

A08 – Viskosität

In diesem Versuch sollen Sie strömende Flüssigkeiten untersuchen: Wie hängt die Strömungsgeschwindigkeit von der Druckdifferenz, dem Rohrquerschnitt und dem Reibungswiderstand ab? Sie werden den Reibungswiderstand (Zähigkeit, Viskosität) von Wasser, Öl, Glyzerin oder einer Flüssigkeit, die Sie selber mitbringen (mindestens 1/2 1), bestimmen.

Schriftliche VORbereitung:

- Wie ist physikalisch Druck festgelegt?
- Druck wird in der Einheit Pa (Pascal) gemessen: 1 Pa = ...?
- Für den Alltagsgebrauch ist diese Einheit zu klein, man benutzt stattdessen häufig den typischen Druck der Atmosphäre: $1 \, \text{bar} = 10^5 \, \text{Pa} = 1000 \, \text{hPa}$ (Hektopascal)
- Wie groß ist der Normaldruck der Atmosphäre, wie groß der Druck im Fahrradreifen?
- In der Medizin wird der Blutdruck noch traditionell in der alten Einheit mmHg (Millimeter Quecksilber) gemessen: 1 mmHg = 133 Pa. Ein Blutdruck 130 zu 80 meint: 130 mmHg in der Systole und 80 mmHg in der Diastole. Wie groß ist der Mittelwert des Blutdrucks in Pa?
- Wie groß ist der Druck in 5 m Wassertiefe?
- In welche Richtung wirkt er?
- Kennen Sie Messgeräte für den Druck? Wie funktionieren sie?
- Die mittlere Blutstromstärke des Menschen beträgt etwa I = 6 L/min = 1·10⁻⁴ m³/s. Unser Herz pumpt das Blut durch die Aorta mit ca. 4,5 cm² und durch feine Kapillaren mit insgesamt etwa 4500 cm² Querschnittsfläche. Wie groß ist die mittlere Geschwindigkeit in der Aorta, wie groß in den Kapillaren?
- Vervollständigen Sie: (vgl. Gleichung 1) Je länger das Rohr, umso Je größer der Druckunterschied, umso



1 Grundlagen

Dieser Abschnitt soll die wichtigsten theoretischen Zusammenhänge aufgreifen, die zur Bearbeitung der Messaufgaben im kommenden Abschnitt notwendig sind.

v mit r).

2 Laminare Strömung

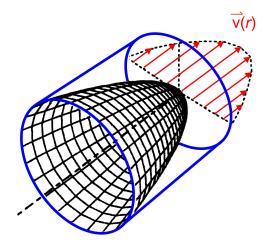
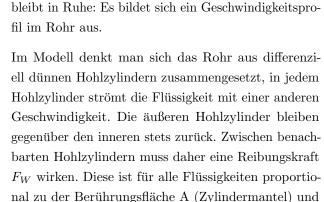
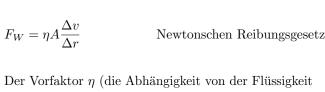


Abb. 1: Geschwindigkeitsprofil einer laminaren Strömung. In der Mitte eines Rohres ist die Geschwindigkeit am größten. Vgl. [1, 2]



Flüssigkeiten strömen durch ein Rohr, wenn an den Enden des Rohres ein Druckunterschied besteht. Die Geschwindigkeit ist dabei in der Mitte des Rohres am größten, an der Rohrwand haftet die Flüssigkeit und



dem Geschwindigkeitsgefälle $\Delta v/\Delta r$ (wie ändert sich

Der Vorfaktor η (die Abhängigkeit von der Flüssigkeit selbst) heißt Viskosität oder Zähigkeit und wird in der etwas gewöhnungsbedürftigen Einheit

$$[\eta] = \frac{\mathrm{N}\,\mathrm{s}}{\mathrm{m}^2} = \mathrm{Pa}\cdot\mathrm{s} \ (\mathrm{Pascalsekunde}) \ \mathrm{angegeben}.$$

Je größer die Viskosität η , desto größer die Reibungskraft F_W .

Bei hinreichend kleinen Geschwindigkeiten gleiten die dünnen Hohlzylinder wirbelfrei aneinander. Man nennt solche Strömungen laminar (im Unterschied zu den turbulenten). Für laminare Strömungen gilt das Gesetz von Hagen-Poiseuille:

$$I = \frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{\pi r^4}{8\eta L} \Delta p = \frac{\Delta p}{R}.$$
 (1)

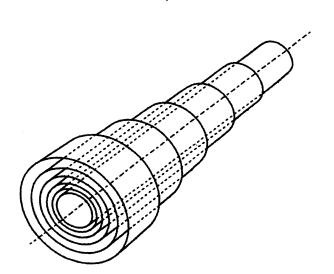


Abb. 2: Modellvorstellung zur laminaren Strömung in einem Rohr. Vgl. [3].



Hierbei ist r der Rohrradius, L die Länge des Rohres, η die Viskosität und Δp der Druckunterschied an den Rohrenden. Hieraus ergibt sich dann der Strömungswiderstand $R = \frac{8\eta L}{\pi r^4}$.

Bemerkenswert ist, dass sich die Stromstärke I mit der vierten Potenz des Rohrradius r ändert. Wird der Durchmesser einer Arterie nur um 1/5 erweitert, also um den Faktor 1,2, so wird bei gleichem Blutdruck bereits die doppelte Blutmenge transportiert $((1,2)^4 \approx 2)$.

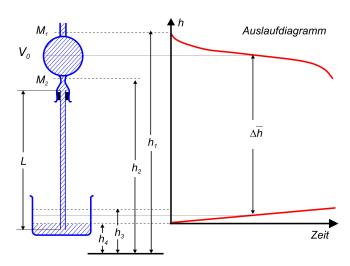
Schließlich bleibt noch anzumerken, dass die Viskosität einer Flüssigkeit keine Konstante ist. Sie nimmt in der Regel mit steigender Temperatur ϑ ab. Sie erkennen dies an den Beispielhaft in Tabelle 1 dargestellten Werten der Viskosität von Wasser und Glyzerin bei ausgewählten Temperaturen. Intuitiv ist klar, dass die Viskosität zunimmt, je näher sich die Flüssigkeit am Gefrierpunkt befindet, an dem die Viskosität dann schließlich extrem ansteigt bis sich ein Festkörper gebildet hat.

				0		
Viskosität $\eta(\vartheta)$ i) in mPas (Millipascalsekunde ¹)			nde ¹)
	$0^{\circ}\mathrm{C}$	$20^{\circ}\mathrm{C}$	$40^{\circ}\mathrm{C}$	$60^{\circ}\mathrm{C}$	80 °C	100 °C
Wasser	1,79	1,00	0,65	0,47	0,36	0,28
Glyzerin 1	2100	1410	238	81	31,8	14,8

Tabelle 1: Viskosität von Wasser und Glyzerin bei ausgewählten Temperaturen.

3 Kapillarviskosimeter

Versuchsdurchführung



 ${\bf Abb.}\ {\bf 3:}\ {\bf Versuchsaufbau}\ {\bf des}\ {\bf Kapillarviskosimeters}.$

In einem ersten Versuch messen Sie mit diesem Viskosimeter die Zähigkeit von Wasser und überprüfen das Gesetz von Hagen Poiseuille.

Die Flüssigkeit strömt aus einem Vorratsgefäß V_0 durch eine senkrecht stehende Kapillare der Länge L. Der Druckunterschied wird dabei von dem eigenen Schweredruck erzeugt. In der Abbildung 3 ist der obere Flüssigkeitspegel bei der Messmarke M_1 gezeichnet. Der Schweredruck beträgt dann in der Höhe h_4 des Flüssigkeitsspiegels im unteren Auffanggefäß gerade

$$\Delta p = \rho g(h_1 - h_4). \tag{2}$$

mit der Dichte ρ und der Erdbeschleunigung g. Der

zusätzliche Luftdruck trägt fast nichts zum Druckunterschied bei.

²Bemerkenswerterweise widerspricht eben diese Mitteilung allerdings der Norm und listet die Einheit Pascalsekunde als Pascal Sekunde in Tabelle 4 auf.



¹Man findet in der Literatur verschiedene Schreibweisen, z.B. auch MilliPascalsekunde, Millipascal-Sekunde oder Milli-Pascalsekunde. Die DIN 1301 [4] legt aber fest, dass Produkte von Einheiten als ein Wort geschrieben werden. Weiterhin findet sich in einer PTB Mitteilung von 2007 ([5], basierend auf [6]) der folgende Hinweis: "Der Name eines Vielfach- oder Teilungsvorsatzes wird dem Namen einer Einheit ohne Leerzeichen oder Bindestrich vorangestellt." ². Daraus ergibt sich die hier verwendete Schreibweise. In der Norm finden sich zur Schreibweise der Vielfach- oder Teilungsvorsätze leider keine konkreten Angaben, allerdings finden sich zahlreiche Beispiele, die der PTB Mitteilung entsprechen.

Wenn die Flüssigkeit ausströmt, ändert sich ständig die Höhendifferenz wie in dem Auslaufdiagramm Abbildung 3 angedeutet. Da aber sowohl ΔV als auch Δp direkt proportional zu Δh sind, kann man im Gesetz von Hagen-Poiseuille mit ihren mittleren Werten rechnen:

$$I = \frac{\Delta \overline{V}}{\Delta t} = \frac{\pi r^4}{8\eta L} \Delta \overline{p} = \frac{\pi r^4}{8\eta L} \rho g \Delta \overline{h} \qquad \text{mit} \qquad \Delta \overline{h} = \frac{1}{2} (h_1 + h_2) - \frac{1}{2} (h_3 + h_4)$$
 (3)

Für die Stromstärke I interessiert nur das ausströmende Volumen zwischen den Marken M_1 und M_2 . Da $\Delta \overline{V} = V_0 = \text{konstant}$ (Wert am Arbeitsplatz) ist, müssen Sie lediglich die Durchflusszeit Δt messen.

3.1 Versuch: Bestimmung der Viskosität von Wasser mit dem Kapillarviskosimeter

Am Arbeitsplatz finden Sie einen Aufbau zur Messung der Viskosität mittels eines Kapillarviskosimeters, ähnlich dem in Abbildung 3 schematisch dargestellten Aufbau. Um den Vorratsbehälter mit Wasser zu füllen steht zusätzlich eine Spritze bereit, die Sie über einen oben am Vorratsbehälter angebrachten 3-Wege Schalter mit dem Vorratsbehälter und der Kapillare verbinden können.

Zum Befüllen des Vorratsbehälters entleeren Sie die Spritze zunächst ganz während der 3-Wege Schalter so eingestellt ist, dass die Luft einfach entweichen kann. Dann drehen Sie den Schalter so, dass die Spritze nur mit dem Vorratsbehälter verbunden ist und ziehen mit der Spritze das Wasser in den Vorratsbehälter. Um das Wasser dann durch die Kapillare ausströmen zu lassen bringen Sie den 3-Wege Schalter schließlich in die Position, in der der Vorratsbehälter mit der Umgebungsluft verbunden ist.

- (M1) Bestimmen Sie zunächst die Wassertemperatur am Anfang des Versuchs $\vartheta_{\text{Anfang}}$.
- (M2) Regeln Sie den oberen Flüssigkeitspegel auf die Messmarke M_1 . Messen und notieren Sie in dieser Einstellung die Höhen h_1 , h_2 und h_4 (jeder von Ihnen einmal, Mittelwert).
- (M3) Ziehen Sie nun das Wasser etwas über die Messmarke M_1 hoch. Starten Sie die Stoppuhr beim passieren der Marke M_1 und stoppen Sie genau dann, wenn die Marke M_2 erreicht wird.
- (M4) Ziehen Sie nun das Wasser genau bis zur Marke M_2 wieder hoch und messen Sie in dieser Einstellung die Höhe h_3 (jeder von Ihnen einmal, Mittelwert).
- (M5) Zum Schluss messen Sie noch die Wassertemperatur am Ende des Versuchs $\vartheta_{\rm Ende}$.

Für die Auswertung benötigen Sie neben den erwähnten Werten weiterhin noch den Rohrradius r und die Rohrlänge L. Die Dichte von Wasser ρ_{Wasser} beträgt $1\,\mathrm{g/cm^3}=1\cdot10^3\,\mathrm{kg/m^3}$; für die Erdbeschleunigung g verwenden Sie den Wert $9.81\,\mathrm{m/s^2}$.

Auswertung

Bestimmen Sie

- (A1) zunächst die Mittelwerte für h_3 und Δt aus Ihren beiden Messungen.
- (A2) den Mittelwert $\Delta \overline{h}$ und den absoluten Größtfehler $\Delta(\Delta \overline{h})$.
- (A3) die mittlere Druckdifferenz $\Delta \overline{p} = \rho g \Delta \overline{h}$ und die relative Messabweichung $\frac{\Delta(\Delta \overline{p})}{\Delta \overline{p}}$.
- (A4) die Stromstärke $I = \frac{V_0}{\Delta t}$ und die relative Messabweichung $\frac{\Delta I}{I}$.



(A5) Den Wert für die Viskosität erhalten Sie dann schließlich aus Gleichung 3 und Ihre Messabweichung aus

$$\frac{\Delta\eta}{\eta} = 4\frac{u(r)}{r} + \frac{u(L)}{L} + \frac{\Delta I}{I} + \frac{\Delta(\Delta\overline{p})}{\Delta\overline{p}}.$$

(A6) Wie groß ist der Literaturwert für die Viskosität von Wasser bei der gemessenen Temperatur?

3.2 Versuch: Die extreme Abhängigkeit vom Rohrradius

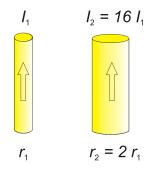


Abb. 4: Bei doppeltem Radius strömt 16mal mehr durch eine Röhre.

Für zwei gleich lange Kapillare mit verschiedenen Radien r_1 und r_2 gilt bei gleichem Druckgefälle Δp nach dem Gesetz von Hagen-Poiseuille (siehe Gleichung 1):

$$I_1 \propto r_1^4$$
 und $I_2 \propto r_2^4$.

Um diese Gesetzmäßigkeit zu überprüfen wiederholen Sie den vorigen Versuch mit vier weiteren Kapillaren gleicher Länge aber mit unterschiedlichen Radien. Da sich das Volumen und die Höhen nicht ändern sollten (solange Sie nicht zu viel Wasser verschütten beim Umbauen der Röhren) müssen Sie in diesem Teil nur die Messung der Durchflusszeiten erneut

durchführen.

Versuchsdurchführung

(M6) Ziehen Sie das Wasser etwas über die Messmarke M_1 hoch. Starten Sie die Stoppuhr beim passieren der Marke M_1 und stoppen Sie genau dann, wenn die Marke M_2 erreicht wird.

Wiederholen Sie diese Messung für die vier am Arbeitsplatz ausliegenden Kapillaren.

Auswertung

- (A7) Berechnen Sie die Stromstärken I.
- (A8) Stellen Sie grafisch die Stromstärke in Abhängigkeit vom Rohrradius dar. Sie könnten wie üblich ein Koordinatensystem I = I(r) verwenden, anschaulicher wird der Zusammenhang aber, wenn Sie ein Koordinatensystem mit $I = I(r^4)$ darstellen.
- (A9) Legen Sie eine Ausgleichsgerade durch Ihre Messwerte.
- (A10) Liegen Ihre Werte innerhalb der Fehlergrenzen?

Diese Abhängigkeit vom Radius erklärt die Schwierigkeiten beim Verkalken unserer Arterien. Fallen Ihnen noch andere Beispiele ein, wo dieser Effekt zum Tragen kommt?

4 Rotationsviskosimeter



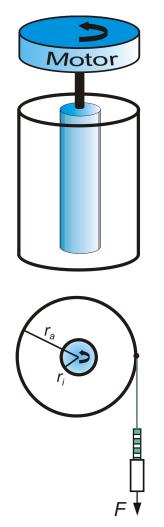


Abb. 5: Versuchsaufbau des Kapillarviskosimeters.



Abb. 6: Anzeige und Bedienknöpfe des Viskosimeters.

Eine weitere (komfortablere) Möglichkeit zur Bestimmung der Viskosität einer Flüssigkeit wird in sogenannten Rotationsviskosimetern angewandt. Sie funktionieren nach dem in der Skizze in Abbildung 5 dargestellten Prinzip.

In dem Spalt zwischen zwei konzentrisch angeordneten Zylindern mit den Radien r_i und r_a befindet sich eine Flüssigkeit. Der innere Zylinder wird von einem Motor mit konstanter Drehzahl N angetrieben. Ist der äußere Zylinder drehbar gelagert, wird er wegen der inneren Reibung ebenfalls anfangen zu rotieren, wenn auch verzögert. Sie können ihn daran hindern, indem Sie ihn einfach festhalten. Mit einem tangential angebrachten Kraftmesser könnten Sie die Kraft F ermitteln, die dazu nötig ist, und bei bekanntem Radius r_a auch das Drehmoment $M=r_aF$, das dabei auf den äußeren Zylinder ausgeübt wird.

Von welchen Größen wird dieses Drehmoment M abhängen?

Sie werden vermuten, dass

- $\bullet\,$ je größer die Drehzahl N, desto ...
- \bullet je größer die Viskosität η , desto ...
- \bullet je größer der Spalt r_a r_i zwischen den Zylindern, desto ...

Tatsächlich kann man zeigen, dass gilt

$$M = C\eta N. \tag{4}$$

mit einer Apparatekonstante C, die nur von den geometrischen Abmessungen und dem Abstand der Zylinder abhängig ist. Da sich zusätzliche Randeffekte kaum berechnen lassen, bestimmt man diese Apparatekonstante C in der Regel experimentell mit einer Flüssigkeit bekannter Viskosität.

Tatsächlich erkennt man bei älteren Varianten der Rotationsviskosimeter noch dieses Prinzip. Bei diesen zeigt ein über eine aufwendige Mechanik mit dem Zylinder verbundener Zeiger direkt das Drehmoment am inneren, rotierenden Messzylinder an. Man berechnet dann anhand dieses Wertes und der bekannten Gerätekonstante den Wert der Viskosität. Als Anschauungsmaterial finden Sie noch eines dieser älteren Geräte im Praktikum.

In diesem Versuch verwenden Sie jedoch modernere Geräte, bei denen diese Messung nicht mehr mechanisch vorgenommen wird, sondern das vom Motor aufzubringende Drehmoment um eine konstante Drehgeschwindigkeit zu erreichen wird elektronisch mit Sensoren direkt am Motor gemessen. Man kann die Funktionsweise

daher nicht mehr so genau erkennen, dafür ist die Ablesung aber wesentlich komfortabler.

Die Geräte berechnen aus dem gemessenen Drehmoment direkt die entsprechende Viskosität der Flüssigkeit und zeigen diese an. Das vereinfacht die Messung für Sie erheblich, Sie müssen lediglich noch den passenden Rotor auswählen und am Gerät einstellen und die richtige Geschwindigkeit einstellen um die Viskosität möglichst genau bestimmen zu können.

In Tabelle 2 finden Sie eine Übersicht über die Skalenendwerte der im Praktikum verwendeten Rotationsviskosimeter in Abhängigkeit von der Rotationsgeschwindigkeit und dem gewählten Rotor.

Hinweise zur Bedienung des Viskosimeters:

Abbildung 6 zeigt die Anzeige und die Bedienknöpfe des Viskosimeters.

- Der Knopf dient dazu, zwischen der Auswahl des Rotors und der Drehzahl hin- und her- zu schalten.
- Mit den und Knöpfen wählen Sie dann aus den verschiedenen Optionen aus und bestätigen Ihre Auswahl mit dem Knopf.
- Wenn Sie mit Ihren Einstellungen zufrieden sind und sich überzeugt haben, dass das Gerät sicher und gerade steht und der Messzylinder in der Flüssigkeit ist, starten Sie die Messung mit dem Knopf.
- Nachdem sich dann schließlich ein stabiler Wert eingestellt hat und Sie diesen aufgenommen haben können Sie die Messung mit dem gleichen Knopf wieder beenden.

Das Viskosimeter zeigt den berechneten Wert in der Einheit Centipoise, Symbol cP ³ an. Ein Centipoise entspricht praktischerweise genau einer Millipascalsekunde.

4.1 Versuch: Temperaturabhängigkeit der Viskosität

In diesem Versuch bestimmen Sie die Temperaturabhängigkeit der Viskosität eines Gemischs von Glyzerin mit 20 Prozent Wasseranteil. Wählen Sie anhand der Daten in Tabelle 1 und Tabelle 2 den Rotor mit der bestmöglichen Genauigkeit aus. Dies ist besonders deswegen wichtig, weil die Geräte selbständig erkennen, wenn der gemessene Wert zu niedrig oder zu hoch ist, und in diesem Fall eine Fehlermeldung statt des berechneten Wertes anzeigen. Sollte dies bei Ihrer Versuchsdurchführung passieren, müssen Sie entweder einen anderen Rotor wählen oder die Drehzahl ändern. Je nach Versuchsteil wird eine der beiden Optionen vorteilhaft sein, diskutieren Sie bitte mit dem/der Tutor*in das weitere Vorgehen.

Tabelle 2: Übersicht der verschiedenen Skalenendwerte für gegebene Rotordrehzahlen in Abhängigkeit vom verwendeten Rotor. Basierend auf [7]

Rotor	Nr. 0	Nr. 1	Nr. 2	Nr. 3	Nr. 4	
Rot. Geschw. in U/min		Skalenendwert in mPas				
60	10	100	500	2000	10000	
30	20	200	1000	4000	20000	
12	50	500	2500	10000	50000	
6	100	1000	5000	20000	100000	
3	200	2000	10000	40000	200000	
1.5	400	4000	20000	80000	400000	
0.6	1000	10000	50000	200000	1000000	
0.3	2000	20000	100000	400000	2000000	

 $^{^3}$ Benannt nach Jean Leonard Marie Poiseuille, nach dem auch das Hagen-Poiseuille Gesetz in Gleichung 1 benannt ist.



Versuchsdurchführung

- (M7) Tauchen sie den Messzylinder des Rotationsviskosimeters in die Flüssigkeit ein.
- (M8) Richten Sie das Viskosimeter mit den Schrauben am Stativ-Fuß senkrecht aus.
- (M9) Messen Sie die Temperatur $\vartheta_{\text{Anfang}}$ der Flüssigkeit.
- (M10) Stellen Sie sicher, dass am Gerät der korrekte Messzylinder ausgewählt ist und messen Sie für vier verschiedene Geschwindigkeiten die Viskosität der Flüssigkeit.
- (M11) Messen Sie erneut die Temperatur $\vartheta_{\rm Ende}$ der Flüssigkeit.
- (M12) Wiederholen Sie die vorherigen Schritte für vier weitere Temperaturen (insgesamt fünf verschiedene Temperaturen) im Bereich von Raumtemperatur bis 60 °C. Achtung, Verbrühungsgefahr!

Auswertung

(A11) Stellen Sie die gemessenen Werte für die Viskosität in einem Diagramm gegen die mittlere Temperatur $((\vartheta_{\text{Anfang}} + \vartheta_{\text{Ende}})/2)$ dar. Denken Sie hierbei auch an die Fehlerbalken.

4.2 Versuch: Bestimmung der Viskosität einer Flüssigkeit Ihrer Wahl

Im Praktikum stehen verschiedene Flüssigkeiten zur Auswahl, deren Viskosität Sie bestimmen können. Alternativ können Sie auch gerne eine eigene Flüssigkeit mitbringen, deren Viskosität Sie interessiert. Sie benötigen allerdings mindestens 500 mL.

Schätzen Sie bitte zunächst den erwarteten Wert der Viskosität durch Vergleich mit den bereits gemessenen Flüssigkeiten ab, damit Sie den passendsten Rotor auswählen können. Danach verfahren Sie zur Messung analog zum vorherigen Versuch. Da bei einigen, sogenannten nichtnewtonschen Flüssigkeiten die Viskosität von der Scherung abhängt nehmen Sie bitte wieder Werte bei verschiedenen Rotationsgeschwindigkeiten auf.

Versuchsdurchführung

- (M13) Tauchen sie den Messzylinder des Rotationsviskosimeters in die Flüssigkeit ein.
- (M14) Richten Sie das Viskosimeter mit den Schrauben am Stativ-Fuß senkrecht aus.
- (M15) Messen Sie die Temperatur $\vartheta_{\text{Anfang}}$ der Flüssigkeit.
- (M16) Stellen Sie sicher, dass am Gerät der korrekte Messzylinder ausgewählt ist und messen Sie für vier verschiedene Geschwindigkeiten die Viskosität der Flüssigkeit.
- (M17) Messen Sie erneut die Temperatur $\vartheta_{\rm Ende}$ der Flüssigkeit.



Auswertung

- (A12) Vergleichen Sie den ermittelten Wert mit Literaturwerten (soweit vorhanden).
- (A13) Ordnen Sie den Wert ein. Zum Vergleich können die hier in Tabelle 1 und Tabelle 3 angegebenen Werte herangezogen werden, sowie weitere Literaturwerte die Sie selbst recherchieren.
- (A14) Stimmt der Wert mit Ihren Erwartungen überein?
- (A15) Stellen Sie grafisch die Viskosität in Abhängigkeit von der Rotationsgeschwindigkeit dar, natürlich mit Fehlerbalken.
- (A16) Sind Ihre gemessenen Werte vereinbar mit der Hypothese dass die Viskosität unabhängig von der Rotationsgeschwindigkeit ist? Hinweis: In diesem Fall sollte eine Gerade auf Höhe des Mittelwerts der Messungen innerhalb aller Fehlerbalken liegen.

Verlassen Sie bitte Ihren Arbeitsplatz sauber. Es gibt Papiertücher um die Glyzerin Reste wegzuwischen.

Tabelle 3: Viskosität von Glyzerin/Wasser-Gemischen bei 20°C. [8]

Glyzerin Vol-%	Wasser Vol-%	${\rm kgm^{-1}s^{-1}}$
100	0	1,41
99	1	$1,\!15$
98	2	0,939
90	10	0,219
50	50	0,006

5 Bonusaufgaben:

Hier finden Sie Bonusaufgaben, die Sie bei besonderem Interesse oder falls Sie noch einen Bonuspunkt brauchen bearbeiten können.

5.1 Bestimmung der Glyzerin-Konzentration aus der gemessenen Viskosität und Temperatur

In [9] finden Sie eine empirische Formel zur Berechnung der Viskosität eines Glyzerin-Wasser Gemischs in Abhängigkeit von der Glyzerin Konzentration und der Temperatur.

- (B1) Passen Sie die empirische Funktion mittels der Parameter "Glyzerinkonzentration" bei konstantem Temperatur-Parameter (mit dem gemessenen Wert) an Ihre in (M12) aufgenommenen Messwerte an.
- (B2) Stellen Sie die sich ergebende Kurve zusammen mit den Messwerten im Diagramm aus (A11) dar.
- (B3) Stimmen Ihre Messwerte mit dieser Formel überein?
- (B4) Welche Glyzerinkonzentration und Temperatur ergibt sich aus dem Fit. Sind diese Werte realistisch?

5.2 Der Einfluss des Luftdrucks

In Unterabschnitt 3.1, findet sich die Aussage, dass der zusätzliche Luftdruck fast nichts zum Druckunterschied nach Gleichung 2 beiträgt.

- (B1) Berechnen Sie den zusätzlichen Luftdruck für den Aufbau und die von Ihnen in (M2) und (M4) gemessenen Höhen.
- (B2) Geben Sie die sich ergebende Formel samt Herleitung und verwendeter Quellen an.
- (B3) Unter welchen Umständen wäre der Luftdruck nicht zu vernachlässigen?

Literatur

- [1] Hans Joachim Eichler, Heinz-Detlef Kronfeldt, and Jürgen Sahm. *Das neue Physikalische Grundpraktikum*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2016.
- [2] Wilhelm Walcher. Praktikum der Physik. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 2004.
- [3] Peter Kersten, Paul A. Tipler, and Gene Mosca. *Tipler Physik: für Studierende der Naturwissenschaften und Technik*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2024.
- [4] DIN 1301-1:2010-10 Einheiten Teil 1: Einheitennamen, Einheitenzeichen.
- [5] Cecile Charvieux, Bernd Siebert, and Michael Gläser. Das Internationale Einheitensystem (SI). PTB-Mitteilungen, (117), June 2007.
- [6] BIPM. Le Système international d'unités / The International System of Units ('The SI Brochure'). Bureau international des poids et mesures, eighth edition, 2006.
- [7] PCE RVI 2 Viskosimeter mit digitaler Anzeige Bedienungsanleitung, Jan 2022.



[8] J. B. Segur and Helen E. Oberstar. Viscosity of glycerol and its aqueous solutions. *Industrial & Engineering Chemistry*, 43(9):2117–2120, 1951.

[9] Nian-Sheng Cheng. Formula for the viscosity of a glycerol-water mixture. Industrial & Engineering Chemistry Research, 47(9):3285–3288, 2008.