

Skript zum Versuch

A40

Viskosität von Flüssigkeiten: Höppler- und Ostwald-Viskosimeter

Dez. 2018

Herausgeber: Institut für Physikalische Chemie

1 Aufgabe

Mit einem Kugelfallviskosimeter nach Höppler ist die Viskosität von Wasser bei 25, 30, 40 und 50 °C zu bestimmen. Mittels eines Kapillarviskosimeters nach Ostwald ist die Viskosität von Wasser, Ethanol und einer Wasser-Ethanol-Mischung bei 20 °C zu ermitteln.

2 Grundlagen

2.1 Allgemeines

Gleitet ein fluides Medium parallel zu einer Wand – wie z. B. bei der Strömung in einem Rohr –, dann bewegen sich die Moleküle in der Nähe der Wand langsamer in Fließrichtung als diejenigen, die weiter von der Wand entfernt sind. Der Grund für dieses Verhalten besteht in den attraktiven Wechselwirkungen der Moleküle zur stationären Wand: die erste Molekülschicht „klebt“ dort gleichsam fest, während die entfernten Molekülschichten durch den Druckunterschied an den Rohrenden vorangetrieben werden. Die Verhältnisse sind schematisch in Abb. 1 wiedergegeben.

Es sei z die Fließrichtung und die Koordinate x senkrecht dazu, dann baut sich in einem strömenden Medium in x -Richtung ein Gradient der z -Komponente des Vektors der Fließgeschwindigkeit \vec{v} auf:

$$\frac{dv_z}{dx} \neq 0 \quad (1)$$

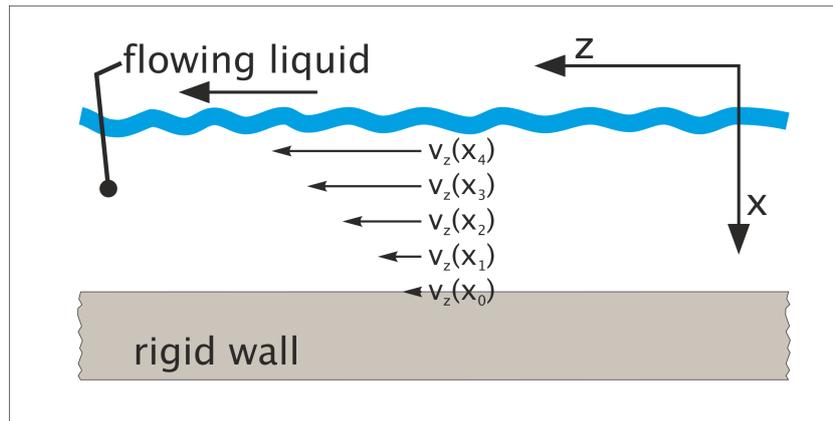


Abbildung 1: Schematische Darstellung einer fließenden Flüssigkeit im Kontakt mit einer starren Wand. Die Strömungsgeschwindigkeit (genauer die z -Komponente des Geschwindigkeitsvektors) wird umso größer, je weiter entfernt eine gedachte Flüssigkeitsschicht von der Wand ist.

Dieser Geschwindigkeitsgradient ist die treibende Kraft für den Impulsaustausch oder anders ausgedrückt für den Impulstransport zwischen den Schichten: Die z -Komponente des Impulsvektors \vec{p} wird in x -Richtung transportiert. Der Proportionalitätsfaktor ist die *dynamische Viskosität* oder *Zähigkeit* η des Fluids.

Für eine mikroskopische Deutung des Phänomens betrachtet man die Moleküle innerhalb einer Schicht, die sich z -Richtung bewegen. Wechselt eines dieser Moleküle die Schicht (etwa durch Diffusion in x -Richtung), dann nimmt es seinen Impuls $p_z(n)$ aus den n -ten Schicht in die Schicht $n + 1$ mit und verlangsamt oder beschleunigt diese Nachbarschicht. Dabei ist die pro Zeiteinheit transportierte Impulsmenge, die als Reibungskraft F_R aufgefasst werden kann, dem Geschwindigkeitsgefälle und der Querschnittsfläche A proportional. Das Transportgesetz lautet dabei völlig analog zum 1. Fickschen Diffusionsgesetz:

$$\frac{dp_z}{dt} = F_R = -\eta A \frac{dv_z}{dx} \quad (2)$$

Die z -Komponente des Impulses wird also in x -Richtung transportiert. Flüssigkeiten, deren Viskositäten nicht von der Strömungsgeschwindigkeiten \vec{v} abhängen, heißen *Newtonsche Flüssigkeiten*.

2.2 Kugelfallviskosimeter nach Höppler

Beim so genannten Höpplerschen¹ Kugelfallviskosimeter (siehe Abb. 2) macht man sich die Stokessche Gleichung zur Bestimmung der dynamischen Viskosität η zunutze. Danach gilt für die Reibungskraft F_R an einer laminar umströmten Kugel mit dem Radius r :

¹Ernst Fritz Höppler (1897-1955)

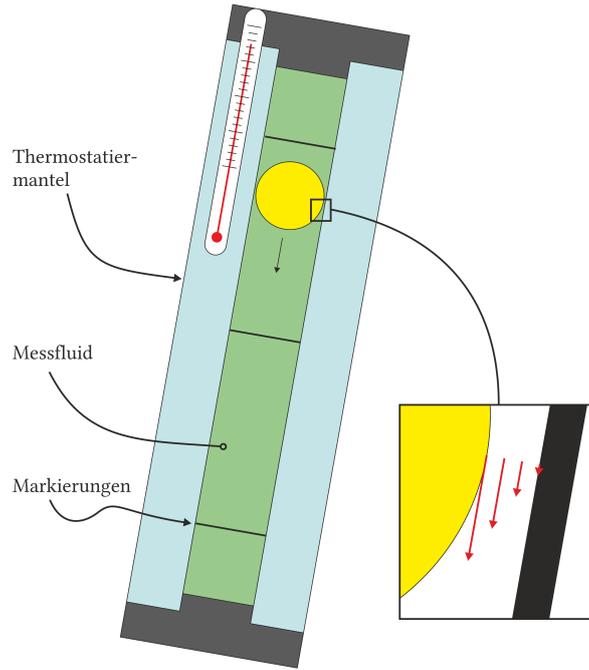


Abbildung 2: Kugelfallviskosimeter nach Höppler

$$F_R = 6\pi r v \eta \quad (3)$$

Diese Reibungskraft F_R steht im Gleichgewicht mit der Gewichtskraft F_G der Kugel vermindert um deren Auftriebskraft F_A in der entsprechenden Flüssigkeit:

$$\begin{aligned} F_R &= F_G - F_A \\ F_R &= (\rho_K - \rho_{Fl}) V_K g, \end{aligned} \quad (4)$$

Hierbei steht ρ_K und ρ_{Fl} für die Dichten der Kugel und der Flüssigkeit, V_K für das Kugelvolumen, sowie g für die Erdbeschleunigung. Durch Gleichsetzen von (3) und (4) unter Berücksichtigung von $v = s/t$ und $V_K = \frac{4}{3}\pi r^3$ folgt:

$$\eta = \frac{2r^2 g}{9s} (\rho_K - \rho_{Fl}) t = K (\rho_K - \rho_{Fl}) t, \quad (5)$$

wobei K die sogenannte Kugelkonstante und t die Fallzeit entlang der Strecke s ist. Da in der Praxis die Stokessche Formel (3) nicht streng gültig ist, verwendet man in Gleichung (5) eine Kugelkonstante K , die man zuvor durch Eichmessungen bestimmt hat.

Die Temperaturabhängigkeit der Viskosität folgt in Flüssigkeiten einem Exponentialgesetz:

$$\frac{1}{\eta} = B \exp\left(-\frac{E_A}{RT}\right) \quad \text{oder umgeformt:} \quad \ln \eta = \frac{E_A}{RT} + \ln(B^{-1}) \quad (6)$$

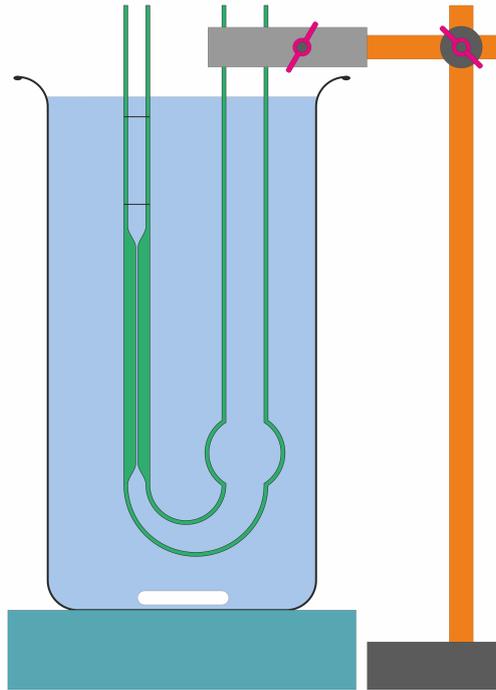


Abbildung 3: Kapillarviskosimeter nach Ostwald

Hierbei ist E_A die Aktivierungsenergie und B der sogenannte präexponentielle Faktor. R ist die universelle Gaskonstante und T die absolute Temperatur.

2.3 Kapillarviskosimeter nach Ostwald

Mit dem Ostwaldschen² Kapillarviskosimeter (Abb. 3) wird die sogenannte kinematische Viskosität ν bestimmt, die mit der dynamischen Viskosität η über die Dichte ρ verknüpft ist:

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad (7)$$

Die Gesetzmäßigkeit, die der Bestimmung der kinematischen Viskosität ν zugrunde liegt, ist das Gesetz von Hagen-Poiseuille³ für die Strömung von Fluiden durch Kapillaren:

$$\nu = \frac{\pi r^4 g \Delta h t}{8 l V} . \quad (8)$$

Dabei steht r für den Innenradius der Kapillare, g ist wieder die Erdbeschleunigung (Ortsfaktor), Δh für die mittlere Höhendifferenz der Flüssigkeitssäule, t ist die Durchflusszeit, l die Länge der Kapillare und V für das Durchflussvolumen. Da dieses Gesetz

²Wilhelm Ostwald (1853-1932)

³G. H. L. Hagen (1797-1884) und J. L. M. Poiseuille (1797-1869)

nur für unendlich lange Kapillaren exakt gültig ist, muss bei Verwendung eines Kapillarviskosimeters eine Korrektur, die so genannte Hagenbach-Korrektur⁴, eingeführt werden, welche die Vorgänge am Ein- und Auslauf der Kapillare berücksichtigt:

$$\nu = \frac{\pi r^4 g \Delta h t}{8 l V} - \underbrace{\frac{m V}{8 \pi l t}}_{\text{Hagenbach-Korrektur}} \quad (9)$$

Hierbei hängt der empirische und dimensionslose Faktor m von der Form des Anfangs und besonders des Endes der Kapillare ab.

2.4 Einheiten der Viskosität

	heute gebräuchliche Einheiten	früher gebräuchliche Einheiten
η	$\text{Pa} \cdot \text{s} = \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}}$	1 Poise = 0,1 Pa · s
ν	$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$	1 Stokes = $10^{-4} \text{m}^2 \text{s}^{-1} = 1 \text{cm}^2 \text{s}^{-1}$

3 Durchführung

3.1 Kugelfallviskosimeter nach Höppler

Zunächst vergewissert man sich, dass der Thermostat ausreichend Wasser zur Temperierung enthält (ggf. mit VE-Wasser auffüllen!), dann stellt man den Kühlwasserkreislauf und den Thermostaten an. Anschließend stellt man die gewünschte Temperatur (Oberkante des Metallpegels am Kontaktthermometer) ein. Nach etwa 10 min ist der Temperatureausgleich zwischen dem Fallrohr und dem Mantelgefäß des Viskosimeters erreicht.

In der Zwischenzeit wird das Viskosimeter so positioniert, dass

- es frei schwenkbar ist (Achtung: Abklemmen und Verdrillen der Wasserschläuche vermeiden),
- das Thermometer im Wassermantelgefäß abgelesen werden kann und
- sich das Viskosimeter „im Wasser“ befindet (heißt: die Libelle am Standfuß des Viskosimeters muss zentriert sein).

Zudem überprüft man, dass das Fallrohr des Viskosimeters keine Luftblasen enthält (Öffnung des Viskosimeters und Entfernen der Blase nur durch den/die Assistent/in).

Messung

Man löst die Arretierung und dreht das Viskosimeter um 180°. Mit einer Stoppuhr misst man die Zeit, welche die Kugel zum Durchfallen der Strecke zwischen der oberen und der unteren Ringmarkierung des Fallrohrs benötigt.

⁴E. Hagenbach-Bischoff (1833-1910)

Bei 25, 30, 40 und 50 °C sind jeweils 5 Messungen durchzuführen. Bei jeder Messung ist die im Mantelgefäß herrschende Temperatur zu notieren; die Kugelkonstante K und die Dichte der Kugel ρ_K sind am Arbeitsplatz angegeben. Für die Messungen bei 40 und 50 °C sollte die Kühlung des Thermostaten abgeschaltet werden (Schließen des Kühlwasserhahns).

3.2 Kapillarviskosimeter nach Ostwald

Die Thermostatisierung des Viskosimeters erfolgt mit einem großen VE-Wasserbad (VE-Wasser aus einem Wasserkanister im Labor entnehmen. Kanister anschließend auffüllen), das mit Hilfe von Eiswürfeln auf (20 ± 1) °C eingestellt wird. Zur schnelleren Temperaturequilibration des Viskosimeters wird das Wasserbad mit Hilfe eines Magnetrührers gerührt (wichtig ist hierbei, dass das Viskosimeter bis weit über die obere Ringmarkierung in das Bad eintaucht!). Etwa 10 min nach jeder Befüllung ist der Temperatureausgleich zwischen Viskosimeter und Wasserbad erreicht.

Messung

Zunächst wird das Viskosimeter mit der zu messenden Flüssigkeit eingespült. Hierzu werden 3,00 mL der Probe durch den weiten Teil des Viskosimeters eingefüllt und mit Hilfe eines Peleusballs durch die Kapillare in den Teil oberhalb der Kapillare gesaugt. Anschließend wird die Lösung verworfen und das Viskosimeter erneut mit 3,00 mL der Flüssigkeit befüllt. Die Flüssigkeit wird abermals in den engeren Teil des Viskosimeters gesaugt, bis die obere Ringmarkierung überschritten ist. Mit einer Stoppuhr misst man die Zeit, welche die Flüssigkeit zum Abfließen der Strecke zwischen der oberen und der unteren Ringmarkierung benötigt. Es sind jeweils 3 Messungen je Probe durchzuführen. Bei jeder (!) Messung ist die im Wasserbad herrschende Temperatur zu notieren.

Zuerst kalibriert man das Viskosimeter mit VE-Wasser, anschließend erfolgt die Messung von reinem Ethanol und dann einer Mischung gleicher Volumenanteile von Ethanol und Wasser.

$$\nu_{\text{Probe}} = \underbrace{\frac{\nu_{H_2O}(20^\circ\text{C})}{t_{H_2O}(20^\circ\text{C})}}_{\text{Kalibrierwert}} \cdot t_{\text{Probe}} - \underbrace{1,2 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \frac{1}{t_{\text{Probe}}}}_{\text{Hagenbach-Korrektur}} \quad (10)$$

Die erforderlichen Daten für $\eta_{H_2O}(20^\circ\text{C})$ und $\rho_{H_2O}(20^\circ\text{C})$ finden Sie im Anhang.

4 Aufgaben

4.1 Kugelfallviskosimeter nach Höppler

1. Berechnen Sie zunächst die Mittelwerte und Standardabweichungen der zu einem Messpunkt gehörigen Fallzeiten t und Temperaturen T . Bestimmen Sie hieraus die entsprechenden dynamischen Viskositäten η und tragen Sie diese graphisch gegen

die Temperatur auf. Zeichnen Sie auch die Fehlerbalken für die Viskosität ein. Vergleichen Sie ihre Ergebnisse mit Literaturwerten.

2. Tragen Sie graphisch den natürlichen Logarithmus der dynamischen Viskosität η gegen den Kehrwert der Temperatur auf und leiten Sie hieraus die Aktivierungsenergie E_A ab.
3. Treffen Sie eine sinnvolle Annahme für den Radius r_{H_2O} eines Wassermoleküls und berechnen Sie mit Hilfe der Stokes-Einstein-Gleichung (11) den Selbst-Diffusionskoeffizienten D für Wasser bei 20 °C.

$$D = \frac{k_B T}{6\pi\eta r} \quad (11)$$

4.2 Kapillarviskosimeter nach Ostwald

1. Bestimmen Sie mit Hilfe von Gleichung (10) zunächst die kinematischen Viskositäten ν ihrer beiden Proben, anschließend deren dynamische Viskositäten η . Alle hierfür erforderlichen Daten finden Sie im Anhang.
2. Versuchen Sie eine Interpretation des überraschenden, experimentellen Ergebnis.

4.3 Allgemeines

1. Ordnen Sie folgende Flüssigkeiten nach steigender Viskosität und erklären Sie die Reihenfolge: Wasser, Aceton, Glycerin, Methanol
2. Diskutieren Sie die Ähnlichkeit zwischen der Beziehung für die Temperaturabhängigkeit der Viskosität für Flüssigkeiten und der Arrhenius-Gleichung für die T-Abhängigkeit chemischer Reaktionen.

Hinweis

Bitte halten Sie sich bei der Bearbeitung der Aufgaben sowohl an die vorgegebene Reihenfolge als auch an die im Skript verwendete Nomenklatur.

Achten Sie außerdem bei Ihren Angaben auf eine sinnvolle Anzahl signifikanter Stellen sowie auf Vollständigkeit der Einheiten.

Denken Sie bei allen Berechnungen auch an eine entsprechende Fehlerrechnung.

5 Literaturdaten

Die Daten können z. B. dem CRC-Handbook of Chemistry and Physics (verschiedene Auflagen, liegt im Praktikum aus) entnommen werden.

$\eta_{H_2O}(20\text{ }^\circ\text{C})$	$1,000 \cdot 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$
$\rho_{H_2O}(20\text{ }^\circ\text{C})$	$998,3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
$\rho_{H_2O-EtOH}(20\text{ }^\circ\text{C})$	$929,6 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
$\rho_{EtOH}(20\text{ }^\circ\text{C})$	$789,3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

6 Was man wissen sollte

Transportgesetze, Newtonsche und Nicht-Newtonsche Flüssigkeiten, Messmethoden der Viskosität, Temperatur- und Druckabhängigkeit von Gasen und Flüssigkeiten.

7 Hinweise zur Gefährdungsbeurteilung

Analysieren Sie die Gefahren, die sich aus den verwendeten Methoden und aus den verwendeten Stoffe ergeben können.

Diskutieren Sie:

- Verhaltensmaßregeln (organisatorische und administrative Regeln)
- Technische Schutzmaßnahmen
- Persönliche Schutzausrüstung