Viskositätsmessung nach Stokes

Zusammenfassung

Die Viskosität von Flüssigkeiten wird mit der Kugelfallmethode nach Stokes ermittelt. Die zur Auswertung jeweils benötigte Dichte der Flüssigkeit wird experimentell mit der Mohrschen Waage bestimmt. Neben dem einfachen Modell nach Stokes werden die Korrekturen nach Ladenburg und Oseen bei der Auswertung verwendet.

Die hier verwendeten Modellvorstellungen finden ihre Anwendung zum Beispiel bei der Berechnung von Sedimentationsprozessen in Flüssigkeiten, von Entmischungsvorgängen in Dispersionen oder auch der Bewegung von Tröpfchen in Aerosolen.

Wichtige Begriffe

Stokessche Reibung, Viskosität, laminare und turbulente Strömung, Reynoldszahl, Dichte, Auftrieb, Mohrsche Waage

Literatur:

Hering, Martin, Stohrer :	Physik für Ingenieure, Springer, 10. Auflage (2007)
Kuypers :	Physik, Band 1, VCH-Wiley, 2. Auflage (2002)
Schade, Kunz :	Strömungslehre, de Gruyter, 3. Auflage (2007)
Leute :	Physik, Hanser, 2. Auflage (2004)
Gehrtsen :	Physik, Springer, 22. Auflage (2004)

Grundlagen

Reibungsgesetz nach Stokes

Diese Methode zur Messung der Viskosität von Flüssigkeiten ist nach George Stokes (1819-1903) benannt, der 1851 ein Gesetz zur Berechnung der Reibungskraft auf eine laminar von einem Fluid umströmte Kugel aufstellte.

Das Prinzip des Experiments ist in Abbildung 1 skizziert. Eine vollständig von einem Fluid umgebene Kugel fällt darin unter Wirkung der Schwerkraft mit konstanter Geschwindigkeit nach unten. Direkt auf ihrer Oberfläche festsitzende Fluidteilchen bilden eine erste Schicht, die sich mit der Kugel mitbewegt. Mit zunehmendem Abstand von der Kugel bewegen sich die schematisch gezeichneten Fluidschichten langsamer. An der Gefäßwand (oder in großer Entfernung von der Kugel) sind sie in Ruhe.

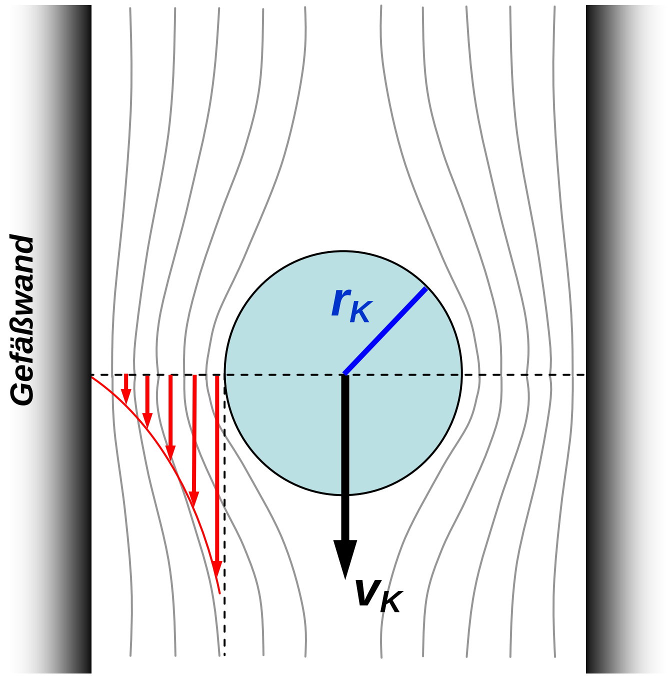


Abbildung 1 :
Schematische Skizze der Kugel im umgebenden Fluid. Sie bewegt sich mit der Geschwindigkeit v_K relativ zum Fluid. Die Bewegungsgeschwindigkeit einzelner Fluidschichten ist auf Höhe der gestrichelten Linie exemplarisch durch Pfeile symbolisiert. Die Schicht direkt an der Kugeloberfläche bewegt sich mit der Geschwindigkeit v_{max} (= v_K). Die Schicht direkt an der begrenzenden Gefäßwand bleibt in Ruhe. Ein Geschwindigkeitsprofil bildet sich aus.

Durch die Relativbewegung zwischen benachbarten Schichten gleiten die Fluidteilchen aneinander vorbei. Wechselwirkungskräfte zwischen ihnen ergeben dabei eine makroskopisch beobachtbare Reibungskraft F_R. Bewegt sich die Kugel mit der Geschwindigkeit v_K relativ zum Fluid, ist diese resultierende Kraft nach **Stokes** :

(1) $$F_R = 6\pi \, r_K \, \eta \, v_K$$

F_R : *Kraft auf die Kugel*
r_K : *Radius der Kugel*
η : *dynamische Viskosität*
v_K : *Relativgeschwindigkeit Kugel-Fluid*

Die dynamische Viskosität η ist ein Materialparameter und charakterisiert das Fluid. *<u>Hinweis</u>: Die sogenannte kinematische Viskosität ν ist auf die Dichte bezogen : $\nu = \eta/\rho$.*

Reynoldszahl

Ein Kriterium dafür, ob die Strömung eines Fluids um oder durch einen Körper laminar oder turbulent erfolgt, liefert die zugehörige dimensionslose Reynoldszahl Re :

(2) $$\mathrm{Re} = \frac{\rho\ L\ v_m}{\eta}$$

ρ_{fl} : *Dichte des Fluids*
L : *charakteristische Länge*
η : *dynamische Viskosität*
v_m : *Mittlere Fließgeschwindigkeit*

Als charakteristische Länge L wird dabei für um- oder durchströmte Körper meist der Durchmesser verwendet, im Falle einer Kugel also der Außendurchmesser, bei einem Rohr der Innendurchmesser. Solange die Reynoldszahl Re der betreffenden Strömung unterhalb eines für die Strömungsgeometrie typischen kritischen Werts Re_{krit} bleibt, ist die Strömung laminar. Bei einer Kugel liegt Re_{krit} im Bereich zwischen $2 \cdot 10^5$ und $4 \cdot 10^5$.

Korrekturen des Reibungsgesetzes

a) Höhere Strömungsgeschwindigkeiten

In der einfachen Form nach Gleichung (1) gilt das Reibungsgesetz nur, solange die Reynoldszahl der laminaren Strömung um die Kugel sehr klein ist, also für **Re << 1** . Für ein System aus Kugel und Fluid wird es also umso schlechter erfüllt sein, je höher die Strömungsgeschwindigkeit ist, selbst wenn noch lange keine Turbulenz vorliegt.

Solange die mittlere Fließgeschwindigkeit v_m des Fluids so niedrig ist, dass **Re ≤ 10** bleibt, gilt das Reibungsgesetz mit der Modifikation nach **Oseen** (1910 publiziert):

(3) $$F_R = 6\pi\ r_K\ \eta\ v_K \left(1 + \frac{3}{8}\frac{\rho\ r_K\ v_K}{\eta}\right)$$

Für den Fall noch höherer Fließgeschwindigkeit v_m des Fluids existiert eine weitere Korrektur des Reibungsgesetzes nach Abraham, die für eine Reynoldszahl bis **Re ≤ 6000** in guter Näherung gilt (1970 publiziert) :

(4) $$F_R = 6\pi\ r_K\ \eta\ v_K \left(1 + 0{,}110\sqrt{\mathrm{Re}}\right)^2$$

b) Begrenztes Fluidvolumen

Bewegt sich die Kugel entlang der Achse eines fluidgefüllten Rohrs, dann hängen die Strömungsverhältnisse offensichtlich auch vom Verhältnis aus Kugelradius r_K und Rohrradius r_{Rohr} ab. Je größer r_K / r_{Rohr} wird, umso mehr wird sich das Geschwindigkeitsprofil der Umströmung gegenüber dem von Stokes angenommenen Idealfall einer unendlich weit entfernten, das Fluid begrenzenden Rohrwand ändern.

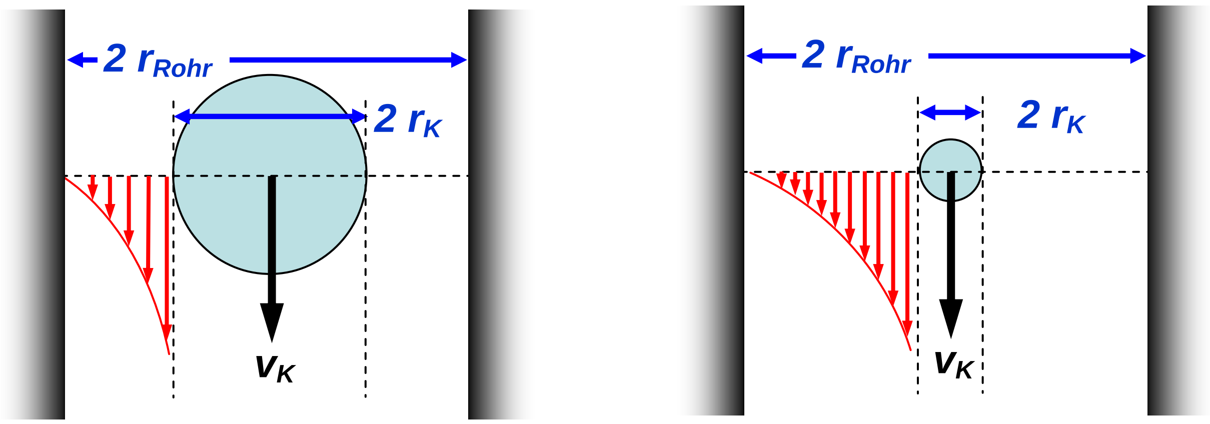


Abbildung 2 :
Links bewegt sich eine Kugel mit einem relativ zum Rohrradius r_{Rohr} großen Kugelradius r_K im Fluid. Rechts ist das Verhältnis r_K / r_{Rohr} deutlich geringer. Bei gleicher Bewegungsgeschwindigkeit v_K der Kugeln verläuft im linken Fall das Geschwindigkeitsprofil in Abhängigkeit vom Anstand zur Rohrachse daher viel steiler als im rechten Fall.

Dieser Effekt wird nach Ladenburg durch Einführung eines Korrekturfaktors in das Reibungsgesetz berücksichtigt. Je nach Reynoldszahl der Strömung wird es damit zu

(4) $$F_R = 6\pi\, r_K\, \eta\, v_K \left(1 + 2{,}1 \frac{r_K}{r_{Rohr}}\right) \qquad \text{für} \quad \frac{\rho\, r_K\, v_m}{\eta} << 1$$

(nach Stokes)

(5) $$F_R = 6\pi\, r_K\, \eta\, v_K \left(1 + \frac{3}{8}\frac{\rho\, r_K\, v_K}{\eta}\right)\left(1 + 2{,}1 \frac{r_K}{r_{Rohr}}\right) \qquad \text{für} \quad \frac{\rho\, r_K\, v_m}{\eta} \leq 5$$

(nach Oseen)

r_K : *Radius der Kugel*
r_{Rohr} : *Radius des Rohrs*

Resultierende Kraft auf die Kugel

Neben der Reibungskraft F_R wirken auf die Kugel im Experiment noch zwei weitere Kräfte. Es sind die Schwerkraft F_G und die Auftriebskraft F_A. Die resultierende Kraft auf die Kugel ergibt sich aus der vektoriellen Summe dieser drei Kräfte.

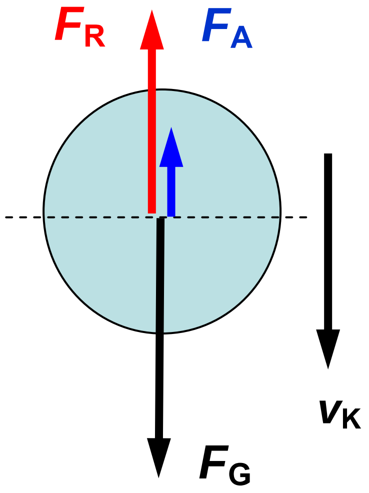


Abbildung 3 :
Kräfte auf die sich mit der Geschwindigkeit v_K relativ zum umgebenden Fluid nach unten bewegende Kugel

- *Die Gewichtskraft F_G ist nach unten gerichtet*
- *Die Auftriebskraft F_A ist nach oben gerichtet*
- *Die Reibungskraft F_R ist der Bewegungsrichtung entgegengesetzt, also ebenfalls nach oben gerichtet*

Die Gewichtskraft F_G folgt aus Kugelmasse und Erdbeschleunigung g = 9,81 m/s^2 :

(6) $$F_G = m\,g$$

m : *Masse der Kugel*
g : *Erdbeschleunigung*

Archimedes erkannte (um 250 v. Chr.) dass die auf einen in ein Fluid eingetauchten Körper einwirkende Auftriebskraft F_A gleich der Gewichtskraft des von ihm verdrängten Fluidvolumens ist. Im Experiment ist die Kugel vollständig von Fluid umgeben. Sie verdrängt daher ein Fluidvolumen, das gleich ihrem Rauminhalt V_K ist. Also gilt :

(7) $$F_A = V_K\,\rho_{fl}\,g = \frac{4}{3}\pi\,r_K^{\,3}\rho_{fl}\,g$$

r_K : *Radius der Kugel*
V_K: *Volumen der Kugel*
ρ_{fl} : *Dichte des Fluids*

Im Experiment wird die Kugel in das Fluid eingebracht und fällt darin nach einer kurzen Anlaufstrecke mit konstanter Sinkgeschwindigkeit. Grund dafür ist die Zunahme der Reibungskraft F_R mit wachsender Geschwindigkeit. Sobald die Summe aus Auftriebskraft F_A und Reibungskraft F_R gleich der Gewichtskraft F_G wird, herrscht Kräftegleichgewicht. Auf die Kugel wirkt keine resultierende Kraft mehr, sie wird nicht weiter beschleunigt, sondern bewegt sich mit konstanter Geschwindigkeit v_K weiter. Aus :

(8) $$F_G = F_R + F_A \quad \text{folgt} \quad 0 = F_R + F_A - F_G$$ und somit :

(9) $$0 = 6\pi\,r_K\,\eta\,v_K + V_K\,\rho_{fl}\,g - m\,g$$

Nach der Viskosität aufgelöst, ergibt sich für das Reibungsgesetz nach **Stokes** :

(10) $$\eta = \frac{\left(m - V_K\ \rho_{fl}\right) g}{6\pi\ r_K\ v_K}$$ ***„Stokes“***

Berücksichtigt man den Korrekturfaktor nach **Ladenburg**, ist der Zusammenhang :

(11) $$\eta = \frac{\left(m - V_K\ \rho_{fl}\right) g}{6\pi\ r_K\ v_K \left(1 + 2{,}1 \frac{r_K}{r_{Rohr}}\right)}$$ ***„Stokes / Ladenburg“***

Berücksichtigt man außerdem noch die Korrektur nach **Oseen**, folgt für die Viskosität

(12) $$\eta = \frac{\left(m - V_K\ \rho_{fl}\right) g}{6\pi\ r_K\ v_K \left(1 + 2{,}1 \frac{r_K}{r_{Rohr}}\right)} - \frac{3}{8} \rho_{fl}\ v_K\ r_K$$ ***„Oseen / Ladenburg“***

Messaufbau

Fallröhren

Für die Messungen stehen verschiedene Plexiglasröhren mit Messflüssigkeiten sowie kleine Stahlkugeln zur Verfügung. Die konstante Sinkgeschwindigkeit v_K der Kugeln wird jeweils durch Abstoppen der zum Durchlaufen einer abgemessenen Fallstrecke s benötigten Zeit t mit der Stoppuhr als $v_K = s / t$ ermittelt.

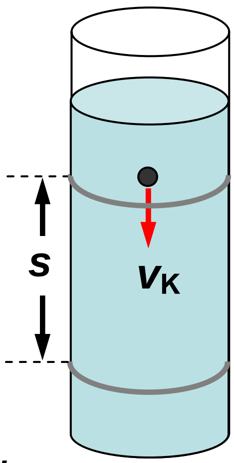


Abbildung 4 :
Plexiglasröhre mit der Messflüssigkeit, der darin mit v_K sinkenden Kugel und mit der Markierung der Fallstrecke s

Es ist zu beachten, dass die Viskosität sehr stark - in guter Näherung exponentiell - von der Temperatur abhängt. Während des Experiments sollte sich die Umgebungstemperatur also möglichst wenig ändern. Sonneneinstrahlung über einen längeren Zeitraum kann die Werte verfälschen.

Die zur Auswertung benötigten Dichten ρ_{fl} der Flüssigkeiten werden mit der **Mohrschen Waage** gemessen.

Mohrsche Waage

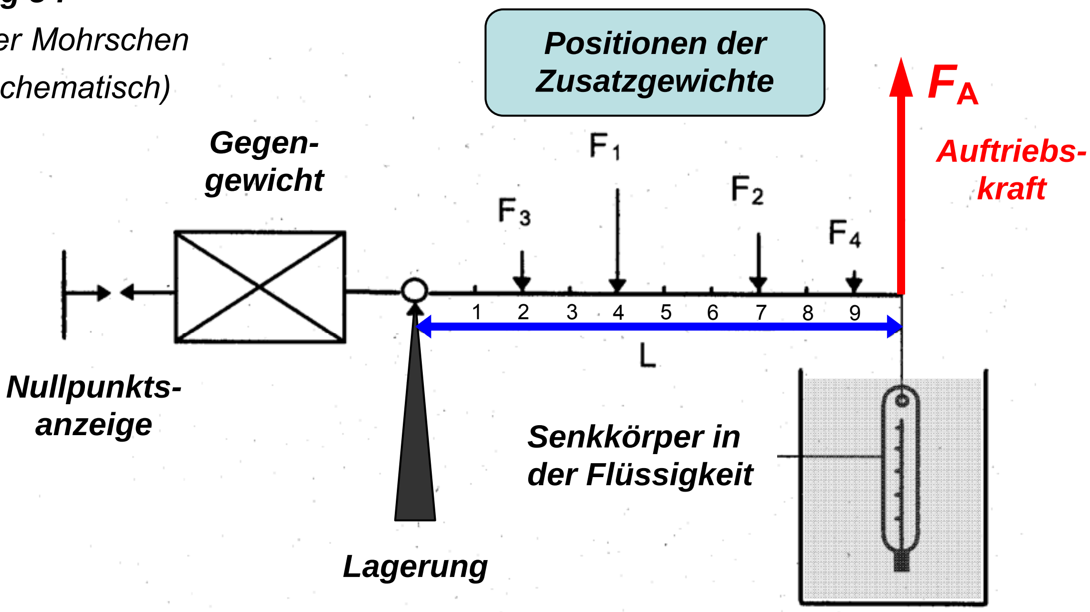
Das Prinzip von Archimedes besagt, dass die auf einen Körper wirkende Auftriebskraft gleich der Gewichtskraft des von ihm verdrängten Fluidvolumens ist (siehe Gln. 7).

Ein Probekörper vom Volumen V_0 werde nun vollständig in zwei verschiedene Flüssigkeiten eingetaucht und die jeweils auf ihn wirkenden Auftriebskräfte F_{A1} und F_{A2} gemessen. Aufgrund des Prinizips von Archimedes verhalten sie sich wie die Dichten ρ_1 und ρ_2 der beiden Flüssigkeiten. Dies wird in der Waage nach **Mohr-Westphal** zur Dichtebestimmung ausgenutzt. Sie ist eine Spezialform der hydrostatischen Waage.

Der Waagebalken dieser ungleicharmigen Waage ist auf einem höhenverstellbaren, auf drei Punkten stehenden Sockel drehbar gelagert. An einem Ende hängt ein aus Glas geformter Senkkörper. Durch ein Gegengewicht auf der anderen Seite wird das Gesamtsystem ausbalanciert, wenn sich der Senkkörper in Luft befindet. Dann herrscht Drehmomentengleichgewicht am Waagebalken, die Skalenanzeige ist Null.

Dieses Gleichgewicht wird nach Einbringen des Senkkörpers in eine Flüssigkeit durch die damit verbundene Vergrößerung der Auftriebskraft gestört. Der Senkkörper scheint leichter zu werden. Durch Anbringen von Zusatzgewichten auf der Seite des Senkkörpers kann der zusätzliche Auftrieb kompensiert und das Gleichgewicht wiederhergestellt werden. Der Waagebalken ist dafür durch Stifte in zehn gleiche Teile geteilt. An diesen Positionen können Wägestücke oder Reiter eingehängt werden.

Abbildung 5 :
Aufbau der Mohrschen Waage (schematisch)



Die Zusatzgewichte haben die Massen m_1 = 10,00 g, m_2 = 1,00 g, m_3 = 0,100 g und m_4 = 0,010 g. Außer diesen Werten liegen vom Hersteller keine Angaben über Toleranzen vor. Eventuelle Abweichungen führen zu einem systematischen Fehler.

An einer Schneide am Ende des Waagebalkens wird der Senkkörper aufgehängt. Im Versuch wird dafür ein Glaskörper mit einem Volumen V_0 = 10,00 cm^3 verwendet. Auch zu diesem liegt vom Hersteller keine weitere Angabe über die Toleranz vor.

De Massen der Wägestücke und Reiter sind so aufeinander abgestimmt, dass man aus ihrer Position auf dem Waagebalken ohne weitere Umrechnung die Dichte der Messflüssigkeit auf vier gültige Ziffern ablesen kann. Eine solche Genauigkeit ist etwa zum Nachweis der Dichteanomalie von Wasser erforderlich. Die Mohrsche Waage kann für Flüssigkeiten mit Dichtewerten $\rho_{fl} \leq 2$ g/cm^3 verwendet werden.

Messbeispiel

Die Einstellung des Drehmomentengleichgewichts am Waagebalken und der sich daraus ergebende Wert für die Dichte soll hier anhand eines Fallbeispiels vorgeführt werden. Es beruht auf der Annahme, zur Einstellung des Gleichgewichtes seien folgende Zusatzgewichte (Wägestücke und Reiter) notwendig gewesen :

Reiter	Masse	Position	$x_i = L_i / L$	Ausgeübtes Drehmoment
1	m_1 = 10,00 g	$L_1 = 0{,}4\ L$	0,4	$M_1 = m_1\ g\ x_1\ L$
2	m_2 = 1,00 g	$L_2 = 0{,}7\ L$	0,7	$M_2 = m_2\ g\ x_2\ L$
3	m_3 = 0,100 g	$L_3 = 0{,}2\ L$	0,2	$M_3 = m_3\ g\ x_3\ L$
4	m_3 = 0,010 g	$L_4 = 0{,}9\ L$	0,9	$M_4 = m_4\ g\ x_4\ L$

Der Betrag der nach oben gerichteten Auftriebskraft F_A auf den vollständig in die Flüssigkeit der Dichte ρ_{fl} eingetauchten Senkkörper mit seinem Volumen V_0 ist :

(13) $$F_A = m_{fl}\ g = V_0\ \rho_{fl}\ g$$

Sie greift senkrecht zum Waagebalken an dessen Ende im Abstand L zum Lager an und ergibt ein linksdrehendes (mathematisch positives) Drehmoment M_{pos} vom Betrag :

(14) $$M_{pos} = F_A\ L = V_0\ \rho_{fl}\ g\ L$$

Die Gewichtskraft der einzelnen Zusatzgewichte m_i an den Positionen x_i ergibt jeweils ein rechtsdrehendes (mathematisch negatives) Drehmoment auf den Waagebalken. Der Betrag der Summe M_{neg} aller dieser Drehmomente ist

$$M_{neg} = m_1\ g\ x_1\ L + m_2\ g\ x_2\ L + m_3\ g\ x_3\ L + m_4\ g\ x_4\ L$$

Drehmomentengleichgewicht herrscht bei Betragsgleichheit, also für $M_{neg} = M_{pos}$:

$$V_0\ \rho_{fl}\ g\ L = m_1\ g\ x_1\ L + m_2\ g\ x_2\ L + m_3\ g\ x_3\ L + m_4\ g\ x_4\ L$$

damit gilt

(15) $$\rho_{fl} = \frac{m_1\ x_1 + m_2\ x_2 + m_3\ x_3 + m_4\ x_4}{V_0}$$

Im vorliegenden Fall mit einem Volumen des Senkkörpers von V_0 = 10,00 cm^3 und den Massen der Zusatzgewichte von 10,00 g, 1,00 g, 0,100 g und 0,010 g folgt aus Gln. 15:

$$\rho_{fl} = \frac{x_1 10\,\mathrm{g} + x_2 1\mathrm{g} + x_3 0{,}1\mathrm{g} + x_4 0{,}01\mathrm{g}}{10\ \mathrm{cm}^3}$$

(16) $$\rho_{fl} = \left(x_1 + \frac{1}{10} x_2 + \frac{1}{100} x_3 + \frac{1}{1000} x_4 \right) \frac{\mathrm{g}}{\mathrm{cm}^3}$$

Die Werten für x_i aus dem Fallbeispiel ergeben also eine Dichte von ρ_{fl} =0,4729 g/cm^3

Weitere Kommentare

- Ein nicht benutztes Zusatzgewicht liefert für seine Dezimale den Wert 0.

- Für Flüssigkeiten der Dichte ρ_{fl} > 1 g/cm^3 hängt der schwerste Reiter mit m_1 = 10,00 g in der Aufhängung für den Senkkörper. Wird kein zweiter Reiter der Masse m_1 = 10,00 g mehr benötigt, dann ist die zweite gültige Ziffer, also die erste Stelle hinter dem Dezimalpunkt, eine Null.

- Um genaue Messwerte zu erhalten, ist die gemessene Dichte noch zu korrigieren :
  - Auf den Senkkörper wirkt bereits bei der Justierung in Luft eine Auftriebskraft
  - Auf die angehängten Zusatzgewichte wirkt in Luft ebenfalls ein Auftrieb

In Worten ausgedrückt ergibt sich die folgende Situation:

Wahre Masse der verdrängten Flüssigkeit

= *gemessene scheinbare Masse der verdrängten Flüssigkeit*

+ (Volumen Senkkörper – Volumen Wägestücke) x Dichte der Luft

Um den gemessenen scheinbaren Dichtewert ρ_{mess} auf den korrigierten Dichtewert ρ_{korr} umzurechnen, muss durch das Volumen V_0 des Senkkörpers dividiert werden

(17) $$\rho_{korr} = \rho_{mess} + \left(1 - \frac{V(\text{Zusatzgewichte})}{V_0}\right)\rho_{Luft}$$

Im Fall des Versuchsaufbaus sind folgende Daten zu berücksichtigen

Senkkörper aus Glas : $V_0 = 10{,}00\ \text{cm}^3$

Zusatzgewichte aus Messing $\rho_{\text{Messing}} = 8{,}4\ \text{g / cm}^3$

Dichte von trockener Luft bei 20°C $\rho_{\text{Luft}} = 1{,}2 \cdot 10^{-3}\ \text{g / cm}^3$

Damit beläuft sich das Volumen der Zusatzgewichte bei einer Gesamtmasse von 10 g auf etwa $V(\text{Zusatzgewichte}) = m / \rho_{\text{Messing}} = 1{,}19\ \text{cm}^3$

Aus Gln. 17 folgt damit

(18) $$\rho_{korr} = \rho_{mess} + \left(1 - \frac{1{,}19\,\text{g}\,\text{cm}^{-3}}{10\,\text{g}\,\text{cm}^{-3}}\right)1{,}2 \cdot 10^{-3}\,\text{g}\,\text{cm}^{-3} = \rho_{mess} + 1{,}06 \cdot 10^{-3}\,\text{g}\,\text{cm}^{-3}$$

Experimentelle Hinweise zur Mohr-Westphalschen Nachfolgewaage (Phywe)

Senkkörper aus Glas: V_0 = 10,00 cm^3

Wägekörper/Reiter: Gesamtmasse m = 30,0 g in Luft im Gleichgewicht mit dem Gegenkörper auf dem linken Waagebalken.

Einhängethermometer 0°C ≤ ϑ ≤ 30°C

Durchführung der Messung

Die Waage wird mit eingehängtem Senkkörper in Luft so aufgestellt, dass sie im Gleichgewicht ist. Die Justierschraube wird so eingestellt, dass sich die Spitzen von Waagbalken und Ableseskala genau gegenüberstehen. Danach wird der Senkkörper in die zu messende Flüssigkeit eingetaucht. Dabei ist zu beachten

- Der Senkkörper muss vollständig eintauchen.
- Der Senkkörper darf keinen Kontakt mit der Wand haben.
- Der Senkkörper muss frei von Luftblasen sein.
- Die Wägestücke/Reiter müssen frei von Verunreinigungen sein.
- Die Reiter nur mit der Pinzette anfassen!

Wie bei jeder Wägung beginnt man mit dem größten Wägestück (m = 10 g). Der Ausschlag beim Einhängen an der Schneide mit dem Tauchkörper zeigt sofort an, ob die Dichte der untersuchten Flüssigkeit größer oder kleiner als ρ = 1,0 g cm^{-3} ist. Ist die Dichte kleiner, so hängt man das Wägestück nacheinander auf die Stifte 9, 8, usw. bis die Spitze des Waagebalkens sich gerade unterhalb der Spitze auf der Skalenseite befindet. Dann nimmt man das jeweils nächstkleinere Wägestück oder den betreffenden Reiter und verfährt in gleicher Weise. Die Reiter können auch ineinander gehängt werden, es können also zwei verschiedene Wägestücke/Reiter am gleichen Stift hängen.

Wenn die Waage im Gleichgewicht ist wird die Dichte durch Ablesen der Positionen der Zusatzgewichte bestimmt.

Aufgaben:

Die Viskosität von vier Flüssigkeiten ist nach Stokes aus Fallversuchen mit Stahlkugeln zu ermitteln. Dies geschieht in allen vier Fällen jeweils in gleicher Weise.

Aufgabe 1: Ermittlung der geometrischen Daten

a) Bestimmen Sie Masse und Radius der verwendeten Stahlkugeln und schätzen Sie für beide Größen den Fehler ab.

b) Bestimmen Sie den Innenradius der Fallröhren, ebenfalls mit Fehlerabschätzung.

c) Messen sie die Fallstrecke und schätzen Sie den Fehler ab.

Aufgabe 2: Fallexperiment

a) Ermitteln Sie die Temperatur der Messflüssigkeiten.

b) Messen Sie die Fallzeit für die Fallstrecke als Mittelwert aus jeweils 20 Messungen mit der Stoppuhr.

Aufgabe 3: **Dichtemessung**

Messen Sie die Dichte der Messflüssigkeiten mit der Mohrschen Waage.

Testat zu den Arbeiten im Labor: Messtabellen, Berechnung mindestens eines Viskositätswerts, Dichtewerte der vier Flüssigkeiten

Auswertung:

- Berechnen Sie die Viskositäten der Flüssigkeiten nach allen drei Modellen (Stokes, Stokes / Ladenburg, Oseen / Ladenburg) zusammen mit den sich jeweilis ergebenden Reynoldszahlen. Welches Gewicht haben die Korrekturen nach Ladenburg und Oseen ?
- Diskutieren Sie die Vertrauenswürdigkeit der ermittelten Viskositäten mit Bezug auf die Reynoldszahlen und den Gültigkeitsbereich der verwendeten Modelle.
- Vergleichen Sie – soweit möglich - die ermittelten Viskositätswerte mit der Literatur und führen Sie eine Fehlerrechnung durch.
- Sind eventuelle Abweichungen zu den Literaturwerten physikalisch erklärbar ?