

Ausarbeitung zu Viskosität (VIS)

Anfängerpraktikum Teil 1
Technische Universität München

Leon Heiß, Paul Hildebrandt
Kurs 5, Gruppe 7, Team 19

12. Juli 2022

Abstract

Das Ziel dieses Versuchs ist es, die Viskosität verschiedener Flüssigkeiten mithilfe eines Kugelfallviskosimeters und Kapillarviskosimeters zu bestimmen.

Inhaltsverzeichnis

1 Grundlagen	2
1.1 Viskosität	2
1.2 Laminare und turbulente Strömungen	2
1.3 Hagen-Poiseuillesche Gesetz	2
1.4 Bernoulli Gleichung	3
1.5 Strömungswiderstand	3
1.6 Stokessche Gesetz	3
2 Kugelfallviskosimeter	4
2.1 Versuchsaufbau	4
2.2 Auswertung	5
2.3 Fehlerrechnung	5
3 Kapillarviskosimeter	7
3.1 Versuchsaufbau	7
3.2 Auswertung	7
3.3 Fehlerrechnung	8
4 Zusatzfragen	9
4.1 Fallschirmspringer	9
4.2 Strömung in Nasenlöchern	10
5 Literaturverzeichnis	10
6 Anhang	10
6.1 Laborbuch	10

1 Grundlagen

1.1 Viskosität

Die *Viskosität* eines Fluids beschreibt wie zähflüssig dieses ist. Genauer ist die *dynamische Viskosität* η eine materialabhängige Proportionalitätskonstante der inneren Reibung eines Fluids. Die Viskosität ist temperaturabhängig, in den meisten Fällen steigt sie bei Gasen und sinkt bei Flüssigkeiten bei zunehmender Temperatur. Mithilfe der Dichte ρ des Fluids lässt sich dessen *kinematische Viskosität* berechnen:

$$\nu = \frac{\eta}{\rho}. \quad (1)$$

In einer *Newtonschen Flüssigkeit* ist die Viskosität η unabhängig von deren Geschwindigkeit, das Geschwindigkeitsprofil ist also linear. Ist das nicht der Fall, heißt die Flüssigkeit *nicht-Newtonsche*.

1.2 Laminare und turbulente Strömungen

Bei *laminarer Strömung* gleiten Flüssigkeitsschichten gleichmäßig aneinander vorbei, dies ist meist bei niedrigen Flussgeschwindigkeiten und an stromlinienförmigen Objekten der Fall. Für größeren Flussgeschwindigkeiten oder nicht-stromlinienförmige Körper treten Verwirbelungen auf und die Stromlinie reißt ab. Dies nennt man dann *turbulente Strömung*. Der Unterschied zwischen den Strömungen ist in den Abbildungen 1a und 1b veranschaulicht. Mithilfe der *Reynoldszahl* Re kann man berechnen, welche Strömung in einem System zu erwarten ist:

$$Re = \frac{L \cdot \rho \cdot \nu_{\text{mittel}}}{\eta}, \quad (2)$$

wobei ν_{mittel} die mittlere Geschwindigkeit und L die *charakteristische Länge* des Systems ist. Für letztere gilt bei einer Strömung in einem Rohr mit Innendurchmesser d , dass $L = d$. Für ein Rohr hat man für $Re < 1160$ laminare Strömung und für $2300 < Re$ turbulente Strömung. Im Bereich dazwischen können Verwirbelungen durch Einlaufstörungen auftreten.

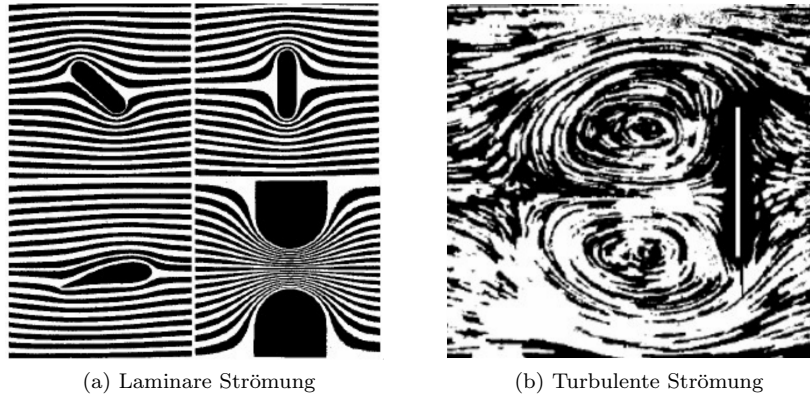


Abbildung 1: Vergleich der beiden Strömungsarten [1]

1.3 Hagen-Poiseuillesche Gesetz

Die Stromstärke i einer Flüssigkeitsströmung gibt an, wie viel Volumen einen Querschnitt A pro Zeit passiert. Für ein Rohr mit Radius r , Länge l und Druckdifferenz $\Delta p = p_1 - p_2$ gilt mit Hagen-Poiseuillesche Gesetz [1]:

$$i = \frac{\pi \cdot r^4 \cdot \Delta p}{8 \cdot \eta \cdot l} = A \cdot \nu_{\text{mittel}}. \quad (3)$$

Das Gesetz ist jedoch lediglich eine Näherung, welche nur gilt, wenn keine äußeren und Trägheitskräfte wirken, die Strömung laminar, der Rohrradius konstant, das Medium inkompressibel und die Randgeschwindigkeit $\nu = 0$ ist.

1.4 Bernoulli Gleichung

Zur Berechnung der Druckdifferenz Δp kann die Bernoulli Gleichung verwendet werden:

$$p + \rho gh + \frac{1}{2}\nu^2 = \text{konst.} \quad (4)$$

Betrachtet man $\Delta p = p_1 - p_2$ für ein vertikal stehendes Rohr ergibt sich

$$\Delta p = \rho g \Delta h, \quad (5)$$

dabei steht Δh für die Höhendifferenz des Rohres.

1.5 Strömungswiderstand

Der *Strömungswiderstand* W ist ein Maß dafür, wie stark die Strömung durch Gegenkräfte gebremst wird. Es gilt

$$W = \frac{8 \cdot \eta \cdot l}{\pi r^4}. \quad (6)$$

Damit lässt sich das Hagen-Poiseuille umformen zu

$$\Delta p = W \cdot i. \quad (7)$$

Für Newtonsche Flüssigkeiten gilt, dass W die Steigung im Druckdifferenz-Stromstärke-Diagramm ist.

1.6 Stokessche Gesetz

Die Viskosität spielt eine zentrale Rolle bei Sinkbewegungen von Körpern in Flüssigkeiten. Betrachtet man beispielsweise eine Kugel vom Radius r , die in einem unendlich ausgedehnten, zähen Medium mit konstanter Geschwindigkeit ν nach unten sinkt, lassen sich die dabei wirkenden Kräfte folgendermaßen grafisch darstellen:

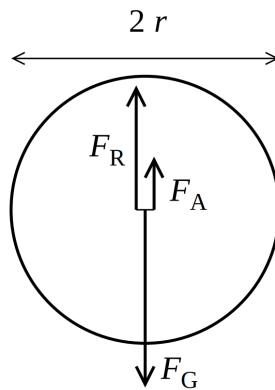


Abbildung 2: Fallende Kugel im zähen Medium [1]

Die in Abbildung 2 eingezeichnete Gewichtskraft $F_G = m \cdot g$ zeigt in Richtung der Fallbewegung. Dazu entgegengerichtet wirken die Auftriebskraft $F_A = V_{Kugel} \cdot \rho_{Fl} \cdot g$ und die Stokessche Reibungskraft $F_R =$

$6\pi \cdot \eta \cdot r \cdot \nu$ [1], wobei diese Gleichung nur bei laminarer Strömung gültig ist. Die Reynoldszahl muss für diese Art der Strömung hier im Gegensatz zur Rohrströmung Werte kleiner als eins annehmen. Stellt man das Kräftegleichgewicht $|F_G| = |F_A| + |F_R|$ auf und formt nach η um, erhält man

$$\eta = \frac{2 \cdot r^2 \cdot g}{9 \cdot \nu} \cdot (\rho_{Kugel} - \rho_{Fl}) \quad (8)$$

als Ausdruck für die Viskosität der Flüssigkeit. Will man die Viskosität mit dieser Methode nicht für einen unendlich ausgedehnten Raum, sondern für ein Rohr mit Radius R berechnen, muss man bei Gleichung 8 noch einen Korrekturfaktor einfügen:

$$\eta = \frac{2 \cdot r^2 \cdot g}{9 \cdot \nu \cdot (1 + 2,4 \cdot \frac{r}{R})} \cdot (\rho_{Kugel} - \rho_{Fl}). \quad (9)$$

2 Kugelfallviskosimeter

2.1 Versuchsaufbau

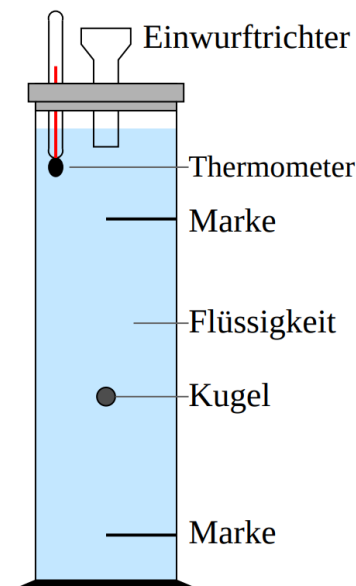


Abbildung 3: Versuchsaufbau Kugelfallviskosimeter [1]

Das Kugelfallviskosimeter (Abbildung 3) ist eine besondere Bauform eines Viskosimeters und dient der präzisen Messung der Viskosität durchsichtiger newtonscher Flüssigkeiten. Es besteht aus einem zylindrischen Behälter, welcher in unserem Fall mit einem Glycerin-Wasser Gemisch gefüllt ist. Für den Versuch werden zunächst die Massen und Durchmesser zehn kleiner, gleich großer Kugeln bestimmt. Diese lässt man anschließend nacheinander durch den Einwurftrichter im Glycerin-Wasser Gemisch innerhalb des Viskosimeters nach unten sinken. Währenddessen stoppt man für jede der Kugeln die Zeit, die diese benötigen, um die in der Abbildung markierte Strecke innerhalb des Fallrohres zurückzulegen. Nun wird noch die Flüssigkeitsdichte mithilfe eines Aräometer bestimmt, sowie der Innenrohrradius des Kugelfallviskosimeters ausgemessen.

2.2 Auswertung

Zunächst bestimmten wir die Masse der Kugel zu $m = 0,2864 \text{ g}$ und den Kugelradius zu $r = 3,00 \pm 0,05 \text{ mm}$. Wir maßen für die Flüssigkeitsdichte $\rho_{Fl} = 1,225 \pm 0,005 \text{ g/cm}^3$ und für den Innenradius des Rohres $R = 53,3 \pm 0,05 \text{ mm}$. Daraufhin bestimmten wir die Sinkgeschwindigkeit der Kugel mit $v = \frac{h}{t}$, $h = 37,5 \pm 0,125 \text{ cm}$, $t = 2,49 \pm 0,5 \text{ s}$, zu $v_{mittel} = 0,151 \pm 0,030 \text{ m/s}$. Mithilfe der Gleichungen 8 und 9 ergibt sich die unkorrigierte Viskosität des Glyzerin-Wasser Gemischs zu $\eta = 170 \pm 8 \text{ mPa s}$ und die korrigierte Variante zu $\eta_{korrr} = 150 \pm 7 \text{ mPa s}$. Eine detaillierte Berechnung der involvierten Unsicherheiten ist im nächsten Abschnitt zu finden. Vergleicht man die ermittelten Werte für die korrigierte bzw. unkorrigierte Viskosität mit Abbildung 4, entsprechen die Daten einer Konzentration von ca. 87% des Glyzerin-Wasser Gemischs bei einer Temperatur von 20°C . Da unsere Messungen jedoch bei 23°C gemacht wurde, ist dies nicht unbedingt aussagekräftig über die Genauigkeit.

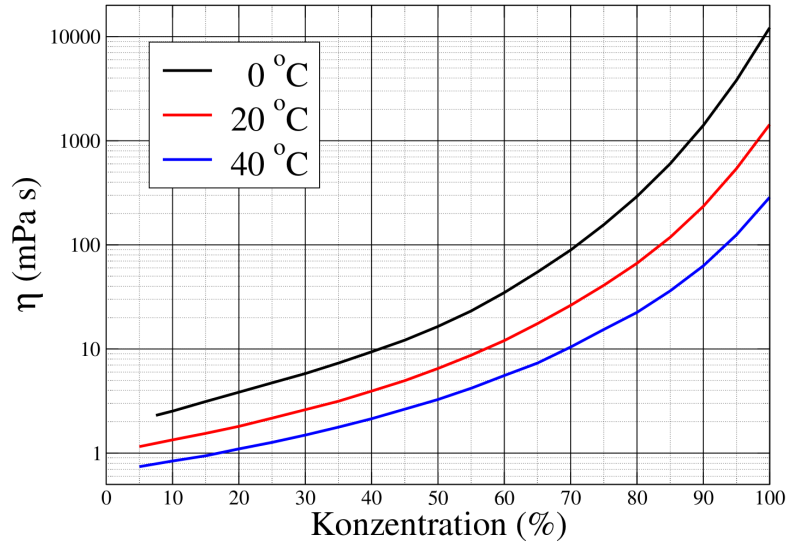


Abbildung 4: Viskosität in Abhängigkeit von der Konzentration des Glyzerin-Wasser Gemischs [1]

Nun können wir mithilfe von Gleichung 2 die Reynoldszahl $Re = 7,4 \pm 1,5$ ermitteln, wobei der korrigierte Wert für die Viskosität $\eta_{korrr} = 150 \pm 7 \text{ mPa s}$, für die charakterische Länge $L = 6,00 \pm 0,05 \text{ mm}$ der Kugeldurchmesser, $v_{mittel} = 0,151 \pm 0,030 \text{ m/s}$ und $\rho_{Fl} = 1,225 \pm 0,005 \text{ g/cm}^3$, verwendet wurde. Da wir das Stokessche Gesetz angewendet haben, sollte die **Reynoldszahl theoretisch nicht größer als 1 werden**. Dies ist jedoch bei unseren Berechnungen nicht der Fall, somit handelt es sich bei der Kugelumströmung vermutlich nicht um eine laminare Strömung, sondern eine turbulente Strömung mit nicht vernachlässigbaren Trägheitskräften im umströmenden Fluid. Die Unsicherheit für die Reynoldszahl wurde hier ebenfalls mithilfe der Gaußschen Fehlerfortpflanzung bestimmt.

2.3 Fehlerrechnung

Gleichung 8 kann mit $v = \frac{h}{t}$ und $\rho_K = \frac{4m}{3\pi r^3}$ zu

$$\eta = \frac{2gr^2 \cdot t}{9h} \cdot \left(\frac{3m}{4\pi r^3} - \rho \right) \quad (10)$$

umgeschrieben werden. Dieser Ausdruck hängt insgesamt von fünf unterschiedlichen Parametern ab, deren Unsicherheiten im Folgenden einzeln diskutiert werden sollen. Um die Gaußsche Fehlerfortpflanzung mit

möglichst kleinem Aufwand berechnen zu können, bringt man sie auf folgende Form:

$$u(\eta) = \eta \cdot \sqrt{\left(A_t \cdot \frac{u(t)}{t}\right)^2 + \left(A_h \cdot \frac{u(h)}{h}\right)^2 + \left(A_m \cdot \frac{u(m)}{m}\right)^2 + \left(A_\rho \cdot \frac{u(\rho)}{\rho}\right)^2 + \left(A_r \cdot \frac{u(r)}{r}\right)^2}. \quad (11)$$

A_i sind die Vorfaktoren, die entstehen, wenn man Gleichung 11 partiell nach x_i ableitet und anschließend auf die Form $A_i \cdot \frac{\eta}{x_i}$ bringt.

Zeit t Die Unsicherheit in der Zeitmessung $u(t) = \sqrt{u_A(t)^2 + u_B(t)^2}$ setzt sich zusammen aus der Typ-A Unsicherheit $u_A(t) = 0,057$ s der einzelnen Zeitmessungen, sowie einer zweifachen durchschnittlichen menschlichen Reaktionszeit von $u_B(t) = 0,5$ s. Leitet man Gleichung 8 partiell nach t ab, ergibt sich $\frac{\delta\eta}{\delta t} = \frac{\eta}{t}$ mit dem Vorfaktor $A_t = 1$.

Fallstrecke h Die Fallstrecke h , welche mit einem Meterstab bestimmt wurde, unterliegt zwei Unsicherheiten. Zunächst wäre da die Ungenauigkeit des Meterstabs $a + b \cdot L$, mit $a = 0,6$ mm, $b = 0,4$ mm/m und L der auf den nächsten vollen Meter aufgerundeten, gemessenen Länge. Diese kommt zu 0,75 mm. Des Weiteren muss die Ableseungenauigkeit berücksichtigt werden, welche wir mit 0,1 cm abschätzten. Insgesamt kommt man auf eine Unsicherheit der Fallstrecke h von $u(h) = 1,25$ mm. Es ergibt sich $\frac{\delta\eta}{\delta h} = \frac{\eta}{h}$ mit dem Vorfaktor $A_h = -1$.

Masse m Die Unsicherheit in der Messung der Masse $u(m) = \sqrt{u_{B1}(m)^2 + u_{B2}(m)^2}$ g setzt sich zusammen aus der Linearitäts- und Skalierungsunsicherheit der Waage zu $u_{B1}(m) = 0.0005$ g, sowie der Reproduzierbarkeit $u_{B2}(m) = 0.0002$ g. Insgesamt kommt man so auf eine Unsicherheit $u(m) = 0,00054$ g. Es ergibt sich $\frac{\delta\eta}{\delta m} = \frac{\rho_K}{\rho_K - \rho_{Fl}} \cdot \frac{\eta}{m}$ mit dem Vorfaktor $A_m = \frac{\rho_K}{\rho_K - \rho_{Fl}}$.

Dichte der Flüssigkeit ρ_{Fl} Das Messen mit dem Aräometer unterliegt zwei Unsicherheiten. Eine Typ-B Unsicherheit von $0,0001 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$ [6] und eine geschätzte Ableseungenauigkeit von $0,005 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$. Es ergibt sich $\frac{\delta\eta}{\delta \rho_{Fl}} = -\frac{\eta}{\rho_K - \rho_{Fl}}$ mit dem Vorfaktor $A_{\rho_{Fl}} = \frac{-1}{\rho_K - \rho_{Fl}}$.

Kugelradius r Ähnlich wie bei der Fehlerrechnung zur Fallhöhe bestimmen wir die Messabweichung des Messschiebers zu $u(r) = 0,05$ mm. Die Standardabweichung der gemessenen Kugelradien ergibt sich bei uns zu null, da alle gemessenen Werte miteinander übereinstimmen. Es ergibt sich $\frac{\delta\eta}{\delta r} = (2 - 3 \cdot \frac{\rho_K}{\rho_K - \rho_{Fl}}) \cdot \frac{\eta}{r}$.

Viskosität η Setzt man alle $u(x_i)$ und A_i in Gleichung 11 ein, kann man nun die Unsicherheit der unkorrigierten Viskosität bestimmen. Um die Unsicherheit der korrigierten Viskosität zu bekommen, berücksichtigt man die neuen Terme aus Gleichung 9 oder um ein ungefähres Ergebnis für $u(\eta_{\text{korrr}})$ zu bekommen, multipliziert man $u(\eta)$ mit dem Faktor $\frac{1}{1+2,4 \cdot \frac{r}{R}}$. Hierbei tragen die involvierten Fehler der Zeit- und Radiusmessung am meisten zur Gesamtunsicherheit bei.

3 Kapillarviskosimeter

3.1 Versuchsaufbau

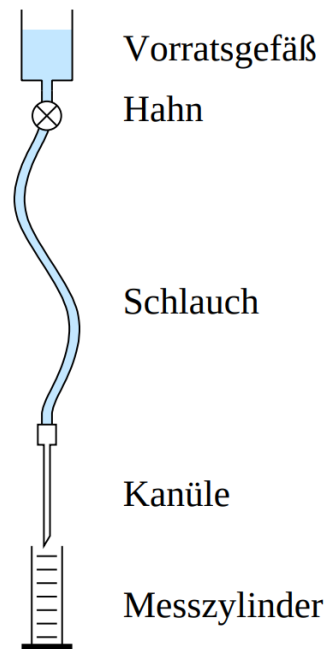


Abbildung 5: Versuchsaufbau Kapillarviskosimeter [1]

Beim Kapillarviskosimeter, zu sehen in Abbildung 5, fließt Wasser aus einem Vorratsbehälter durch einen Schlauch in eine darunter liegende Kapillare, in diesem Fall eine Injektionskanüle. Mithilfe der Höhe des Behälters relativ zur Kanüle kann der Druck in der Kapillare variiert werden. Die Menge des während einer gemessenen Zeitspanne durch die Kapillare gelaufenen Wassers wird durch das Wiegen des Auffangbehälters vor und nach dem Versuch bestimmt.

3.2 Auswertung

Im Folgenden soll die Viskosität der Flüssigkeit bestimmt werden. Dazu wird der Druck, wie unter Gleichung 7 angedeutet, gegen die Stromstärke aufgetragen. Der Druck lässt sich aus der Höhe der Leitung durch

$$p(h) = \rho \cdot g \cdot h \quad (12)$$

bestimmen. Für die Temperatur von 23°C wird eine Dichte von $997,54 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ verwendet [8]. Die Steigung der Ausgleichsgerade (Abbildung 6) entspricht dem Strömungswiderstand. Jeglicher Offset entlang der Druck-Achse hat keinerlei Auswirkungen.

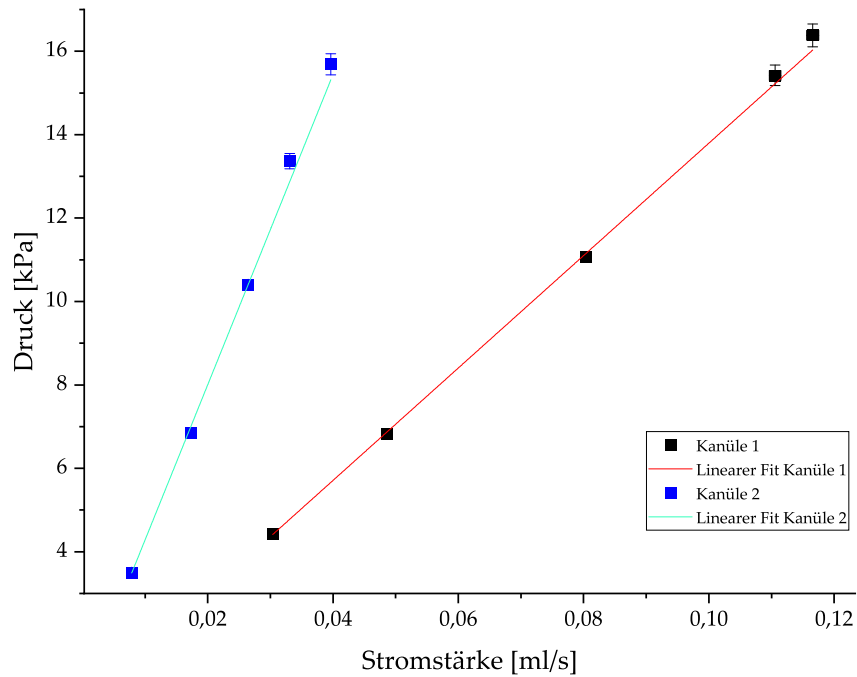


Abbildung 6: Druck bei verschiedenen Stromstärken in beiden Kanülen und zugehörige Ausgleichsgeraden

Aus den Werten des Strömungswiderstandes von $(134,7 \pm 1,8) \cdot 10^9 \frac{\text{Pa} \cdot \text{s}}{\text{m}^3}$ für Kanüle 1 und $(371,9 \pm 8,3) \cdot 10^9 \frac{\text{Pa} \cdot \text{s}}{\text{m}^3}$ für Kanüle 2 lässt sich mithilfe des Zusammenhangs

$$\eta = \frac{W \cdot \pi \cdot r^4}{8 \cdot l} \quad (13)$$

und den Werten aus Tabelle 1 ein Wert von $1,03 \pm 0,44 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ in Kanüle 1 und ein Wert von $0,50 \pm 0,32 \text{ mPa} \cdot \text{s}$

	Kanüle 1	Kanüle 2
Innenradius	$14,0(1,5) \text{ Sktl} \hat{=} 0,148(15) \text{ mm}$	$9,5(1,5) \text{ Sktl} \hat{=} 0,148(15) \text{ mm}$
Länge (vgl. 3.3, Länge der Kapillare)	$24,75 \pm 0,95 \text{ mm}$	$29,9 \pm 1,1 \text{ mm}$

Tabelle 1: Maße der Kanülen

für die Viskosität der Flüssigkeit bei 23°C bestimmen. Die hohe Unsicherheit kommt zu großem Teil dadurch zustande, dass der Radius, der mit einer Unsicherheit von etwa 10% geschätzt wird, mit der 4. Potenz in die Berechnung einfließt. Kleine Änderungen am Radius können große Änderungen am Endgültigen Wert bewirken. So müsste man den gemessenen Wert von 9,5 Sktl um nur 1,5 Sktl erhöhen, um dem Literaturwert von $0,960 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ [9] bei 23°C zu erhalten. Der Wert für Kanüle 1 liegt nah am Literaturwert.

3.3 Fehlerrechnung

Unsicherheiten für Zeit, Höhe und Masse wurden wie in Abschnitt 2.3 erläutert, berechnet.

Dichte Für den Literaturwert der Dichte [8] wurde die letzte verwendete Stelle, also $0,001 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ als unsicher angenommen.

Länge der Kapillare Die Kapillare ist an einem Ende schräg angeschnitten. Ein eindeutiges Ende ist also nicht direkt zu bestimmen. Für unsere Auswertung wurde der Mittelpunkt der Schräge, berechnet mit dem Arithmetischen Mittel der Längen zur Ober- und Unterkante der Öffnung, verwendet und die Unsicherheit wie in Abbildung 7 dargestellt, bestimmt.

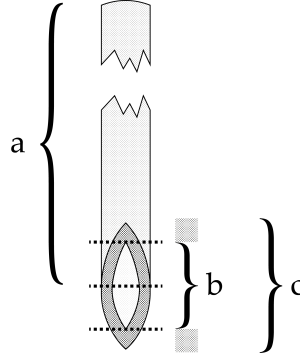


Abbildung 7: Kapillare mit Länge (a), Unsicherheit durch Öffnung (b) und Unsicherheit durch Öffnung und Messfehler(c)

Radius der Kapillare Wie bereits im vorhergehenden Abschnitt angesprochen, können kleine Messfehler des Kapillarradius zu großen Abweichungen der Ergebnisse führen, da der Radius in der vierten Potenz in die Viskosität einfließt. Die geschätzte Unsicherheit beträgt $1,5 \text{ Sktl} \hat{=} 15,9 \mu\text{m}$.

Strömungswiderstand Die Unsicherheiten der Ausgleichsgeraden betragen, wie im vorherigen Abschnitt erwähnt, $1,8 \cdot 10^9 \frac{\text{Pa}\cdot\text{s}}{\text{m}^3}$ für Kanüle 1 und $8,3 \cdot 10^9 \frac{\text{Pa}\cdot\text{s}}{\text{m}^3}$ für Kanüle 2.

Berechnungsmethoden Für alle fortgepflanzten Fehler wurden die Gleichungen aus Abschnitt 4.1 und 4.2 des ABW-Skriptes [2] verwendet.

4 Zusatzfragen

4.1 Fallschirmspringer

Zur Vereinfachung nehmen wir an der Mensch sei ein Zylinder mit Radius $r = 0,25 \text{ m}$, Höhe $h = 1,8 \text{ m}$ und einer Masse $m = 80 \text{ kg}$. Bestimmen wir mit

$$r_K = \sqrt[3]{\frac{3}{4} \cdot r^2 \cdot h} \quad (14)$$

den Radius r_K einer Kugel, die im Wesentlichen das gleiche Volumen wie der Zylinder besitzt, lässt sich Gleichung 8 zur Bestimmung der Viskosität anwenden. Die Dichte des Fallschirmspringers erhalten wir mit

$$\rho_M = \frac{3 \cdot m}{4\pi r_K^3} = 226,4 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}. \quad (15)$$

Setzt man jetzt einen Literaturwert von $\rho_{Luft} = 1,2041 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ [3] in Gleichung 8 ein, erhält man einen Wert von $\eta_{Luft} \approx 1,7 \text{ Pa}\cdot\text{s}$, welcher ca. um einen Faktor 10^6 größer als der Literaturwert $\eta_{Luft} = 18 \mu\text{Pa}\cdot\text{s}$ [4] von trockener Luft bei 15°C ist. Höchstwahrscheinlich kommt diese enorme Abweichung von den extrem idealisierten Annahmen und der Tatsache, dass Gleichung 8 nur für laminare Strömungen gilt. Diese Strömungsart liegt jedoch nicht vor. Berechnet man nämlich die Reynoldszahl mit Gleichung 2 zu $Re \approx 3,3 \cdot 10^7$, mit $L = 2 \cdot r_K$

und dem Literaturwert für η_{Luft} , so erkennt man, dass es sich beim freien Fall um eine turbulente Strömung handelt.

4.2 Strömung in Nasenlöchern

Wir nehmen an, dass man ungefähr 15 mal pro Minute je 0,5 Liter Luft ein- und wieder ausatmet [7]. Daraus folgt die Stromstärke $i = 25 \text{ cm}^3/\text{s}$. Der Radius eines Nasenlochs wird auf $r = 0,50 \text{ cm}$ geschätzt. Damit kommt man mit einem Nasenlochquerschnitt $A = 0,79 \text{ cm}^2$ auf eine mittlere Strömungsgeschwindigkeit von $v = \frac{i}{A} = 3,2 \text{ ms}^{-1}$. Unter Verwendung von $\rho_{Luft} = 1,29 \cdot 10^{-3} \text{ g/cm}^3$ [1], $L = d = 2 \cdot r$ und dem Literaturwert η_{Luft} aus der vorherigen Aufgabe wird die Reynoldszahl mit Gleichung 2 zu $Re = 1147$ bestimmt. Wir nehmen außerdem an, dass der Luftstrom nur durch ein Nasenloch geht, da ein großer Teil der Menschen abwechselnd durch ein Nasenloch atmet [5]. Eine Reynoldszahl von 1147 ist schon im Bereich, in dem turbulente Strömung auftreten kann, jedoch ist dies aber eher unwahrscheinlich, da diese evolutionär schließlich nur für Luftströme entstanden sind und daher keine Einlaufstörungen verursachen sollte. Das Luftvolumen skaliert in diesem Beispiel linear mit der Reynoldszahl, so dass bei stärkerer Atmung, sagen wir, doppelt so schnell, sich demnach auch die Reynoldszahl verdoppelt. Mit $Re \approx 2294$ ist man dann im Grunde schon im Bereich turbulenter Strömung.

5 Literaturverzeichnis

Literatur

- [1] TUM Fakultät für Physik. *Viskosität (VIS)* (12.07.2022).
URL: <https://www.ph.tum.de/academics/org/labs/ap/ap1/VIS.pdf>
- [2] TUM Fakultät für Physik. *ABW-Skript* (12.07.2022).
URL: <https://www.ph.tum.de/academics/org/labs/ap/org/ABW.pdf>
- [3] Wikipedia. *Luftdichte* (12.07.2022).
URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Luftdichte>
- [4] Wikibooks. *Tabellensammlung Chemie/ Dynamische Viskosität gasförmiger Stoffe*. (12.07.2022).
URL: https://de.wikibooks.org/wiki/Tabellensammlung_Chemie/_Dynamische_Viskosit%C3%A4t_gasf%C3%B6rmiger_Stoffe
- [5] Wikipedia. *Nasenzyklus* (12.07.2022).
URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Nasenzyklus>
- [6] Deutscher Kalibrierdienst. *Nationaler Vergleich von Aräometerkalibrierungen* (12.07.2022).
URL: <https://oar.ptb.de/files/download/60c88a074c93901b9c005eab>
- [7] Wikipedia. *Atemminutenvolumen* (12.07.2022).
URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Atemminutenvolumen>
- [8] Internetchemie.info. *Wasser-Dichtetabelle* (17.07.2022).
URL: <https://www.internetchemie.info/chemie-lexikon/daten/w/wasser-dichtetabelle.php>
- [9] H. Sigloh. *Technische Fluidmechanik, Anhang, Tabelle 6-5*, Springer Verlag (17.07.2022).
URL: [https://link.springer.com/content/pdf/bbm%\\$3A978-3-540-44635-4%2F1](https://link.springer.com/content/pdf/bbm%$3A978-3-540-44635-4%2F1)

6 Anhang

6.1 Laborbuch

Physikalisches Grundpraktikum I: VIS

12 Kugelfallviskosimeter

Kugeldurchmesser: 6,0mm; 6,0mm; 6,0mm (0,1mm)

Kugelgewicht 10 Kugeln: 2,8640g (0,0001g)

Abstand Markierungen: 37,5cm (0,1cm) + ADW-script

Kugel	Dauer [s] (0,5)
1	2,4
2	2,5
3	2,5
4	2,5
5	2,5
6	2,6
7	2,5
8	2,5
9	✓
10	2,4

Dichte: $1,225 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$ (0,005), Temperatur: 23,0°C (0,1)

^{durchmesser}
Innenradius Rohr 53,3

Waage: Linearität & Skalierung 0,0005g
Reproduzierbarkeit 0,0002g

13 Temperatur: $23,0^{\circ}\text{C}$ (0,1)

100 StkL = 1,058 mm

29 mm ohne Öffnung
30,8 mm mit "

Kanüle 1: $\varnothing 28$ StkL

Höhe	Dauer [s]	Gew 1 [g]	Gew 2 [g]
45,2 cm	60,1	11,2045	13,0248
69,7 cm	60,1	15,0248	15,9418
113,1 cm	60,0	15,9418	20,7483
167,4 cm	60,2	20,7493	27,7496
157,6 cm	59,9	27,7496	34,3560

Kanüle 2: $\varnothing 19$ StkL $L = 24,5, 260$ mm

2950 [Verdunstet]

35,8 cm	61,5	11,3457	11,7772
69,9 cm	60,2	11,7772	12,8128
104,4 cm	59,9	12,8128	14,3935
136,6 cm	59,9	14,3939	16,3695
160,3 cm	60,0	16,3695	18,7425