_{fl} = \frac{m_{fl}}{\rho_{fl}} \qquad V_s = \frac{m_s}{\rho_s}$$

aus $V_{fl} = V_s$

$$\frac{m_{fl}}{\rho_{fl}} = \frac{m_s}{\rho_s}$$

Zur Bestimmung der Festkörperdichte folgt dann:

$$\rho_s = \rho_{fl} \times \frac{m_s}{m_{fl}}$$

oder zur Bestimmung der Flüssigkeitsdichte:

$$\rho_{fl} = \rho_s \times \frac{m_{fl}}{m_s} = \frac{m_{fl}}{V_s}$$

Luftdichtebestimmung

Ausgehend von den Gleichungen für die Beziehung zwischen Masse und Wägewert für Aluminium und für Stahl wird die Beziehung zur Bestimmung der Luftdichte abgeleitet:

$$W_{Al} = m_{Al} \times \frac{1 - \frac{\rho_a}{\rho_{Al}}}{1 - \frac{\rho_a}{\rho_N}} \quad 1 = \frac{m_{Al}}{W_{Al}} \times \frac{1 - \frac{\rho_a}{\rho_{Al}}}{1 - \frac{\rho_a}{\rho_N}}$$

$$W_{St} = m_{St} \times \frac{1 - \frac{\rho_a}{\rho_{St}}}{1 - \frac{\rho_a}{\rho_N}} \quad 1 = \frac{m_{St}}{W_{St}} \times \frac{1 - \frac{\rho_a}{\rho_{St}}}{1 - \frac{\rho_a}{\rho_N}}$$

Normieren der Gleichungen auf 1 und anschließendes Gleichsetzen ergibt:

$$\frac{m_{St}}{W_{St}} \times \frac{1 - \frac{\rho_a}{\rho_{St}}}{1 - \frac{\rho_a}{\rho_N}} = \frac{m_{Al}}{W_{Al}} \times \frac{1 - \frac{\rho_a}{\rho_{Al}}}{1 - \frac{\rho_a}{\rho_N}}$$

$$\frac{m_{St}}{W_{St}} \times \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_{St}}\right) = \frac{m_{Al}}{W_{Al}} \times \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_{Al}}\right)$$

$$W_{Al} \times m_{St} \times \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_{St}}\right) = W_{St} \times m_{Al} \times \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_{Al}}\right)$$

$$W_{Al} \times m_{St} - W_{Al} \times m_{St} \times \frac{\rho_a}{\rho_{St}} = W_{St} \times m_{Al} - W_{St} \times m_{Al} \times \frac{\rho_a}{\rho_{Al}}$$

$$W_{St} \times m_{Al} \times \frac{\rho_a}{\rho_{Al}} - W_{Al} \times m_{St} \times \frac{\rho_a}{\rho_{St}} = W_{St} \times m_{Al} - W_{Al} \times m_{St}$$

$$W_{St} \times m_{Al} - W_{Al} \times m_{St} = \left(\frac{W_{St} \times m_{Al}}{\rho_{Al}} - \frac{W_{Al} \times m_{St}}{\rho_{St}} \right)$$

$$\rho_s = \frac{W_{St} \times m_{Al} - W_{Al} \times m_{St}}{\left(\frac{W_{St} \times m_{Al}}{\rho_{Al}} - \frac{W_{Al} \times m_{St}}{\rho_{St}} \right)}$$

Fragen zum Thema Dichte

1. Wie ist die Dichte definiert und welche Einheit hat die Dichte?
2. Wie ändert sich die Dichte, wenn die Temperatur steigt?
3. Warum erscheinen Körper, wenn man sie in Wasser wägt, leichter als in Luft? – Beschreiben Sie das Phänomen!
4. Wann „schwimmen“ Körper in einer Flüssigkeit. Welche Aussage gilt dann für die Dichten von Flüssigkeit und Festkörper?
5. Wie unterscheiden sich der Versuchsaufbau zur Dichtebestimmung nach der Auftriebs- und nach der Verdrängungsmethode, was beinhaltet jeweils der Messwert?
6. Mit welchen Verfahren kann man die Dichte von Flüssigkeiten bestimmen? – Warum werden Flüssigkeitsdichten bestimmt, welche Rückschlüsse kann man aus den Messwerten ziehen?
7. Was ist eine Dispersion und wie kann man ihre Dichte bestimmen?

Luftauftriebskorrektur

Am Beispiel der Dichtebestimmung nach dem Verdrängungsverfahren wird die Formel zur Berechnung der Dichte unter Berücksichtigung des Luftauftriebs abgeleitet:

Die Dichte berechnet sich nach

$$\rho_s = \frac{\rho_{fl}}{m_{fl}} \times m_s$$

für die Masse muss die folgende Beziehung, die die Abhängigkeit der Masse von der Luftdichte beschreibt, eingesetzt werden:

$$m = W \times \frac{1 - \frac{\rho_a}{\rho_G}}{1 - \frac{\rho_a}{\rho}}$$

$$\rho_s = \rho_{fl} \times \frac{W_s \times \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_G}\right) \times \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_{fl}}\right)}{\left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_s}\right) \times W_{fl} \times \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_G}\right)}$$

$$\rho_s = \rho_{fl} \times \frac{W_s \times \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_{fl}}\right)}{\left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_s}\right) \times W_{fl}}$$

$$\rho_s = \frac{W_s}{W_{fl}} \times \frac{\rho_{fl} - \rho_a}{1 - \frac{\rho_a}{\rho_s}}$$

$$\rho_s = \frac{W_s}{W_{fl}} \times (\rho_{fl} - \rho_a) \times \frac{1}{\frac{\rho_s - \rho_a}{\rho_s}}$$

$$\rho_s = \frac{W_s}{W_{fl}} \times (\rho_{fl} - \rho_a) \times \frac{1}{\frac{\rho_s - \rho_a}{\rho_s}}$$

$$\rho_s = \frac{W_s}{W_{fl}} \times (\rho_{fl} - \rho_a) \times \frac{\rho_s}{\rho_s - \rho_a}$$

$$\rho \times \frac{\rho_s - \rho_a}{\rho_s} = \frac{W_s}{W_{fl}} \times (\rho_{fl} - \rho_a)$$

$$\rho_s - \rho_a = \frac{W_s}{W_{fl}} \times (\rho_{fl} - \rho_a)$$

$$\rho_s = \frac{W_s}{W_{fl}} \times (\rho_{fl} - \rho_a) + \rho_a$$

- Was ist der Unterschied zwischen Dichte (früher: Reindichte) und Rohdichte – wie kann man die Dichte von porösen Materialien bestimmen?
- Welche Dichte hat Luft, wann muss man die Dichte der Luft kennen und wie kann man sie bestimmen?
- Wie bestimmt man die Dichte von Pulvern?
- Welche Produkt- oder Materialeigenschaften können anhand von Dichtemessungen kontrolliert werden.
- Welche Bedeutung hat die Dichtebestimmung im Bereich der Fertigpackungsverordnung?
- Wovon ist die Genauigkeit einer Dichtebestimmung abhängig und wie berechnet man den Fehler des Dichtewertes.
- Erklären Sie die Bedeutung der einzelnen Größen in den folgenden Formeln, was beinhaltet "Corr?"

$$\rho = (W_a \times (\rho_{fl} - L_A)) / ((W_a - W_{fl}) \times \text{Corr}) + L_A$$

$$\rho = (W_a \times (\rho_{fl} - L_A)) / (W_{fl} \times \text{Corr}) + L_A$$

$$\rho = (W_a \times (\rho_{fl} - L_A)) / (W_{fl} + W_a - W_r) + L_A$$
- Welchen Vorteil bietet der „applikative Taraspeicher“ bei der Dichtebestimmung mit der Pyknometermethode?

Hinweise zur Beantwortung der Fragen

1. Dichte = Masse / Volumen
 $1000 \text{ kg/m}^3 = 1 \text{ kg/dm}^3 = 1 \text{ g/cm}^3 = 1 \text{ g/ml}$
2. Die Dichte nimmt ab.
3. Resultierende Kraft = Gewichtskraft minus Auftriebskraft. Der Auftrieb ist abhängig vom Schweredruck in der Flüssigkeit $p = \rho \times g \times h$;
 $F = p \times A = \rho \times g \times h \times A = \rho \times g \times V$ (siehe Seite 9)
4. Die Dichten von Festkörper und Flüssigkeit sind gleich (siehe Seite 11).
5. Gefäß mit Auftriebsflüssigkeit steht auf der Waagschale bei der Verdrängungsmethode, hat keine Berührung mit der Waagschale bei der Auftriebsmethode. Messwert entspricht der Masse der verdrängten Flüssigkeit bei der Verdrängungsmethode, Messwert entspricht der Masse des Körpers vermindert um den Auftrieb bei der Auftriebsmethode (siehe Seite 12).
6. Auftriebsmethode, Verdrängungsmethode, Wägen eines definierten Volumens, Aräometer, Biegeschwinger-Methode, Schwebeverfahren (nicht mischbare Flüssigkeiten). Rückschluss auf Konzentrationsverhältnisse, FPV: gravimetrische anstelle volumetrischer Dosierung, siehe Seite 24 und Tabelle Seite 35 ff.
7. Mehrphasiges System, bestehend aus einer zusammenhängenden Phase (Matrix) und einer oder mehrerer fein zerteilter Phasen (dispenser Phasen). (siehe Seite 25) Auswahl des Verfahrens in Abh. von der erforderlichen Genauigkeit, der Konsistenz und Fließfähigkeit der Dispersion: entweder wie bei Flüssigkeiten oder Pyknometermethode. Einfluss der Entmischung bei verschiedenen Verfahren beachten, bei der Pyknometermethode hat eine Entmischung keinen Einfluss auf das Ergebnis.
8. Bei porösen Materialien: Rohdichte wird bezogen auf das Gesamtvolumen einschließlich offener und geschlossener Poren – (Rein-)Dichte wird bezogen auf das reine Feststoffvolumen. Dichtebestimmungsmethoden bei porösen Proben: Auftriebsverfahren (siehe Seite 24) oder Pyknometermethode zur (Rein-)Dichte-Bestimmung nach Aufmahlen der Probe zu feinem Pulver; Vorteil der Pyknometermethode: eine höhere Messgenauigkeit ist möglich, vorhandene geschlossene Poren werden nicht dem Feststoff „zugerechnet“.
9. $\rho_{\text{Luft}} = 0,0012 \text{ g/cm}^3$
Bei Analysen- und Mikrowaagen muss der Wägewert korrigiert werden, um die Masse genau angeben zu können. Mit zwei Gewichtstücken unterschiedlicher Dichte und damit unterschiedlicher Volumina und in etwa gleicher Masse kann die Luftdichte mit einer Mikrowaage bestimmt werden. Die konventionellen Wägewerte der Gewichte müssen bekannt sein, die Materialdichten müssen bekannt sein, dann kann aus den gemessenen Wägewerten die Luftdichte berechnet werden, siehe Seite 13 – in der Software der Sartorius Mikro- und Ultramikrowaagen enthalten.
10. Nach der Pyknometermethode, siehe Seite 16, Versuchsbeschreibung siehe Seite 23.
11. Porosität, Lunker, Kristallgehalt (kristalline Phasen haben eine höhere Dichte als nichtkristalline glasige Phasen), Abkühlgeschwindigkeit bei Glas, Konzentration eines Bestandteils in einer Lösung, Feststoffgehalt in Suspensionen, siehe Seite 6.
12. Die Volumetrie wird durch die Gravimetrie als genauere und einfachere Messmethode ersetzt. Der Proportionalitätsfaktor zwischen Masse und Volumen ist die Dichte. (Es müssen geeichte Geräte verwendet werden!)
13. Sorgfältiges Einhalten der Versuchsbedingungen, z. B. Temperierung, siehe Seite 29. Der Fehler des Messwertes ist abhängig von Ablesbarkeit, Reproduzierbarkeit der Waage, Der Gesamtfehler des Ergebnisses muss nach den Regeln der Fehlerfortpflanzung berechnet werden, siehe Seite 30.
14. Siehe Betriebsanleitung der LA- und FC-Waagen-Modelle.
15. Zeitersparnis durch Fortfall des Trockenvorganges des Pyknometers, siehe Seite 23.

Index

A

Adhäsion 29
Aräometer 18, 24, 36, 40
Auftrieb 10, 11, 29, 31
Auftrieb der Probenhalterung 27
Auftriebskraft 3, 10, 12, 28
Auftriebsmethode 12, 21, 24, 27

B

Biège-Schwinger-Methode 4, 17, 18, 25, 40

D

Dichte einer Lösung 24
Dispersion 25, 38

E

Ecklastfehler 29
Emulsion 25

F

Fehlerfortpflanzung 30
Fehlerrechnung 30
Feststoffdichte 6, 15, 20
Flüssigkeiten 24, 25, 35, 36
Flüssigkeitsdichte 16, 31, 33, 37
Füllidichte 6

G

Gammakugel 25, 29
Gesamtfehler 31, 33, 40
Gesamtporosität 20, 21, 22
geschlossene Poren 40
geschlossene Porosität 20, 22
Granulat 22

H

homogene Flüssigkeiten 36
hydrostatische Waage 12
hydrostatische Wägeverfahren 12

K

konventionelle Wägewert 14
Korrekturfaktor 28, 29, 30

L

Luftauftrieb 26, 27, 29, 30
Luftauftriebs 26, 28, 39
Luftdichte 13, 26, 29, 30, 38

M

Mohr'sche Waage 12

N

Nebel 25
Normdichte 6, 7, 13

O

Oberflächenspannung 29
offene Poren 20
offene Porosität 20, 22

P

Poren 20, 22
Porosität 20, 22
Prinzip des Archimedes 9
Pulver 22, 35
Pyknometer 15
Pyknometermethode 16

R

Rauch 25
Reindichte 6, 20
Relative Dichte 6
Rohdichte 6, 20

S

Sartorius Dichteset 28
Schlierenmethode 18
Schüttdichte 6, 16, 35
Schwebeverfahren 18, 19
Schweredruck 9
spezifisches Gewicht 2
Spindeln 18
Suspension 25

T

Tauchkörper 13, 18, 24, 31
Temperaturabhängigkeit 7, 19, 37
Temperaturänderung 29, 31, 33

V

Verdrängungsmethode 12, 13, 19, 25, 28

W


Wägewert 13, 26, 38
Wasseraufnahme 22

Germany

Sartorius Lab Instruments GmbH & Co. KG
Otto-Brenner-Strasse 20
37079 Goettingen
Phone +49 551 308 0

USA

Sartorius Corporation
565 Johnson Avenue
Bohemia, NY 11716
Phone +1 631 254 4249
Toll-free +1 800 635 2906

 For further contacts, visit
www.sartorius.com