

Nr. 207

## **Das Kugelfall Viskosimeter nach Höppler**

Sara Krieg  
sara.krieg@udo.edu

Marek Karzel  
marek.karzel@udo.edu

Durchführung: 06.11.2018

Abgabe: 13.11.2018

TU Dortmund – Fakultät Physik

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Theorie</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Durchführung</b>	<b>4</b>
<b>3</b>	<b>Auswertung</b>	<b>5</b>
3.1	Viskosität von Wasser . . . . .	5
3.2	Temperaturabhängigkeit der Viskosität . . . . .	7
3.3	Reynolds Zahl . . . . .	7
<b>4</b>	<b>Diskussion</b>	<b>9</b>
<b>5</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>9</b>

# 1 Theorie

Bei diesem Versuch soll die Temperaturabhängigkeit der dynamischen Viskosität von destilliertem Wasser mit Hilfe der Kugelfall-Methode nach Höppler ermittelt werden. Dazu wird die Apparaturkonstante des verwendeten Viskosimeters ermittelt. Weiterhin muss mit Hilfe der Reynoldszahl überprüft werden, ob laminare Strömungsverhältnisse gegeben sind.

Zunächst werden die Kräfte betrachtet, die auf einem Körper wirken, der sich durch eine Flüssigkeit bewegt:

$$F_{ges} = F_g - F_a - F_r \quad (1)$$

Dabei bezeichnet  $F_g$  die Gravitationskraft,  $F_a$  die Auftriebskraft und  $F_r$  die Reibungskraft, welche hier zunächst ohne Beweis als Stokesche Reibung angenommen wird. Somit ergibt sich:

$$F_{ges} = \rho_K \cdot V_K \cdot g - (\rho_K - \rho_F) \cdot V_K - 6\pi \cdot \eta \cdot v \cdot r \quad (2)$$

Dabei ist  $\rho_K$  die Dichte der Kugel,  $V_K$  das Volumen der Kugel,  $\rho_F$  die Dichte der verwendeten Flüssigkeit,  $\eta$  die Viskosität,  $v$  die Geschwindigkeit, mit der die Kugel fällt und  $r$  ihr Radius. Die Geschwindigkeit  $v$  wird konstant, sobald sich ein Kräftegleichgewicht zwischen den wirkenden Kräften einstellt.

Der Begriff Viskosität  $\eta$  lässt sich als "Zähflüssigkeit" interpretieren. Diese Größe ist materialabhängig. Beispielweise ist Honig sehr viel zähflüssiger als Wasser, welches an dessen höherer Viskosität liegt. Demnach werden Bewegungen von Flüssigkeiten durch die dynamische Viskosität dieser charakterisiert. Bestimmen lässt sich  $\eta$  zum Beispiel mit dem Kugelfallviskosimeter nach Höppler, welches hier verwendet wird. Dabei gilt die folgende empirische Gleichung:

$$\eta = K \cdot (\rho_K - \rho_F) \cdot t \quad (3)$$

Mit der Falldauer  $t$ , sowie der Apparaturkonstanten  $K$ . Die dynamische Viskosität wird als dynamisch bezeichnet, weil sie stark temperaturabhängig ist. Häufig gilt die Andradesche Gleichung:

$$\eta(T) = A \cdot \exp\left(\frac{B}{T}\right) \quad (4)$$

Dabei sind A und B Konstanten.

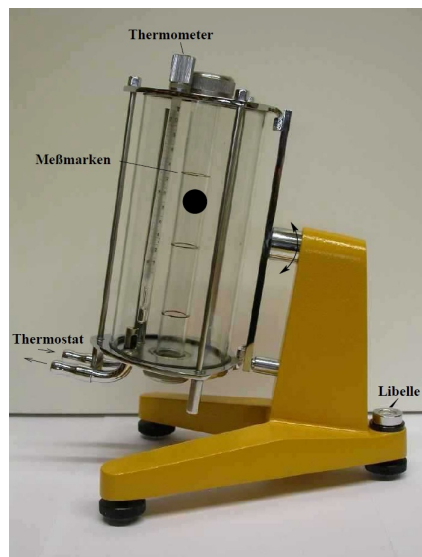
Diese Zusammenhänge gelten allerdings nur für sogenannte "Newtonsche Fluide", in denen der Geschwindigkeitsverlauf linear ist. Voraussetzung für solche Fluide sind laminare Strömungsverhältnisse, bei denen die Flüssigkeitsschichten wirbelfrei aneinander abgleiten. Erst wenn solche Strömungsverhältnisse gegeben sind, kann die Reibungskraft als Stokesche Reibung angenommen werden. Ob eine Strömung laminar oder turbulent ist, kann anhand der Reynolds-Zahl abgeschätzt werden.

$$Re = \frac{\rho_F \cdot v_m \cdot 2r}{\eta} \quad (5)$$

Dabei bezeichnet  $\rho_F$  die Dichte und  $\eta$  die Viskosität der Flüssigkeit.  $v_m$  ist die mittlere Geschwindigkeit der Kugel und  $r$  ihr Radius. Erhält man für  $Re$  einen Wert, der unter 1160 liegt, so kann man davon ausgehen, dass die Strömung laminar ist.

## 2 Durchführung

Das verwendete Viskosimeter ist in Abbildung 1 dargestellt.



**Abbildung 1:** Höppler Viskosimeter

Drei an dem inneren Rohr befindliche Messmarken markieren eine Strecke von 10 cm. Umgeben wird das Rohr von Wasser, dessen Temperatur durch ein angeschlossenes Thermostat samt Pumpe geregelt wird. An einem Thermometer kann die momentane Temperatur abgelesen werden. Durch Abschrauben des Deckels kann das Glasrohr im Inneren mit dem Fluid und der Kugel befüllt werden. Die gesamte Zylinderstruktur lässt sich um 180° rotieren. Eine Libelle zeigt an, ob sich der Aufbau in Waage befindet. Für das Experiment stehen zwei Glaskugeln mit unterschiedlichen Radien zur Verfügung.

Zunächst werden die Radien der beiden Glaskugeln und das Gewicht mit einer Waage bestimmt. Daraus lässt sich jeweils die Dichte bestimmen. Danach wird das Viskosimeter in Waage gebracht und anschließend mit destilliertem Wasser befüllt. Entstandene Luftbläschen werden mit einem Glasstab entfernt und danach die kleinere der beiden Kugeln in die Flüssigkeit eingetaucht. Das Viskosimeter wird verschlossen und mit Stoppuhr gemessen, wie lange die Kugel benötigt, um die 10 cm Flüssigkeit bei Raumtemperatur zu durchlaufen. Der Vorgang wird durch kippen des Glaszylinders insgesamt 10 Mal

wiederholt, bevor auch die zweite Kugel auf die selbe Art verwendet wird. Es entstehen folglich für jede Kugel 10 Messwerte. Außerdem wird die Temperatur des Wassers notiert.

Da man nun auch die Temperaturabhängigkeit messen will, wird das Thermostat angeschaltet. Das Wasserbad wird bis zu 70°C aufgeheizt. Auf diese Weise werden für die große Kugel Fallzeiten bei 10 Temperaturen von 21.5°C bis 70°C ermittelt. Jede Fallzeit wird dabei zwei Mal gemessen.

### 3 Auswertung

#### 3.1 Viskosität von Wasser

Zunächst wird die Dichte der beiden Kugeln berechnet. Für die Kugeln ergaben sich die in Tabelle 1 dargestellten Messwerte für den Durchmesser und die Masse, sowie die daraus berechneten Werte für das jeweilige Volumen und die Dichte.

**Tabelle 1:** Messwerte für Durchmesser, Masse und berechnetes Volumen und Dichte

$d / \text{mm}$	$m / \text{g}$	$V / \text{cm}^3$	$\rho / \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$
15.8	5.38	2.07	2.60
15.6	4.95	1.99	2.49

Zunächst wurde die Fallzeit der kleinen und großen Kugel bei 21.5°C jeweils 10 Mal gemessen. Die ermittelten Werte sind in Tabelle 4 aufgetragen.

**Tabelle 2:** Messwerte für die Fallzeiten

$t (\text{kleine Kugel}) / \text{s}$	$t (\text{grosse Kugel}) / \text{s}$
12.47	79.95
12.53	80.32
12.33	80.27
12.29	80.10
12.12	80.04
12.38	79.84
12.46	80.15
12.53	79.18
12.46	80.15
12.41	79.92

Aus diesen Werten werden Mittelwert und Standardabweichung gebildet.  $t_g$  ist dabei die Fallzeit der großen und  $t_k$  die Fallzeit der kleinen Kugel.

$$t_k = (12,40 \pm 0,12) \text{ s}$$

$$t_g = (80,00 \pm 0,31) \text{ s}$$

Nun berechnet sich die Viskosität  $\eta$  des Wassers nach (3). Die Apperaturkonstante der kleinen Kugel ist gegeben mit

$$K_k = 0,0764 \frac{\text{mPa cm}^3}{\text{g}}$$

Mit der Gaußschen Fehlerfortpflanzung

$$\Delta\eta = \sqrt{\left(\frac{\partial\eta}{\partial t}\right)^2 \cdot (\Delta t)^2} \quad (6)$$

$$= \sqrt{(K \cdot (\rho_K - \rho_F))^2 \cdot (\Delta t)^2} \quad (7)$$

und der Dichte des Wassers

$$\rho_F = 998,8 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad (8)$$

ergibt sich folgender Wert für die Viskosität  $\eta$ :

$$\eta = (0,001\,413 \pm 0,000\,014) \text{ kg/(ms)}$$

Aus diesem Wert kann die Apperaturkonstante  $K$  der großen Kugel bestimmt werden. Dafür wird die Formel 3 nach  $K$  umgestellt:

$$K = \frac{\eta}{(\rho_K - \rho_F) \cdot t}$$

Mit der Gaußschen Fehlerfortpflanzung

$$\begin{aligned} \Delta K &= \sqrt{\left(\frac{\partial K}{\partial \eta} \cdot \Delta \eta\right)^2 + \left(\frac{\partial K}{\partial t} \cdot \Delta t\right)^2} \\ &= \sqrt{\left(\frac{1}{(\rho_K - \rho_F) \cdot t} \cdot \Delta \eta\right)^2 + \left(\frac{-\eta}{(\rho_K - \rho_F) \cdot t^2} \cdot \Delta t\right)^2} \end{aligned}$$

ergibt sich für K:

$$K = (493,40 \pm 5,00) \cdot 10^{-9} \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}$$

### 3.2 Temperaturabhängigkeit der Viskosität

Die für 10 Temperaturen zwischen 21°C und 70°C gemessenen Fallzeiten sind in Tabelle 3 eingetragen.

In der Tabelle sind die jeweiligen Mittelwerte der Fallzeiten mit deren Standardabweichung aus den beiden Messungen für eine Temperatur aufgeführt. Außerdem wird die

**Tabelle 3:** Temperaturabhängige Fallzeiten und Viskositäten

$T / \text{K}$	$\frac{1}{T} / \text{mK}^{-1}$	$t / \text{s}$		$\bar{t}$	$\eta / \text{g m/s}$
300.15	3.33	72.00	71.18	$71.59 \pm 0.41$	$52.70 \pm 0.60$
304.15	3.29	66.13	65.47	$65.80 \pm 0.33$	$48.40 \pm 0.50$
308.15	3.25	61.93	60.90	$61.42 \pm 0.52$	$45.20 \pm 0.60$
315.15	3.17	53.89	53.58	$53.74 \pm 0.16$	$39.50 \pm 0.40$
319.65	3.13	49.50	49.77	$49.64 \pm 0.14$	$36.50 \pm 0.40$
323.65	3.09	44.95	46.20	$45.58 \pm 0.63$	$33.50 \pm 0.60$
328.15	3.05	43.30	43.16	$43.23 \pm 0.07$	$31.81 \pm 0.33$
333.15	3.00	40.30	40.29	$40.30 \pm 0.01$	$29.65 \pm 0.30$
338.15	2.96	38.43	37.80	$38.11 \pm 0.32$	$28.00 \pm 0.40$
343.15	2.91	36.40	36.18	$36.29 \pm 0.11$	$26.63 \pm 0.28$

jeweilige Viskosität nach Formel (3) ausgerechnet und deren Fehler durch die Gaußsche Fehlerfortpflanzung nach (6) und (7) berechnet.

Nun wird  $\ln(\eta)$  gegen  $1/T$  in Abbildung 2 aufgetragen.

Die lineare Regression, durchgeführt mit Python und Numpy, liefert folgende Geradengleichung:

$$\ln(\eta) = B \cdot \frac{1}{T} + \ln(A)$$

Dabei ergeben sich die Parameter A und B aus der Andradeschen Gleichung zu:

$$A = \exp(-8.492 \pm 0.1756) = (2,05 \cdot 10^{-4} \pm 3,60 \cdot 10^{-5}) \frac{\text{kg}}{\text{m s}}$$

$$B = (1659,5460 \pm 56,2745) \text{ K}$$

Für die Zeitabhängigkeit der Viskosität gilt also:

$$\eta(T) = (2,05 \cdot 10^{-4}) \frac{\text{kg}}{\text{m s}} \cdot \exp\left(\frac{1659,546 \text{ K}}{T}\right)$$

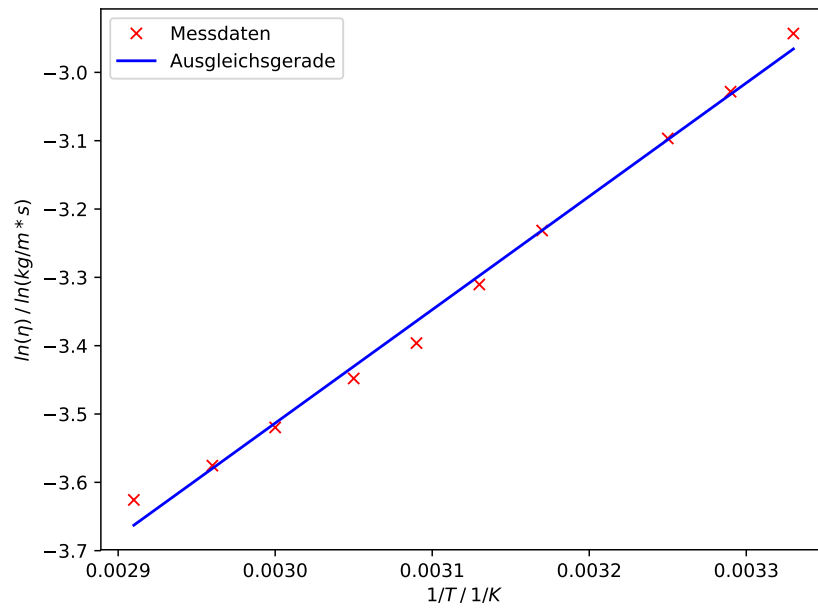
### 3.3 Reynolds Zahl

Mit den berechneten Werten lässt sich nun die Reynoldszahl für die jeweiligen Temperaturen berechnen. Die Ergebnisse für die große Kugel sind in Tabelle 4 aufgeführt.

Außerdem ergibt sich die Reynoldzahl für die kleine Kugel:

$$Re_{kl} = 890,7 \pm 1,1$$

Es ist zu erkennen, dass die Reynoldzahl für alle Temperaturen unter 1160 liegt und man somit von laminaren Stömungsverhältnissen ausgehen kann.



**Abbildung 2:** Temperaturabhängigkeit der Viskosität

**Tabelle 4:** Temperaturabhängige Reynoldszahl

$T / K$	$v / \text{mm/s}$	$Re$
300,15	$1,397 \pm 0,008$	$4,18 \pm 0,05$
304,15	$1,520 \pm 0,008$	$4,96 \pm 0,06$
308,15	$1,682 \pm 0,014$	$5,68 \pm 0,09$
315,15	$1,861 \pm 0,006$	$7,44 \pm 0,08$
319,65	$2,015 \pm 0,006$	$8,71 \pm 0,10$
323,65	$2,199 \pm 0,030$	$10,36 \pm 0,23$
328,15	$2,313 \pm 0,004$	$11,47 \pm 0,12$
333,15	$2,481 \pm 0,001$	$13,20 \pm 0,13$
338,15	$2,624 \pm 0,022$	$14,79 \pm 0,24$
343,15	$2,762 \pm 0,008$	$16,37 \pm 0,18$



## 4 Diskussion

Der Literaturwert der Viskosität von Wasser bei 20°C Raumtemperatur liegt bei etwa 0,001 kg/(ms). Der ermittelte Wert von  $(0,001\,413 \pm 0,000\,014)$  kg/(ms) weicht damit um 29,23 % von dem Literaturwert ab. Diese Abweichung lässt sich auf Ungenauigkeit bei der Zeitmessung und einer zu großen Fallzeit zurückführen. Diese zu große Fallzeit entsteht dadurch, dass die Kugel während der gesamten Strecke von 10 cm durch den Kontakt mit der Rohrwand und durch kleine nicht vollständig entfernte Luftblasen gebremst wird. Verwirbelungen im System können ausgeschlossen werden, da die Reynoldzahlen für alle Temperaturen unterhalb des kritischen Wertes von 1160 liegen. Die Reynoldzahl der kleinen Kugel liegt deutlich über dem Wert der großen Kugel. Dies liegt daran, dass die Fallzeit der kleinen Kugel deutlich kleiner ist, was in einer höheren Geschwindigkeit resultiert. Der Fehler der Apperaturkonstante ist mit 1,32 % recht gering. Mit diesen Messungen konnten die Paramter der Andradeschen Gleichung mit einen Fehler von 17,56 % für A und 3,39 % für B bestimmt werden und somit die Temperaturabhängigkeit der Viskosität bestätigt werden.

## 5 Literaturverzeichnis

[1] TU Dortmund. *Versuchsanleitung zu Versuch 207: Das Kugelfall-Viskosimeter nach Höppler.*