

VIR@Home – Viskosität und Reynoldszahl

Fakultät für Physik der Ludwig-Maximilians-Universität München
P2 — Praktikum — Versuch in Eigenregie

2. August 2020

Motivation und Versuchsziele

Dieser Versuch findet in Eigenregie zu Hause statt. Die Details des Versuchs können und sollten Sie dabei selbst gestalten und Ihre bereits im Praktikum P1 erworbenen Kompetenzen aus den Bereichen Experimentieren und Dokumentieren mit einbringen. Bei der Bewertung wird dabei besonderer Wert auf Nachvollziehbarkeit und Reproduzierbarkeit gelegt. Wenn etwas nicht klappt, versuchen Sie das Problem zu lösen und legen Sie – unabhängig davon, ob Sie das Problem lösen konnten oder nicht – besonderen Wert darauf, dass nachvollzogen werden kann, was Sie versucht haben, um die auftretenden Probleme zu lösen.

Inhaltlich dockt der Versuch an einem Ihnen bereits aus dem Praktikum P1 bekannten Phänomen an: Der Viskosität.

Die Lehre des Fließ- und Verformungsverhaltens von Materie nennt man Rheologie. Für diesen Versuch werden Sie den mikroskopischen Aufbau von Flüssigkeiten rekapitulieren, um deren rheologisches Verhalten zu verstehen. Spezifische Fließeigenschaften bestimmen z. B. die Vorgänge im menschlichen Blutkreislauf, die pharmazeutische Entwicklung von Salben und Suspensionen oder die Fließgeschwindigkeit der Lava eines Vulkans und des Magmas im Erdmantel. Die *Viskosität* einer Flüssigkeit ist ein Maß für ihre Zähigkeit und hängt von den wirkenden Kräften zwischen den Molekülen ab. Sie kommt bei der Sedimentationsanalyse heterogener Dispersionen zum Tragen, denn verschiedene Flüssigkeitsmoleküle bremsen sinkende Objekte unterschiedlich stark.

Im Versuch messen Sie daheim die Viskosität von Spülmittel oder Shampoo.

Teilversuche

1. Bestimmung der Viskosität von Spülmittel

Für zwei unterschiedliche Temperaturen wird anhand eines Versuchs mit Haushaltsmaterialien die Viskosität von Spülmittel über das Aufsteigen von Luftblasen bestimmt.

2. Kugelfallviskosimeter

Mit einem Glas, einer Kugel und Spülmittel wird ein einfaches Kugelfallviskosimeter gebaut und auch damit die Viskosität von Spülmittel bestimmt.

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Physikalische Grundlagen | 3 |
| 1.1 | Mikroskopisches Bild von Flüssigkeiten | 3 |
| 1.2 | Viskosität und Reynoldszahl | 4 |
| 1.3 | Wirkende Kräfte auf eine umströmte Kugel | 6 |
| 2 | Technische Grundlagen | 8 |
| 2.1 | Aufstieg von Luftblasen ¹ | 8 |
| 2.2 | Kugelfallviskosimeter | 9 |
| 3 | Versuchsplanung | 10 |
| 4 | Versuchsdurchführung | 11 |
| 4.1 | Aufstieg von Luftblasen | 11 |
| 4.2 | Kugelfallviskosimeter | 12 |
| 5 | Auswertung | 12 |
| 5.1 | Aufstieg von Luftblasen | 12 |
| 5.2 | Kugelfallviskosimeter | 13 |
| 6 | Ausblick | 13 |
| 7 | Anhang | 14 |

¹Die Idee für diesen Versuch verdanken wir Prof. U. Harten von der Hochschule Mannheim.

1 Physikalische Grundlagen

1.1 Mikroskopisches Bild von Flüssigkeiten

Anders als im Festkörper bewegen sich die Moleküle einer Flüssigkeit oder eines Gases innerhalb ihres Volumens relativ frei und ungeordnet. Dies bezeichnet man als *Brownsche Molekularbewegung* oder *thermische Bewegung*, denn die mittlere Geschwindigkeit der Bewegung entspricht der Temperatur der Flüssigkeit bzw. des Gases. Temperaturerhöhung führt zu einer Verstärkung der Brownschen Molekularbewegung. Gase füllen das vorhandene Volumen eines Behälters vollständig und gleichmäßig aus. Die Form und Oberfläche einer Flüssigkeit hingegen kann sich verändern, während ihr Gesamtvolumen dasselbe bleibt.

Zwischen den Flüssigkeitsmolekülen wirken elektrische Kräfte, die sie in einem Molekülverbund zusammenhalten. Die Reichweite dieser Kräfte ist sehr gering, so dass sie nur zwischen benachbarten Teilchen wirken. Man unterscheidet zwischen *Adhäsionskräften*, die zwischen den Flüssigkeitsmolekülen und den Molekülen eines angrenzenden Mediums auftreten, und *Kohäsionskräften*, die untereinander zwischen den Molekülen einer Flüssigkeit herrschen.

Bei einem bestimmten Abstand r_0 zwischen den Molekülen befinden sich die Moleküle im Kräftegleichgewicht. Aufgrund der thermischen Bewegung bleiben sie allerdings nicht wie bei einem Festkörper an ihrem Platz, sondern bewegen sich innerhalb des Volumens. Vergrößert sich der Abstand zwischen zwei Molekülen, so ziehen sie sich an (siehe Abbildung 1).

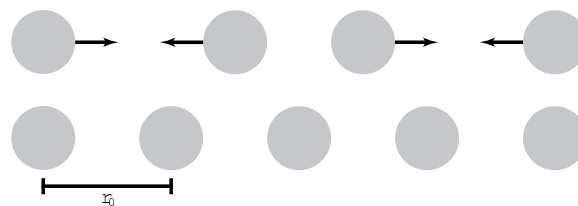


Abbildung 1: Anziehende Kräfte zwischen Molekülen an der Oberfläche.

Wenn ein Molekül bewegt wird, bewirkt der vergrößerte Abstand zu den Nachbarmolekülen eine resultierende rücktreibende Kraft F_{res} , die es in Richtung seines ursprünglichen Platzes zurückzieht (siehe Abbildung 2).

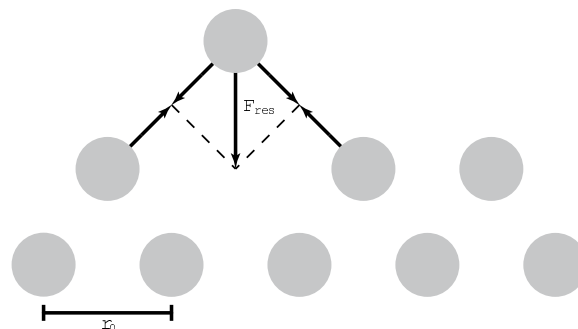


Abbildung 2: Rücktreibende Kraft auf ein ausgelenktes Oberflächenmolekül.

Also versuchen alle Moleküle einer Flüssigkeit, den Abstand r_0 zu ihren Nachbarmolekülen einzunehmen, um sich mit ihnen im Kräftegleichgewicht zu befinden.

Diese Kräfte sind der Grund für viele Eigenschaften einer Flüssigkeit. Sie treten als Reibungskraft auf, denn wenn sich ein Molekül bewegt, wird es von seinen Nachbarn abgebremst. Sie erschweren es, dass Moleküle die Oberfläche einer Flüssigkeit verlassen. Sollte die thermische Bewegung einzelner Moleküle allerdings zu groß sein, können diese doch den Flüssigkeitsverbund verlassen (hinaus diffundieren). Bei Gasen ist diese Bewegung deutlich stärker, als dass die wirkenden Kräfte die Moleküle zu einem Flüssigkeitsverbund zusammenhalten könnten.

1.2 Viskosität und Reynoldszahl

Diese Anziehungskräfte zwischen Flüssigkeitsmolekülen machen sich als innere Reibungskräfte bemerkbar: Sie bremsen die Molekülbewegungen bei einer strömenden Flüssigkeit ab. Um dieses Phänomen quantitativ zu modellieren, unterteilt man die Flüssigkeit in einzelne sehr dünne Schichten, die parallel zur Bewegungsrichtung liegen. Diese gleiten in der Flüssigkeit aneinander reibend entlang. Wenn sie sich dabei gegenseitig nicht vermischen, spricht man von *laminarer Strömung*. Andernfalls nennt man die Strömung *turbulent*, d.h. mit Wirbeln, dann sind die folgenden Überlegungen nur eingeschränkt gültig.

Abbildung 3 zeigt die drei Molekülschichten einer Flüssigkeit im Abstand Δx voneinander, die wie Platten nebeneinander liegen. Wenn sich die Schichten relativ zueinander nicht bewegen, tritt keine Reibung zwischen den Molekülen auf (siehe Abbildung 3a). Beschleunigt man die mittlere Platte um Δv , muss man mit einer Kraft ziehen, deren Betrag der inneren Reibungskraft F entspricht. Dabei ist die Relativgeschwindigkeit zwischen den Platten entscheidend. Je größer Δv (siehe Abbildung 3b) pro Abstand Δx ist, desto größer ist die Kraft F . Außerdem ist diese Kraft proportional zur Fläche A der aneinander vorbeigleitenden Schichten.

Die bremsende Kraft F lässt sich also durch folgenden Zusammenhang beschreiben:

$$F \propto A \frac{\Delta v}{\Delta x}.$$

Um das Proportionalitätszeichen \propto durch ein Gleichheitszeichen ersetzen zu können, führt man eine dimensionsbehaftete Konstante, die sogenannte (dynamische) *Viskosität* η (griech. „Eta“) der Flüssigkeit, ein:

$$F = \eta \cdot A \frac{\Delta v}{\Delta x}. \quad (1)$$

Die Einheit $[\eta]$ dieser Konstante ergibt sich aus den restlichen Einheiten auf beiden Seiten der Gleichung:

$$\begin{aligned} \text{N} &= [\eta] \cdot \text{m}^2 \cdot \frac{\text{m/s}}{\text{m}} = [\eta] \cdot \frac{\text{m}^2}{\text{s}} \\ \Rightarrow [\eta] &= \text{N} \cdot \frac{\text{s}}{\text{m}^2} = \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \cdot \text{s} = \text{Pa} \cdot \text{s} \quad (\text{Pascalsekunde}). \end{aligned}$$

Die Viskosität ist charakteristisch für die jeweilige Flüssigkeit und ein Maß für ihre Zähigkeit. Typische Werte finden Sie im Anhang auf der letzten Seite.

1 Physikalische Grundlagen

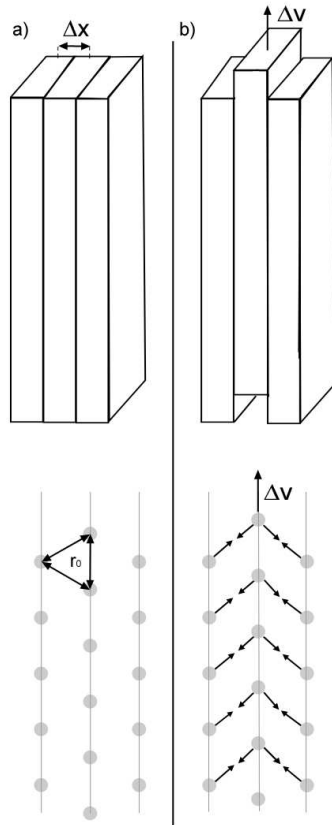


Abbildung 3: Bewegte Molekülschicht und wirkende Kräfte zwischen ihr und den beiden Nachbarschichten.

Wenn η unabhängig von der Fließgeschwindigkeit v ist, spricht man von einer *Newtonschen Flüssigkeit* und bezeichnet (1) als *Newtonsches Reibungsgesetz*. Die meisten reinen Flüssigkeiten sind Newtonsch, z.B. Wasser (im Versuch wird nur mit Newtonschen Flüssigkeiten gearbeitet).

Aufgrund der thermischen Bewegung der Moleküle nimmt die Viskosität von Flüssigkeiten mit steigender Temperatur T stark ab (siehe Tabelle 1 und Abbildung 6).

Honig oder Öl sind zähflüssiger als Wasser, aber dieses Verhältnis quantitativ anzugeben, fällt schwer. Und die wenigsten würden erwarten, dass – wie man aus den Versuchen sehen wird – Öl um den Faktor 1000 viskoser als Wasser ist. Im Alltag erlebt man Unterschiede in der Zähigkeit beim Ausgießen von Flüssigkeiten, dem Ausdrücken von Tuben oder beim Fließen von Flüssigkeiten durch ein Rohr.

Glas wird oft für einen Festkörper gehalten, strukturell entspricht es aber einer Flüssigkeit mit sehr hoher Viskosität, da sich die für einen Festkörper notwendige Kristallstruktur nicht ausbildet. Die Viskosität von Kieselglas ist bei 400 °C ca. 10^{12} -mal so groß wie die von Wasser bei 20 °C. Die größten Linsen für Teleskope, die je gebaut wurden, haben ca. einen Meter Durchmesser. Aufgrund der Schwerkraft beginnt eine so große Linse, sich fließend zu verformen und bildet deshalb nicht mehr richtig ab. Heutzutage verwendet man daher Spiegelteleskope.

1 Physikalische Grundlagen

Beim Waschen mit Wasser macht sich die Temperaturabhängigkeit der Viskosität bemerkbar, da warmes Wasser dünnflüssiger und damit besser zum Abwaschen geeignet ist. Beim Starten eines Dieselmotors im Winter wird eine schwache Batterie es nicht schaffen, den Motor zur Selbstzündung zu bringen, da Diesel und Schmieröl bei Minusgraden um ein vielfaches zäher sind als im Sommer. Die Temperaturabhängigkeit machen sich auch Glasbläser zunutze: Sie erhitzen Glas und erniedrigen damit dessen Viskosität, um es leichter verformen zu können.

Strömen können neben Flüssigkeiten auch Gase. Gase sind dabei meist kompressibel, das heißt, sie ändern bei Druckänderung ihr Volumen. Flüssigkeiten dagegen können meist als inkompressibel betrachtet werden.

Das Wasser aus einem Wasserhahn fließt bei niedriger Strömungsgeschwindigkeit laminar und bei hoher Geschwindigkeit turbulent. Ob nun die Strömung um ein kugelförmiges Objekt laminar oder turbulent sein wird, kann abgeschätzt werden mit der *Reynoldszahl*

$$R_e = \frac{v \cdot 2r \cdot \rho}{\eta} \quad (2)$$

mit v = Strömungsgeschwindigkeit der Kugel, r = Kugelradius, ρ (griech. „Rho“) = Dichte der Flüssigkeit, Dichte = Masse pro Volumen $\rho = m/V$.

Eine Strömung wird ungefähr dann turbulent, wenn $R_e \geq 2000$. So fließt z.B. Honig laminar wegen seiner hohen Viskosität, dagegen sind Luftströmungen meistens turbulent wegen der niedrigen Viskosität im Nenner von (2).

1.3 Wirkende Kräfte auf eine umströmte Kugel

Bewegt sich ein Körper in einer Flüssigkeit oder einem Gas, wird er durch Wechselwirkung mit den Molekülen des Mediums abgebremst. Ist dieser Körper eine kleine Kugel, die sich relativ langsam in einer Flüssigkeit bewegt, so entstehen wie bei laminarer Strömung keine Verwirbelungen. Dabei ist wichtig, dass die Flüssigkeit weit ausgedehnt ist, es also keine Beeinflussung durch eine Gefäßwand in der Nähe der Kugel gibt. Unter diesen Bedingungen gibt das *Stokessche Gesetz* die Reibungskraft F_r an, die auf eine Kugel mit dem Radius r ausgeübt wird, wenn sie sich mit der Geschwindigkeit v in einer Flüssigkeit mit der Viskosität η bewegt

$$F_r = -6\pi r \eta v. \quad (3)$$

Dabei bedeutet das Minuszeichen, dass die Kraft der Geschwindigkeit entgegengesetzt ist.

Abbildung 4 zeigt eine Kugel, die in einer Flüssigkeit aufgrund der Schwerkraft F_g sinkt. Sie wird durch die Auftriebskraft F_a und die Stokessche Reibungskraft gebremst.

Deshalb erreicht die Kugel nach einer Beschleunigungsphase eine konstante Endgeschwindigkeit, aus der sich die Viskosität wie folgt berechnen lässt.

Die auf die Kugel (K) wirkende *Schwerkraft* ist

$$F_g = m_K g = V_K \rho_K \cdot g = \frac{4}{3} \pi r^3 \cdot \rho_K \cdot g \quad (4)$$

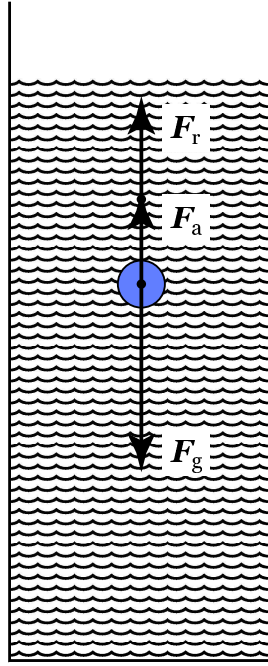


Abbildung 4: Sinkende Kugel in viskoser Flüssigkeit und die an ihr angreifenden Kräfte: Schwerkraft F_g , Auftrieb F_a und Stokesche Reibung F_r .

mit dem Kugelvolumen $V_K = \frac{4}{3}\pi r^3$.

Die *Auftriebskraft* lässt Luftblasen in einer Flüssigkeit oder Heliumballons in der Luft aufsteigen. Sie wird verursacht durch die Variation des Druckes mit der Wassertiefe oder mit der Höhe in der Luft. Da der Druck im Wasser aber wesentlich stärker variiert als in der Luft, ist im Wasser die Auftriebskraft viel größer. Für beliebig geformte Gegenstände lässt sich die Auftriebskraft nach dem Archimedisches Prinzip berechnen. Demnach ist die Auftriebskraft betraglich genau gleich der Gewichtskraft der verdrängten Flüssigkeit (F_l):

$$F_a = -m_{F_l}g = -\frac{4}{3}\pi r^3 \cdot \rho_{F_l} \cdot g. \quad (5)$$

Die Vorzeichen in den Gleichungen (3-5) lassen erkennen, dass Reibungs- und Auftriebskraft nach oben wirken, während die Schwerkraft nach unten wirkt. Die beiden letzteren Kräfte sind konstant, während die Reibungskraft mit zunehmender Geschwindigkeit v größer wird. Sobald die Kugel nach einiger Zeit mit konstanter Geschwindigkeit sinkt, gilt nach Newtons 1. Gesetz: „Die Summe aller Kräfte auf einen Körper (die Kugel) ist genau dann gleich null, wenn er sich mit konstanter Geschwindigkeit fortbewegt oder in Ruhe bleibt.“ Konstante Geschwindigkeit heißt also $F_g + F_a + F_r = 0$, so dass

$$\frac{4}{3}\pi r^3 \rho_K g - \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_{F_l} g - 6\pi r \eta v = 0. \quad (6)$$

aus den Gleichungen (3-5) folgt. Und Auflösen nach η ergibt

$$\eta = \frac{2gr^2}{9v} (\rho_K - \rho_{F_l}). \quad (7)$$

2 Technische Grundlagen

Als Sedimentation bezeichnet man das Absetzen von festen Teilchen aus Flüssigkeiten unter dem Einfluss einer äußeren Kraft. Bei der Sedimentationsanalyse werden Teilchen unterschiedlicher Dichte voneinander getrennt, z.B. bei der Blutsenkung Erythrozyten vom Blutplasma, oder es werden aus der Sedimentationsgeschwindigkeit Rückschlüsse auf die Größe der sinkenden Körper gezogen. Da Moleküle und kleine Körper sehr langsam sinken, ersetzt man die Schwerkraft durch die Zentrifugalkraft. Eine Ultrazentrifuge kann die Sedimentationsgeschwindigkeit um das 10^6 -fache steigern.

Bei einem Fallschirmsprung kann das Stokessche Gesetz zwar nicht mehr zur exakten Beschreibung verwendet werden, qualitativ ist aber der Fall in der Luft sehr ähnlich. Da die Luftreibung mit zunehmender Geschwindigkeit immer größer wird, kann man im freien Fall höchstens ca. 200 km/h und mit geöffnetem Schirm ca. 10 km/h erreichen.

2 Technische Grundlagen

2.1 Aufstieg von Luftblasen²

Im Versuch vermessen Sie die Geschwindigkeit, mit der Luftblasen aufsteigen. Die Aufstiegsgeschwindigkeit dieser Blasen ergibt sich gemäß (6), wobei hier die Schwerkraft F_g der Luftblase vernachlässigbar ist, und die Geschwindigkeit das umgekehrte Vorzeichen hat. Die Blase steigt nämlich – im Gegensatz zur fallenden Kugel. Es bleiben also nur zwei Kräfte, die auf die Blase wirken: die Auftriebskraft F_a und die Reibungskraft F_r . Für die Auftriebskraft gilt (5), also konkret

$$F_a = -\frac{4}{3}\pi r_{\text{Luftblase}}^3 \cdot \rho_{\text{Spüli}} \cdot g. \quad (8)$$

Darin ist das $\rho_{\text{Spüli}}$ die Dichte unseres Spülmittels oder Shampoos, die auch noch bestimmt werden muss. Für die Reibungskraft durch die Viskosität gilt bei laminarer Umströmung der Blase das Gesetz von Stokes, also (3). Allerdings wirkt F_r nun nach unten.

Wenn die Blase mit konstanter Geschwindigkeit aufsteigt, haben beide Kräfte den gleichen Betrag. Daraus ergibt sich eine Formel für die Viskosität des Spülmittels in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit der Blase:

$$\eta_{\text{Spüli}} = \frac{2 \cdot g \rho_{\text{Spüli}}}{9 \cdot v_{\text{Luftblase}}} r_{\text{Luftblase}}^2. \quad (9)$$

²Die Idee für diesen Versuch verdanken wir Prof. U. Harten von der Hochschule Mannheim.

2.2 Kugelfallviskosimeter

Der links in Abbildung 5 gezeigte Messaufbau wird im Versuch FLU des Präsenzpraktikums P1 verwendet und heisst *Kugelfallviskosimeter*. In einer Flüssigkeit sinken Kugeln mit konstanter Geschwindigkeit, wenn sich Schwer-, Auftriebs- und Reibungskraft gerade kompensieren. Nachdem sich die konstante Sinkgeschwindigkeit eingestellt hat, lässt sie sich durch eine Weg/Zeit-Messung bestimmen. Aus dem Kugelradius und den Dichten von Kugel und Flüssigkeit kann die Viskosität mittels (7) berechnet werden. Dabei kann der Kugeldurchmesser direkt mit dem *Messschieber* bestimmt werden.

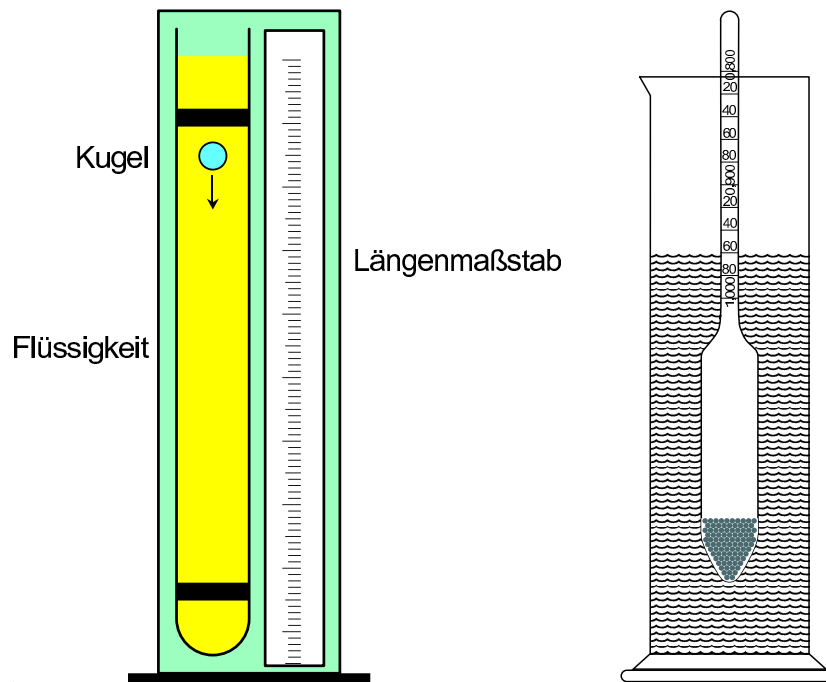


Abbildung 5: Kugelfallviskosimeter (links) und Aräometer. (rechts).

Die Flüssigkeitsdichte wird mit einem sogenannten *Aräometer* gemessen (siehe Abbildung 5, rechts). Ein Senkkörper (S), dessen Dichte kleiner ist als die der Flüssigkeit (Fl), schwimmt darin. Er taucht so weit ein, bis das Gewicht der verdrängten Flüssigkeit mit dem des Körpers übereinstimmt (Archimedisches Prinzip):

$$m_S g = m_{F1} g = \rho_{F1} V_{F1} g \quad \Rightarrow \quad \rho_{F1} = \frac{m_S}{V_{F1}}.$$

Kennt man also die Masse m_S des Senkkörpers, so lässt sich aus dem verdrängten Flüssigkeitsvolumen V_{F1} die Dichte ρ_{F1} der Flüssigkeit berechnen. Auf dem Aräometer ist eine auf die Dichte geeichte Skala angebracht, so dass an der Flüssigkeitsoberfläche die Dichte direkt in g/cm^3 abgelesen werden kann.

3 Versuchsplanung

Zur Vorbereitung auf diesen Versuch müssen Sie sich neben den physikalischen Grundlagen auch mit der Organisation bzw. Beschaffung der notwendigen Versuchsmaterialien befassen. Lesen Sie dazu wie für eine gründliche Vorbereitung üblich das gesamte Skript inklusive Durchführung während Ihrer Vorbereitung durch und identifizieren dabei das notwendige Material und planen Sie den Ablauf der Durchführung. Dokumentieren Sie dabei auch Ihre Überlegungen. Sie dürfen gerne bereits vor dem im Zeitplan genannten Termin Ihre Experimente starten. Andernfalls benötigen Sie ggf. 2 Spülmittelflaschen gleicher Marke, damit Sie die Viskosität für 2 unterschiedliche Temperaturen am gleichen Tag bestimmen können.

Testen Sie das in der Versuchsdurchführung beschriebene Vorgehen zur Erzeugung von Luftblasen und die Methode der Dichtebestimmung bereits während der Vorbereitung auf den Versuch. So bekommen Sie ein Gefühl, wieviele Luftblasen entstehen und welche Probleme beim Experimentieren mit selbst erzeugten Versuchsaufbauten auftreten könnten. Überlegen Sie sich möglichst im Vorfeld jeweils auch alternative Messmöglichkeiten (z.B. Längen-/Zeitmessung mit Lineal/Stoppuhr oder über Videoanalyse). Ihrer Kreativität sind dabei keine Grenzen gesetzt. Achten Sie dabei jedoch auf mögliche Gefahren und auf Ihre Sicherheit!

Wenn Sie tiefer in die Arbeitsweise eines Experimentalphysikers eintauchen möchten, optimieren Sie im weiteren Verlauf des Experiments Ihre Messmethoden, in dem Sie das Experiment dahingehend abwandeln, dass Sie bestimmte Merkmale herausarbeiten (Beispiele):

- Seien Sie kreativ und optimieren den Versuchsaufbau so, dass die zuvor aufkommenden Probleme eliminiert werden.
- Versuchen Sie herauszufinden, welche Messgrößen den größten Einfluss auf die Unsicherheit der Viskosität haben, und optimieren Sie soweit Ihnen möglich die dazugehörigen Messmethoden.
- Versuchen Sie, den Versuchsaufbau oder die Auswertemethoden so zu optimieren, dass Sie besonders präzise Messwerte erhalten (d.h. kleine Messunsicherheiten)
- Bestimmen Sie die Viskosität von anderen Flüssigkeiten, indem Sie das Spülmittel beispielsweise durch Olivenöl, Shampoo oder Flüssigwaschmittel ersetzen. Wie wirkt sich die Form des Gefäßes auf Ihre Ergebnisse aus?

Die Arbeit eines Physikers in der Forschung besteht in der Regel aus viel Detailarbeit. So sind häufig Abhängigkeiten eines physikalischen Effektes von bestimmten Parametern des Experimentaufbaus zu untersuchen.

Auch als Lehramtstudierender profitieren Sie davon, wenn Sie Zeit in diesen Versuch investieren, da Sie dann die Teilnahme Ihrer zukünftigen Schülerinnen und Schüler an Wettbewerben wie „Jugend forscht“ besser fördern können.

Insgesamt soll in dieses Experiment mindestens der gleiche Zeitaufwand wie in normale vorgefertigte Versuche des Praktikums investiert werden.

4 Versuchsdurchführung

Sie führen den Versuch mit eigenem Spülmittel oder Shampoo durch. Die Spülmittelflasche muss gut durchsichtig sein, und Ihr Spülmittel darf nicht trübe sein, damit die Luftblasen gut erkennbar sind.

Für den zweiten Teilversuch benötigen Sie zusätzlich ein Bierglas und eine Murmel oder Ähnliches. Integrieren Sie in Ihre Versuchsdokumentation pro Teilversuch jeweils mindestens ein Foto Ihres Versuchsaufbaus.

4.1 Aufstieg von Luftblasen

Versuch

Bestimmung der Viskosität von Spülmittel/Shampoo durch Beobachtung des Blasenanstiegs in Abhängigkeit von der Temperatur.

Messgrößen

- Markenname des Spülmittels bzw. Shampoos
- geschätzte Dichte $\rho_{\text{Spüli}}$ des Spülmittels bzw. Shampoos
- Durchmesser $2r_i$ der Luftblasen
- Steighöhendifferenzen l_i der Blasen
- Steigzeiten t_i der Blasen

Durchführung

Die Dichte des Spülmittels bestimmen Sie ungefähr, indem Sie die mit Spülmittel gefüllte Spülmittelflasche als Aräometer (vgl. Abschnitt 2.2) benutzen: Sie lassen die Flasche im Wasser schwimmen und beobachten, wie tief Sie eintaucht. Hat die Oberfläche des Spülmittels die gleiche Höhe wie der Wasserspiegel, so sind die Dichte des Spülmittels und des Wassers gleich. Das ist wahrscheinlich der Fall. Wenn nicht, dann schätzen Sie den Unterschied prozentual ab und berücksichtigen dies bei der Diskussion.

Ihr Spülmittel sollte ein paar Stunden lang im Raum gelagert haben, damit es die Temperatur der Umgebung (ca. 20-25 °C) angenommen hat. Schütteln Sie die Flasche kräftig und stellen Sie sie aufrecht hin. Suchen Sie sich eine möglichst große Luftblase nahe der Flaschenwand aus, und schätzen Sie mit einem Geodreieck den Durchmesser möglichst genau ab. Während die gewählte Blase aufsteigt, bestimmen Sie die Steighöhendifferenz und -zeit für diesen Blasenanstieg. Dazu ist es sinnvoll, vorher Markierungslinien für gewisse Steighöhen auf die Flasche zu zeichnen. Üben Sie das Messen einige Male – bis es klappt!

Führen Sie dies für insgesamt zehn Blasen durch, um einigermaßen verlässlich die Unsicherheit zu bestimmen. Bitte fertigen Sie unbedingt ein Foto von solch einem Blasenanstieg für Ihr Protokoll an. Nehmen Sie das Geodreieck mit auf, damit ein Maßstab erkennbar ist.

Lagern Sie das Spülmittel über Nacht – mindestens acht Stunden lang – im Kühlschrank. Wiederholen Sie die gesamte Messung bei Kühlschranktemperatur (ca. 5-10 °C).

4.2 Kugelfallviskosimeter

Teilversuch

Bestimmen Sie erneut die Viskosität ihres Spülmittels bei Raumtemperatur mit einem improvisierten Kugelfallviskosimeter durch fünfmalige Messung der Fallzeit.

Messgrößen

- Durchmesser $2r$ einer Kugel mit Messunsicherheit $\Delta 2r$
- Fallstrecke s
- Fallzeiten t_i
- Dichte $\rho_{\text{Spüli}}$ aus Abschnitt 4.1

Durchführung

Verwenden Sie als Kugelfallviskosimeter z.B. ein Bierglas, das möglichst groß und möglichst zylinderförmig ist. Ihr Viskosimeter sollte senkrecht stehen, und die verwendete Kugel aus Stahl (Magnetisches Konstruktionsspielzeug) oder Glas (Murmel) sollte fettfrei und trocken sein.

Bitte fertigen Sie ein Foto des Viskosimeters für Ihr Protokoll an.

5 Auswertung

5.1 Aufstieg von Luftblasen

Für beide Temperaturen legen Sie jeweils eine Tabelle an, in die Sie für jede Blase i den gemessenen Durchmesser $2r_i$, die gemessene Geschwindigkeit $v_i = l_i/t_i$ und die daraus berechnete Viskosität η_i gemäß (9) eintragen. Aus den Viskositäten bestimmen Sie einmal für jede Temperatur den Mittelwert, die Standardabweichung und die Unsicherheit des Mittelwertes.

Bitte beantworten Sie auch die folgenden Fragen:

- Welche Messung trägt am stärksten zur Unsicherheit des Ergebnisses bei?
- Welche systematischen Fehler treten bei der Bestimmung auf?
- Ist die Strömung um die Luftblase wirklich laminar? Prüfen Sie dies mit Hilfe der Reynoldszahl.

Finden Sie die Herstellerangebe zur Viskosität des Spülmittels/Shampoos heraus (mit korrekter Quellenangabe!) oder notfalls die Viskosität der Hauptzutat. Diskutieren Sie Ihr Ergebnis, indem Sie es damit vergleichen.

Vergleichen Sie zum Schluss Ihre Messungen bei den unterschiedlichen Temperaturen. Entsprechen die Ergebnisse Ihren Erwartungen?

5.2 Kugelfallviskosimeter

Berechnen Sie den Mittelwert \bar{t} für die gemessenen Fallzeiten der Kugeln und schätzen Sie die Messunsicherheit $\Delta t = (t_{\max} - t_{\min})/2$ ab. Berechnen Sie die mittlere Fallgeschwindigkeit \bar{v} . Berechnen Sie schließlich die Viskosität η von Öl gemäß (7).

- Bestimmen Sie die Messunsicherheit $\Delta\eta$. Geben Sie dazu eine Formel für die relative Unsicherheit $\Delta\eta/\eta$ an.
- Prüfen Sie auch hier, ob die Strömung um die Kugel wirklich laminar ist.

Diskutieren Sie Ihr Ergebnis: Vergleichen Sie es mit der Herstellerangabe und dem Ergebnis aus Abschnitt 5.1.

6 Ausblick

Wenn es Ihnen Spaß gemacht hat, in die Details eines Experimentes tiefer einzutauchen und z. B. selbst physikalische Abhängigkeiten herauszuarbeiten oder einen eigenen Versuchsaufbau zu optimieren, dann möchten wir Ihnen empfehlen, sich die Aufgaben des „International Physicists’ Tournament“ bzw. aktuell aufgrund der COVID-19-Pandemie des „German Physicists’ Tournament“ (Additional Online-GPT December 2020) anzuschauen. Dort können viele faszinierende Phänomene untersucht werden, deren Abhängigkeiten von physikalischen Parametern weltweit noch kaum jemand oder evtl. niemand im Detail untersucht hat. Sie können damit richtige Wissenschaft betreiben an alltäglichen Phänomenen und im Rahmen des Wettbewerbs Ihre Lösung mit anderen Studierenden wissenschaftlich diskutieren. Es gibt 12 Themen (problems) zur Auswahl, von welchen jeder interessierte Teilnehmer sich ein Problem aussucht und dieses bis zum eigentlichen Wettbewerb bearbeitet. Der Wettbewerb bietet darüber hinaus gute Gelegenheiten, Kontakte mit Gleichgesinnten aus aller Welt aufzubauen und damit ein Netzwerk für den zukünftigen beruflichen Werdegang zu pflegen.

Weitere Informationen: <https://germany.iptnet.info>

Wir beraten Sie gerne, falls Sie Interesse an einer Teilnahme am Wettbewerb haben oder einfach nur mehr darüber erfahren möchten.

7 Anhang

Erdbeschleunigung g 9,81 m/s²

Dichte ρ

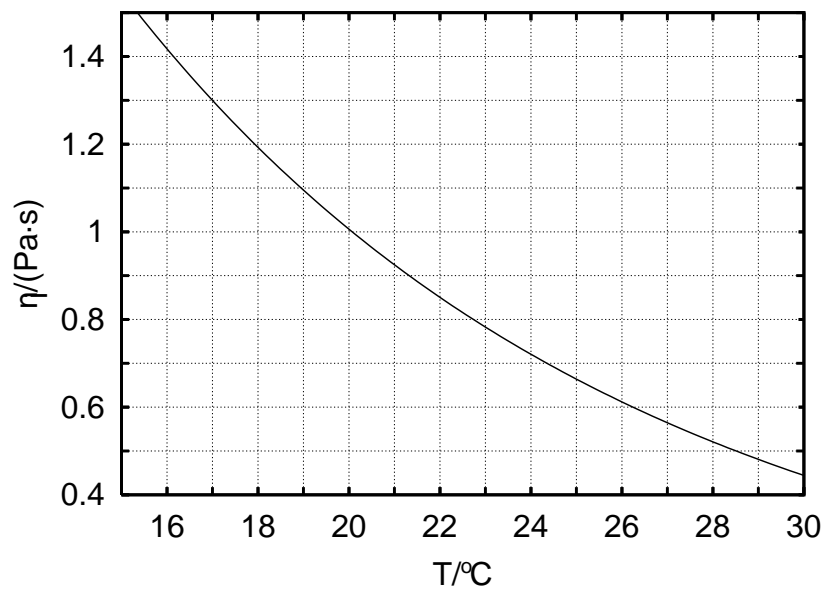
- Wasser 1,0 g/cm³
 - Glyzerin 1,3 g/cm³
 - Glas (Murmelt) ca. 2,5 g/cm³
 - Stahl 7,9 g/cm³

Viskosität η ($T \approx 20^\circ\text{C}$)

- Luft ca. 0,02 mPa · s
 - Ethanol 1,19 mPa · s
 - Blut ca. 4 mPa · s
 - Glyzerin 1,5 Pa · s

Tabelle 1: Viskosität von Wasser ($T = 15 \dots 32^\circ\text{C}$)

| $T/^\circ\text{C}$ | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 |
|------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $\eta/(\text{mPa} \cdot \text{s})$ | 1,139 | 1,109 | 1,081 | 1,053 | 1,027 | 1,002 |
| $T/^\circ\text{C}$ | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 |
| $\eta/(\text{mPa} \cdot \text{s})$ | 0,978 | 0,955 | 0,933 | 0,911 | 0,890 | 0,871 |
| $T/^\circ\text{C}$ | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 |
| $\eta/(\text{mPa} \cdot \text{s})$ | 0,851 | 0,833 | 0,815 | 0,798 | 0,781 | 0,765 |

**Abbildung 6:** Viskosität von Rizinusöl ($T = 15 \dots 30^\circ\text{C}$)