

2 Flüssigkeiten

Inhalt

2.1 Einleitung	28
2.2 Was ist vorher zu tun?	28
2.3 Physikalischer Hintergrund & Messverfahren	28
2.3.1 Dichte	28
2.3.2 Druck	29
2.3.3 Auftrieb	29
2.3.4 Kräfte zwischen Molekülen	31
2.3.5 Oberflächenspannung	31
2.3.6 Kapillarwirkung	32
2.3.7 Viskosität	33
2.3.8 Das Gesetz von Hagen-Poiseulle	35
2.3.9 Kräfte bei Rotationen	36
2.4 Rechenaufgaben	36
2.5 Kontrollfragen	37
2.6 Experimentelle Aufgaben	37
2.6.1 Oberflächenspannung	37
2.6.2 Dichtemessung über die Auftriebskraft	38
2.6.3 Viskosität von Glycerinmischungen	39
2.6.4 Temperaturabhängigkeit der Viskosität	40
2.6.5 Sedimentation im Dichtegradienten	41
2.6.6 Zentrifugalkraft	42
2.6.7 Minimalflächen	42
2.7 Wie geht es weiter?	42
2.8 Hinweise zur Auswertung	43
2.8.1 Oberflächenspannung	43
2.8.2 Dichtemessung über die Auftriebskraft	43
2.8.3 Viskosität von Glycerinmischungen	44
2.8.4 Temperaturabhängigkeit der Viskosität	44
2.8.5 Sedimentation im Dichtegradienten	44
2.8.6 Zentrifugalkraft	44

2.1 Einleitung

Dieser Versuchstag kombiniert vier klassische Versuche, die alle irgendwie mit Flüssigkeiten zu tun haben. Es werden zwei Verfahren zur Bestimmung der **Dichte** vorgestellt, außerdem werden Sie zwei weitere wichtige Eigenschaften von Flüssigkeiten untersuchen, die von Kräften zwischen den Molekülen der Flüssigkeit ausgehen: die **Oberflächenspannung** und die **Viskosität**.

2.2 Was ist vorher zu tun?

- Lesen Sie das **Skript** zu diesem Versuchstag, also die folgenden Seiten.
- Sorgen Sie dafür, dass Sie den **Theorieteil** verstanden haben! Falls Ihnen Grundlagen fehlen, ist es in Ihrer Verantwortung, diese aufzuarbeiten. Gute Lehrmaterialien zu diesen Themen findet man problemlos im Internet oder in der angegebenen Literatur (E.2).
- Drucken Sie die **Messwerttabellen** aus und vervollständigen Sie sie (im Team).
- Lösen Sie die **Rechenaufgaben** (im Team). Sie werden am Versuchstag kontrolliert.
- Schauen Sie sich die **Kontrollfragen** an! In der Vorbesprechung müssen Sie in der Lage sein, sie zu beantworten, sonst dürfen Sie nicht am Praktikum teilnehmen und müssen den Versuchstag nachholen.

2.3 Physikalischer Hintergrund & Messverfahren

2.3.1 Dichte

Die Dichte ρ eines Körpers ist das Verhältnis zwischen seiner Masse und seinem Volumen:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (2.1)$$

Die SI-Einheit der Dichte ist daher $[\rho] = \text{kg}/\text{m}^3$, gebräuchlich als Einheit ist aber z.B. auch g/cm^3 .

Wenn man Volumen und Masse eines Körpers einfach bestimmen kann, kann man also auch seine (mittlere) Dichte einfach ausrechnen. Schwieriger wird es bei unregelmäßig geformten oder sehr kleinen Körpern wie z.B. Hefezellen. Dafür gibt es verschiedene Methoden, zwei davon werden an diesem Versuchstag vorgestellt.

Dichte ist auch eine **Materialeigenschaft**. Wenn ein Körper ganz aus einem bestimmten Material (z.B. Stahl, Polyethylen, Wasser) besteht, hat er immer die Dichte dieses Materials, egal wie groß er ist. Ein Kurzer Korn hat die gleiche Dichte wie die ganze Flasche!¹ In Tabelle 2.1 sind einige Stoffe mit ihren Dichten aufgelistet, damit Sie ein Gefühl für die Größenordnungen bekommen.

Stoff	Dichte ρ [kg/m ³]
Fichtenholz	ca. 500
Eichenholz	ca. 800
Wasser (0 °C)	1.000
Beton	ca. 2.000
Aluminium	2.710
Blei	11.340

Tabelle 2.1: Ungefähre Dichten einiger Stoffe.

¹ Physikalische Größen, die sich so verhalten, nennt man übrigens intensiv. Mehr zu intensiven und extensiven Größen erfahren Sie am dritten Versuchstag.

ANWENDUNG

Luft- und Meeresströmungen werden maßgeblich von Dichteunterschieden angetrieben. Der **Golfstrom** z.B. transportiert warmes Wasser aus der Karibik in den Nordatlantik. Dabei bleibt das warme Wasser als stabile Schicht an der Oberfläche, weil es eine geringere Dichte hat als die tieferen Schichten. Diese Wasserschicht sinkt letztendlich erst kurz vor Europa ab, weil sie sich auf dem Weg abkühlt (und die Luft erwärmt, was unserem Klima zugutekommt). Schon eine kleine Störung in diesem System könnte bewirken, dass salzige Schmelzwasserströme (mit hoher Dichte) aus der Polarregion das Absinken des Golfstroms weiter in den Atlantik verlagern. Wasserschichten mit verschiedenen Salzgehalten (**Salinitäten**) sind so stabil, dass die Salinität fast wie ein Fingerabdruck fungieren kann. Weil das Mittelmeer wenige Zuflüsse und viel Sonneneinstrahlung hat, ist es salziger als der Atlantik. Das Wasser, das über die Straße von Gibraltar in den Atlantik fließt, kann noch hunderte Kilometer entfernt durch eine Salinitätsmessung in der Tiefe identifiziert werden.

2.3.2 Druck

Druck (p) ist Kraft (F) pro Fläche (A), daher ist die SI-Einheit des Drucks Newton pro Quadratmeter:

$$p = \frac{F}{A} \quad [p] = \frac{N}{m^2} = \frac{kg}{s^2 \cdot m} \quad (2.2)$$

In diesem Praktikum werden wir nicht dazu kommen, den Druck selbst zu messen, aber er ist wichtig für das Verständnis der *Auftriebskraft*.

2.3.3 Auftrieb

Wenn ein Körper unter Wasser ist, wirkt er leichter. Daher kann man andere Menschen in einem Nichtschwimmerbecken fast mühelos ein Stück anheben, bloß ganz aus dem Wasser herausheben kann man sie nicht. Körper mit einer geringeren Dichte als Wasser (weniger als 1000 kg/m^3 , das entspricht 1 kg/l) schwimmen sogar auf der Wasseroberfläche, ohne dass man sie hochheben muss. Dieser Effekt heißt Auftrieb und wird dadurch verursacht, dass der Körper in diesem Fall Wasser nach oben verdrängt, und zwar entsprechend seines Volumens. Das verdrängte Wasser wird an die Oberfläche verschoben und wirkt wie ein Gegengewicht – stellen Sie sich eine Wippe vor; auf der einen Seite Sie selbst, auf der anderen Seite eine 100%-Wasser-Version von Ihnen.

Abbildung 2.1 zeigt die Kräfte, die durch den Druck des Wassers auf einen (quaderförmigen) Körper wirken, wenn er eingetaucht ist. Der Wasserdruck hängt nur von der Tiefe ab, an der Oberseite des Körpers beträgt er z.B.:

$$p_1 = g \cdot \rho_{Fl} \cdot h_1$$

Dabei ist g die Fallbeschleunigung und ρ_{Fl} die Dichte der Flüssigkeit. Die Kräfte F_s wirken von allen Seiten und heben sich gegenseitig auf. Aber was ist mit F_1 und F_2 ? Die Unterseite des Körpers ist tiefer im Wasser, also wirkt auf sie ein größerer Druck. Da die Flächen A der Ober- und Unterseite

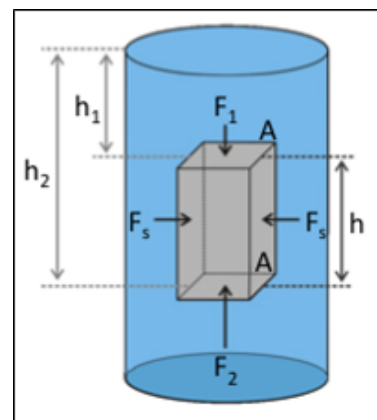


Abbildung 2.1: Auftriebskraft auf einen eingetauchten Körper.

gleich sind, ist F_2 also größer als F_1 und die Differenz beträgt:

$$\begin{aligned} F_2 - F_1 &= A \cdot p_2 - A \cdot p_1 \\ &= A \cdot g \cdot \rho_{Fl} \cdot h_2 - A \cdot g \cdot \rho_{Fl} \cdot h_1 \\ &= A \cdot g \cdot \rho_{Fl} \cdot (h_2 - h_1) \\ &= A \cdot g \cdot \rho_{Fl} \cdot h \end{aligned}$$

F_1 und F_2 haben entgegengesetzte Richtungen, daher ist diese Differenz die resultierende Kraft, die den Körper effektiv nach oben drückt. Das ist die Auftriebskraft F_A , und es ist gleichzeitig auch die Gewichtskraft des vom Körper verdrängten Wassers:

$$\begin{aligned} F_A &= F_2 - F_1 \\ &= A \cdot g \cdot \rho_{Fl} \cdot h \\ &= g \cdot \rho_{Fl} \cdot (h \cdot A) \\ &= g \cdot \rho_{Fl} \cdot V_{Körper} \end{aligned} \quad (2.3)$$

Die Auftriebskraft auf einen eingetauchten Körper hat also den gleichen Betrag wie die Gewichtskraft der von ihm verdrängten Flüssigkeit. Man kann auf ähnliche Weise zeigen, dass das nicht nur für Quader gilt, sondern für alle Körper.

ANWENDUNG

Fische haben **Schwimmblasen**, um ihr Volumen anzupassen. Da ihre Masse dabei gleich bleibt, können sie sich so aufblähen, dass ihre Dichte genau der Dichte des Wassers entspricht. Dann gleicht die Auftriebskraft genau die Gewichtskraft des Fisches aus, sodass der Fisch im Wasser »schwebt« und sich nicht ständig bewegen muss, um ein Absinken zu verhindern. Das spart viel Energie.

Allerdings muss der Fisch das Volumen der Schwimmblaste ständig nachregeln, indem er Gas (in die Blase) absondert oder auslässt, denn sonst würde sie sich beispielsweise beim Auftauchen durch den sinkenden Wasserdruck immer weiter ausdehnen.

Die Schwimmblaste sitzt übrigens bei den meisten Fischen etwas weiter oben im Körper – so ist der Schwerpunkt der Masse etwas tiefer als die »Mitte« des Volumens. Das stabilisiert den Fisch und hält seinen Körper aufrecht, in etwa wie bei einem Steh-auf-Männchen oder bei einem Segelschiff mit Kiel.

Heißluftballons und Zeppeline funktionieren ebenfalls durch Auftrieb. Wärmere Luft dehnt sich aus und nimmt bei gleicher Masse ein größeres Volumen ein, hat also eine geringere Dichte. Damit ein solches Luftfahrzeug schwebt, muss es insgesamt genau so viel wiegen wie die Luft, die es verdrängt – das gibt einem ein Gefühl dafür, wie schwer Luft eigentlich ist.

Segelflugzeuge profitieren von aufsteigenden Winden. Diesen Effekt nennt man auch (*dynamischen*) *Auftrieb*; das hat aber nichts mit Unterschieden in der Dichte zu tun. Auch die Luft, die wir alle verdrängen, sorgt natürlich für Auftrieb, aber dieser Effekt ist sehr, sehr klein.

2.3.4 Kräfte zwischen Molekülen

In Flüssigkeiten und Feststoffen muss es eine **Kraft** geben, die die Moleküle zusammenhält. Wenn es eine solche Kraft nicht gäbe, hätten die Moleküle schließlich keinen Grund, beieinander zu bleiben und würden frei durch den Raum schießen – das wäre dann keine Flüssigkeit und kein Festkörper mehr, sondern ein (ideales) **Gas**. Andererseits muss es auch eine **abstoßende Kraft** zwischen den Molekülen geben, denn sonst würden sich die Moleküle immer weiter zu einem Punkt zusammenziehen. Je nachdem, wie weit zwei Moleküle voneinander entfernt sind, spüren sie Abstoßung oder Anziehung.

In welchem **Aggregatzustand** ein Stoff letztendlich ist, hängt natürlich auch wesentlich von der **Temperatur** ab. Eine hohe Temperatur bedeutet eine hohe **Bewegungsenergie** aller Moleküle. Sind die Moleküle schnell genug und ist der typische Abstand zu anderen Molekülen groß genug, dann verlieren die zwischenmolekularen Kräfte an Bedeutung, der Stoff wird zum Gas. Ist die Bewegungsenergie aller Moleküle gering, reicht die Anziehungskraft aus, um die Moleküle fest aneinander zu binden: ein Festkörper.

An einer Flüssigkeit wie Wasser können wir zwei anziehende Kräfte unterscheiden: **Kohäsion** und **Adhäsion**. Auf Deutsch heißt das ungefähr: Zusammenhaften und Anhaften. **Kohäsion** ist (etwas vereinfacht) das Zusammenhaften von Molekülen einer Flüssigkeit aneinander, **Adhäsion** ist das Anhaften dieser Moleküle an einem Feststoff (siehe Abbildung 2.2b). Beide Effekte kennt man gut aus dem Alltag.

Tropfen bekommen ihre charakteristische Form durch das Zusammenspiel von Oberflächenspannung und Schwerkraft. Dass sie an Oberflächen anhaften, kennt man auch nur allzu gut. Ohne Schwerkraft sind Tropfen kugelförmig, siehe Abbildung 2.2a. Lotusblumen haben eine sehr fein (Nanometer!) strukturierte Oberfläche. Wassertropfen, die die Blüte treffen, berühren nur die hervortretenden Teile der Struktur und berühren daher effektiv eine kleinere Fläche. Sie sind sichtbar »runder« und perlen leichter ab (vgl. Abbildungen 2.2c und 2.3 rechts), was für eine Sumpfpflanze ein Selektionsvorteil ist. Es gibt auch technische Beschichtungen, die sich diesen Effekt zunutze machen.

2.3.5 Oberflächenspannung

Jedes Molekül im Inneren einer Flüssigkeit ist von allen Seiten von weiteren Molekülen umgeben. Die an einem Molekül innerhalb einer Flüssigkeit angreifenden Molekularkräfte heben sich bei gleichmäßiger Verteilung der Moleküle gegenseitig auf (siehe Abb. 2.4). An der Oberfläche der Flüssigkeit ergibt die Zusammensetzung dieser Kräfte jedoch eine resultierende Kraft, die auf der Oberfläche senkrecht steht und in das Innere der Flüssigkeit hinein gerichtet ist.

Um ein Molekül aus dem Inneren der Flüssigkeit an die Oberfläche zu bringen, muss demnach eine Arbeit gegen diese Kraft verrichtet werden. Moleküle an der Oberfläche besitzen daher eine größere potentielle Energie als die Moleküle im Inneren der Flüssigkeit. Diese Oberflächenenergie strebt zur Einstellung des Gleichgewichts einem Minimum zu. Wenn keine



(a) Der Astronaut Clayton C. Anderson an Bord der ISS. Die Kohäsionskräfte im Wasser zwingen es in die Form einer Kugel – dann ist die Oberfläche minimal. Warum sein Bild im Tropfen um 180 ° gedreht erscheint, wird am 5. Versuchstag erklärt.



(b) Ein Tropfen wird von Adhäsionskräften an einem Blatt gehalten.



(c) Entnetzender Tropfen auf einer Lotusblüte.

Abbildung 2.2: An Wassertropfen kann man verschiedene Effekte von intermolekularen Kräften entdecken.

äußeren Kräfte einwirken, nimmt die Oberfläche die Form an, bei der sie am kleinsten ist: eine Kugel.

Will man die Oberfläche hingegen vergrößern, muss man Energie aufwenden. Der Quotient Energie pro Fläche heißt spezifische Oberflächenenergie σ :

$$\sigma = \frac{\text{Energieaufwand } \Delta W}{\text{Oberflächenzuwachs } \Delta A} \quad [\sigma] = \frac{N}{m} \quad (2.4)$$

Eine denkbare (jedoch unpraktische) Möglichkeit zur Messung der spezifischen Oberflächenenergie zeigt Abbildung 2.5: Auf einem kleinen U-förmigen **Bügel** aus dünnem Draht ist ein an zwei Ösen geführter, in x -Richtung verschiebbarer Draht der Länge l angebracht.

Bringt man einen Tropfen einer Flüssigkeit in die schraffierte Masche, so bildet sich eine Lamelle aus. Mittels einer Kraft F lässt sich der Draht um die Strecke Δx verschieben, so dass die Lamelle auseinandergezogen wird.

Der hierdurch bewirkte Oberflächenzuwachs ΔA beträgt $2l \cdot \Delta x$ (Faktor 2, weil die zusätzliche Oberfläche auf beiden Seiten entsteht), die aufgewendete Energie ist $\Delta W = F \cdot \Delta x$. Damit erhält man:

$$\sigma = \frac{\Delta W}{\Delta A} = \frac{F \cdot \Delta x}{2l \cdot \Delta x} = \frac{F}{2l} \quad (2.5)$$

Das Verhältnis $F/2l = \sigma$ wird als **Oberflächenspannung** bezeichnet. Gleichung 2.5 zeigt, dass die spezifische Oberflächenenergie und die Oberflächenspannung identische Größen sind.

Soweit die Theorie – als störend erweist sich bei dieser Messmethode die unvermeidliche Reibung an den Ösen des beweglichen Drahtes. Man verwendet daher besser die sogenannte **Abreißmethode**. Dabei wird ein Ring (Durchmesser d) aus Edelstahlblech mit scharfer Schneide benutzt. Dieser wird ganz untergetaucht und dann mit einer definierten Kraft F aus dem Wasser herausgezogen. Der Ring zieht eine zylinderförmige Lamelle (Höhe Δh) aus dem Wasser, bis diese abreißt – in diesem Moment gilt analog zur Bügelmethode:

$$\sigma = \frac{\Delta W}{\Delta A} = \frac{F_{max} \cdot \Delta h_{max}}{2 \cdot (\pi d) \cdot \Delta h_{max}} = \frac{F_{max}}{2\pi d} \quad (2.6)$$

Der Faktor zwei im Nenner entsteht dadurch, dass die Lamelle zwei nahezu gleich große Oberflächen hat: innen und außen.

ANWENDUNG

Bienen sind mehr oder weniger rund, aber **Bienenwaben** sind sechseckig. Dahinter steckt die Oberflächenspannung des Waxes: Im Bienenstock herrschen wohlige 35 °C vor, was ausreicht, um das Wachs (zäh) fließen zu lassen. Es zieht sich zusammen und nimmt die Form mit der geringsten Oberfläche an – ein Sechseck.

2.3.6 Kapillarwirkung

Das Zusammenspiel von Adhäsion und Kohäsion kann bewirken, dass Flüssigkeiten an den Wänden von Gefäßen »hochklettern« oder »hinuntergedrückt werden«. Besonders deutlich ist dieser Effekt bei dünnen Röhren, sog. Kapillaren.

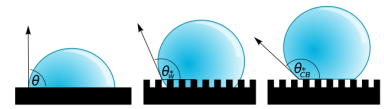


Abbildung 2.3: Kontaktwinkel auf glatten und strukturierten Oberflächen. Die rechte Grafik entspricht dem Lotus-Effekt.

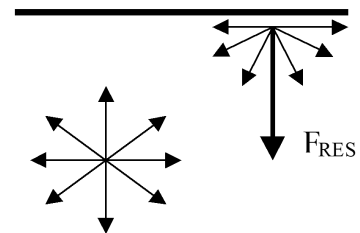


Abbildung 2.4: Resultierende Kraft auf ein Molekül, was sich im Inneren der Flüssigkeit (links) oder an der Oberfläche (rechts) befindet.

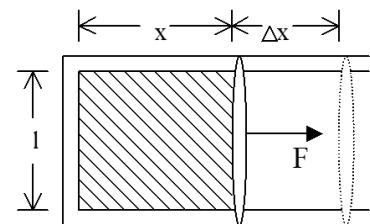


Abbildung 2.5: Messung der Oberflächenspannung mit einem Bügel.

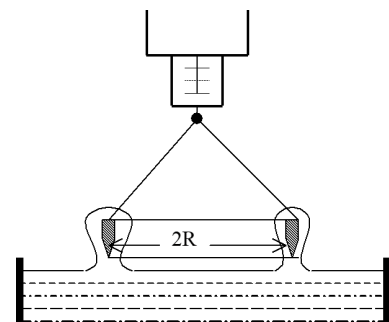


Abbildung 2.6: Messung der Oberflächenspannung mit der Abreißmethode.

Das Verhältnis von Adhäsions- zu Kohäsionskraft bestimmt, ob die Flüssigkeit auf- oder absteigt und wie die Oberfläche der Flüssigkeit aussieht (der sog. **Meniskus**): Sind die Adhäsionskräfte größer, wie z.B. zwischen Glas und Wasser, ist sie konkav (ein »Tal«). Man sagt, die Grenzfläche des Festkörpers wird benetzt (wie in Abb. 2.2b). Im umgekehrten Fall ist die Oberfläche konvex (ein »Hügel«) und die Grenzfläche wird nicht benetzt. Quecksilber ist ein Beispiel für eine Flüssigkeit, die an vielen Oberflächen so gut abperlt, dass der Meniskus nach oben gewölbt ist.

Wenn man eine Kapillare senkrecht in eine Flüssigkeit taucht, steigt die Flüssigkeit in der Kapillare bis zu einer Höhe h über den äußeren Spiegel an. Diese Steighöhe berechnet sich zu

$$h = \frac{2\sigma \cdot \cos\theta}{\rho g} \cdot \frac{1}{r} \quad (2.7)$$

Dabei ist σ die Oberflächenspannung, ρ die Dichte, g die Erdbeschleunigung, r der Kapillarradius und θ der *Kontaktwinkel* zwischen Meniskus und Kapillare. Die Steighöhe h ist demnach umgekehrt proportional zum Kapillarradius: Je dünner das Röhrchen ist, desto höher kann die Flüssigkeit in ihm steigen. Ein Kontaktwinkel $\theta > 90^\circ$ führt zu einer negativen Steighöhe wie z.B. bei Quecksilber (siehe Abb. 2.7).

2.3.7 Viskosität

Die Kräfte zwischen den Molekülen sorgen nicht nur dafür, dass eine Flüssigkeit »zusammen« bleibt, sie sorgen auch für Reibung. Wenn sich Flüssigkeitsschichten aneinander vorbei bewegen – man sagt, die Flüssigkeit wird **geschert** – dann stoßen sie auf Widerstand. Wenn dieser Widerstand groß ist, wie z.B. bei Honig, nennt man die Flüssigkeit zähflüssig.

Die **Viskosität** ist ein physikalisches Maß dafür, wie zähflüssig eine Flüssigkeit ist. Es gibt zwei Arten von Viskositäten: die **dynamische Viskosität** η und die **kinematische Viskosität** $\nu = \eta/\rho$. Kennt man die Dichte der Flüssigkeit, kann man aus einem der Werte ganz einfach den anderen berechnen, aber man muss wissen, welchen das Messgerät anzeigt. Die SI-Einheiten dieser Viskositäten sind:

$$[\eta] = \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}} = \frac{\text{N} \cdot \text{s}}{\text{m}^2} = \text{Pa} \cdot \text{s} \quad (2.8)$$

$$[\nu] = \frac{[\eta]}{[\rho]} = \frac{\text{m}^2}{\text{s}} \quad (2.9)$$

Weiterhin gibt es verwirrend **viele Möglichkeiten**, die Viskosität zu messen: mit Kapillaren, mit fallenden Kugeln, mit rotierenden, oszillierenden oder vibrierenden Messkörpern. Die Ergebnisse dieser Messungen sind meistens nicht ohne weiteres untereinander austauschbar, was jeden normalen Anwender zur Verzweiflung bringt. Wir beschäftigen uns hier nur mit einer Methode, die für die einfachsten Fälle ausreichend ist; wird es komplizierter, gibt es eine ganze Wissenschaft, mit der man sich auseinandersetzen muss: die **Rheologie**.

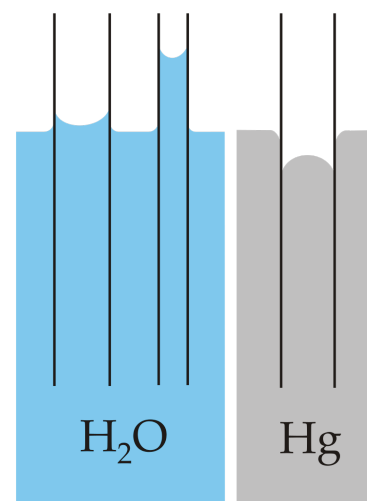


Abbildung 2.7: Kapillarwirkung für Wasser und Quecksilber.

ANWENDUNG

Die Viskosität der meisten Stoffe ist **nicht konstant**, sondern hängt mehr oder weniger stark von verschiedenen Faktoren ab. Die **Temperatur** ist immer ein großer Faktor, aber es gibt auch Stoffe, die bei **Beanspruchung** dick- oder dünnflüssiger werden. Es macht wenig Sinn, diese Flüssigkeiten mit einem Durchflussviskosimeter zu vermessen, weil diese keine Variation der *Scherrate* ermöglichen. Daher benutzt man in der Praxis andere Geräte, die z.B. mit rotierenden oder vibrierenden Messsonden arbeiten. **Hier einige Beispiele für »interessante« Stoffe:**

Synovia oder Gelenkflüssigkeit ist der Schmierstoff unserer Gelenke. Sie ist dank der enthaltenen Hyaluronsäure normalerweise eher hochviskos, wird bei Beanspruchung aber dünnflüssiger und behält diese Eigenschaft auch noch für eine Weile, ohne dass sie weiter geschert wird. Diesen Effekt nennt man **Thixotropie**, man kann ihn auch bei vielen anderen Flüssigkeiten beobachten. Man sollte sich daher vor dem Sport immer aufwärmen, um die Viskosität der Synovia zu verringern und somit eine gute Schmierung auf der ganzen Fläche des Gelenkes sicherzustellen, bevor die eigentliche Belastung stattfindet (sonst verschleißt der Meniskus viel schneller).

Plastische Stoffe sind bei geringer Beanspruchung zunächst fest, fangen bei einer bestimmten Schubspannung dann aber an zu fließen. Es gibt viele alltägliche Beispiele: Butter, Zahnpasta, Mayonnaise, Shampoo – alles Stoffe, die ohne Plastizität unpraktisch wären. Aber auch alle Metalle verhalten sich so, bloß erst bei größeren Schubspannungen. Eis wird unter hohem Druck, also z.B. am Grunde einer dicken Eisschicht, flüssig (aber nicht zu Wasser!) und kann dann als »schmierende« Schicht für riesige Massen dienen – ein Gletscher.

Stärkebrei ist ein Exot unter den Flüssigkeiten, denn er ist **scherverdickend**. Je stärker er beansprucht wird, desto mehr Widerstand leistet er! Das kann man mit einer Tasse Stärkebrei und einem Löffel sehr gut selbst erfahren; noch eindrucksvoller ist es, wenn man ein großes Becken voll Stärkebrei hat: Dann kann ein Mensch auf der Oberfläche laufen. Aber nur, wenn er schnell ist, sonst ist die Viskosität des Breis zu niedrig.

Glas kann auch fließen, heißt es in vielen alten Physikbüchern. Das stimmt auch, aber um die Effekte zu sehen müsste man einige Millionen Jahre warten oder das Glas auf etwa 400 °C erwärmen. Dass alte Kirchenfenster unten dicker sind als oben, hängt mit den damals üblichen Herstellungsverfahren zusammen.

Pech, ein Stoff, der dem Asphalt auf unseren Straßen nicht unähnlich ist, ist bei Raumtemperatur ebenfalls extrem zäh, aber er fließt merklich. Der endgültige Beweis gelang Thomas Parnell mit seinem »Pechtropfenexperiment«, das vom Komitee des Ig-Nobelpreises zum langweiligsten Experiment aller Zeiten gekürt wurde.

2.3.8 Das Gesetz von Hagen-Poiseulle

Wieviel Flüssigkeit (Viskosität η) fließt insgesamt durch ein Rohr (Radius r), wenn zwischen den Enden ein gegebener Druckunterschied Δp besteht? Das ist keine unbedeutende Frage, wenn man sich vergegenwärtigt, was beispielsweise zu klein ausgelegte Abwasserleitungen für unmittelbare Konsequenzen nach sich ziehen. Das Gesetz von Hagen-Poiseulle gibt eine präzise Antwort darauf – die wichtigste Information: **Es hängt sehr stark von der Größe des Rohres ab.**

Zunächst einige Begrifflichkeiten: **Eine laminare Strömung** (Schichtenströmung) liegt dann vor, wenn man den Flüssigkeitsstrom als ein Aneinandergleiten sehr dünner Flüssigkeitsschichten auffassen kann. Im Gegensatz dazu steht die sog. **turbulente Strömung**, bei der Flüssigkeitsschichten nicht parallel aneinander vorbeigleiten, sondern sich Wirbel bilden.

Beim laminaren Durchströmen eines Rohres bleibt längs der Rohrwand eine Flüssigkeitsschicht infolge der Reibungskraft (Adhäsion) in Ruhe ($v = 0$, siehe Abbildung 2.8). Die Geschwindigkeit nimmt **parabelförmig** zur Mitte der Kapillare hin zu und erreicht dort ihr Maximum. Man kann berechnen, dass das Volumen ΔV , das in der Zeit Δt laminar durch die Querschnittsfläche der Kapillare fließen kann, gegeben ist durch

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{\pi \Delta p}{8\eta l} r^4 \quad (2.10)$$

Das ist das Gesetz von Hagen-Poiseulle. Entscheidend ist der Faktor r^4 – er bedeutet, dass kleinste Änderungen im Radius große Änderungen im Volumenstrom $\dot{V} = \Delta V / \Delta t$ zur Folge haben. Eine Verdoppelung des Rohrdurchmessers bewirkt eine Vervielfachung des pro Zeit durchfließenden Volumens um den Faktor 16! Schon eine Verringerung des Durchmessers um 10 % hat eine Reduzierung des Volumenstroms auf 2/3 des ursprünglichen Wertes zur Folge.

ANWENDUNG

Das Gesetz von Hagen-Poiseulle lässt sich – mit vielen Einschränkungen – auch auf den **Blutkreislauf** des Menschen anwenden. Blut ist keine Newtonsche Flüssigkeit; d.h. seine Viskosität ist davon abhängig, wie stark es geschert wird. Aber auch hier gilt, dass der Volumenstrom sehr stark vom Durchmesser der Ader abhängt. Dadurch kann der Metabolismus die Durchblutung peripherer Körperteile auf einer großen Bandbreite regeln, was z.B. bei extremen Temperaturen wichtig ist.

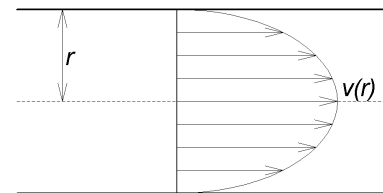


Abbildung 2.8: Geschwindigkeitsprofil einer laminaren Strömung in einem Rohr mit Radius r .

2.3.9 Kräfte bei Rotationen

Wir benutzen an diesem Versuchstag eine Zentrifuge, um hohe Beschleunigungen zu erzeugen. Dabei werden folgende Größen eine Rolle spielen (siehe Abb. 2.9): Die Drehfrequenz oder einfach **Drehzahl** f , gemessen in Hertz: $[f] = 1/\text{s} = \text{Hz}$. Die Kreisfrequenz ω . Das ist die Größe, die in den meisten Formeln auftaucht, weil Sinus- und Cosinus-Funktion eine Periode von 2π haben (dem *Vollwinkel*). Es gilt:

$$\omega = 2\pi \cdot f \quad [\omega] = \frac{1}{\text{s}} = \text{Hz} \quad (2.11)$$

Wenn ein System mit konstanter Drehfrequenz f rotiert, ist auch der Betrag der Bahngeschwindigkeit v konstant (die Richtung ändert sich aber ständig). Es gilt:

$$v = \frac{2\pi r}{T} = 2\pi f \cdot r = \omega \cdot r \quad (2.12)$$

Beim letzten Gleichheitszeichen haben wir benutzt, dass die Frequenz der Kehrwert der Periode ist: $f = 1/T$. Die Richtung der Geschwindigkeit ändert sich während der Umdrehung – es muss also eine Beschleunigung wirken. Diese ist immer senkrecht zur aktuellen Geschwindigkeit (*radial*) und hat den Betrag

$$a_r = r \cdot \omega^2 \quad (2.13)$$

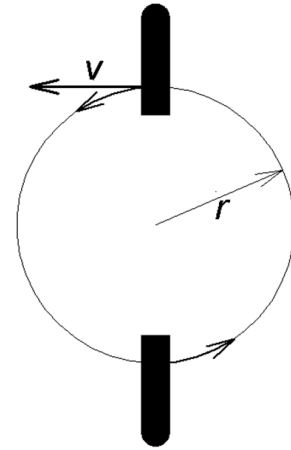


Abbildung 2.9: Zwei Reagenzgläser drehen sich im Kreis, Ansicht von oben.

ANWENDUNG

Bei der Sedimentation im Dichtegradienten sinken Hefezellen durch mehrere Schichten mit bekannter Dichte ρ_i . Sie sinken, weil die Schwerkraft auf sie wirkt – allerdings wirkt auch die Auftriebskraft, und zwar in die entgegengesetzte Richtung. Insgesamt wirkt eine resultierende Kraft von

$$F_{\text{res.}} = (\rho_{\text{Hefe}} - \rho_i) V_{\text{Hefe}} \cdot g \quad (2.14)$$

Je näher die Dichte des Mediums also der Dichte der Probe kommt, desto kleiner ist diese Kraft, und desto langsamer sinkt die Probe an ihr Ziel. Das kann lange dauern.

Um den Vorgang zu beschleunigen, wird der Dichtegradient zentrifugiert. Statt der Schwerkraft g wirkt nun die wesentlich höhere Radialbeschleunigung a_r in der Zentrifuge.

Man kann mit Zentrifugen auch ganz allgemein Bestandteile von Emulsionen voneinander trennen, sofern sie minimal unterschiedliche Dichten haben, was gerade auch für Biologen praktisch ist. Die wohl technisch anspruchsvollste Variante dieses Verfahrens ist die Trennung von Uranisotopen – das Gelingen eines solchen Vorhabens ist wichtigste Voraussetzung für die Herstellung von Atombomben.

2.4 Rechenaufgaben

Diese Aufgaben sollen Sie **vor dem Versuchstag** bearbeiten. Bringen Sie die Lösung mit und zeigen Sie sie Ihrem Tutor.

1. Beim Versuch »Dichtemessung über die Auftriebskraft« werden zwei »Massen« – eigentlich Gewichtskräfte (in Luft und in Wasser) F_L und

F_W gemessen. Weiterhin ist die Dichte des Wassers ρ_{Fl} gegeben. Wie errechnet sich aus diesen Werten die Dichte ρ der Probe? Gehen Sie dazu wie folgt vor: Es ist $F_L = F_G$ die Gewichtskraft der Probe, und $F_W = F_G - F_A$, wobei F_A die Auftriebskraft auf die Probe ist. Benutzen Sie Formel 2.3. Setzen Sie in dieser Formel für V die Definition der Dichte (Gleichung 2.1, umstellen!) ein. Das Endergebnis sollte lauten: $\rho = \rho_{\text{Fl}} \frac{F_L}{F_L - F_W}$

- Der erste Ballon, die sog. *Montgolfière* war im Prinzip eine Kugel mit $d = 12$ m Durchmesser. Die Temperatur in Heißluftballons beträgt beim Flug über 100°C , die Luft hat bei dieser Temperatur eine Dichte von ungefähr $\rho_{\text{Luft}}(110^\circ\text{C}) = 0,9 \text{ kg/m}^3$. Wie groß kann die Masse der Konstruktion aus (nicht gerade ultraleichtem) Leinenstoff höchstens gewesen sein? Die Dichte der umgebenden Luft könnte an einem sonnigen Tag ca. $\rho_{\text{Luft}}(20^\circ\text{C}) = 1,1 \text{ kg/m}^3$ gewesen sein.²
- Kann es sein, dass Bäume ihr Wasser mithilfe der Kapillarwirkung von der Wurzel in die Krone pumpen? Berechnen Sie den Radius einer Kapillare, in der Wasser 15 m hoch steigen kann. Literaturwerte für Wasser:

$$\sigma = 7,3 \cdot 10^{-2} \frac{\text{N}}{\text{m}} \quad \rho = 1000 \text{ kg/m}^3 \quad \theta \approx 20^\circ$$

Ist das ein realistischer Wert für eine Struktur aus Pflanzenzellen?

² Neben der Temperatur hat auch die Luftfeuchtigkeit einen großen Einfluss auf die Dichte. Diese Schätzung ist also gröber als grob.

2.5 Kontrollfragen

- Mit welcher Potenz hängt der Volumenstrom in einem Rohr vom Radius ab?
- Wie ist die Dichte definiert?
- Was ist die Bedingung dafür, dass ein Stoff auf Wasser schwimmt?
- Welche Massenanteile einer 98%igen Glycerin-Wasserlösung und destilliertem Wasser müssen Sie mischen, um eine 60%ige Mischung herzustellen? Verwenden Sie das Mischungskreuz aus Abbildung 2.10.
- Wieso kann ein Gletscher fließen?
- Wie lautet die Formel für die Fehlerfortpflanzung?

2.6 Experimentelle Aufgaben

2.6.1 Oberflächenspannung

In diesem Versuch bestimmen Sie mit Hilfe der »Abreißmethode« die **Oberflächenspannung** σ von destilliertem Wasser mit oder ohne Spülmittel. **Entscheiden Sie sich für eine der beiden Proben** und besorgen Sie sich die Messwerte für die andere Probe von einem anderen Team.

Geräte: Petrischale, Torsionswaage, höhenverstellbarer Tisch, Edelstahlring, destilliertes Wasser mit und ohne Spülmittel.

Gemessene Größen: Kraft beim Abreißen F (10 Wiederholungen ohne Variation).

Gegebene Größen: Ringdurchmesser d .

Durchführung:

- Stellen Sie zunächst sicher, dass die Waage tariert ist. Wenn der trockene Ring sich außerhalb des Wassers befindet und die Stellschraube in Nullstellung ist, sollte der Balken der Waage exakt zwischen den zwei schwarzen Strichen sein. Die Tara kann bei Bedarf über eine kleinere Stellschraube an der Rückseite nachgestellt werden.
- Heben Sie den Tisch an, bis der Ring vollständig in die Probe getaucht ist. Nun bewegen Sie den Tisch mit der Petrischale nach unten, während Sie gleichzeitig mit der Stellschraube die dabei entstehende Kraft ausgleichen. Der Balken muss dabei die ganze Zeit zwischen den zwei schwarzen Strichen sein. Bei einer bestimmten Kraft reißt der Film ab und der Ring löst sich von der Flüssigkeit. Notieren Sie diese Kraft. Wiederholen Sie diese Messung 10mal und bewegen Sie die Stellschrauben vor dem vermuteten Abreißen besonders vorsichtig, um nicht zu kleine Messwerte zu bekommen. Auch Erschütterungen können zum vorzeitigen Abreißen der Grenzschicht führen.
- Notieren Sie auch den **Durchmesser des Rings**, aber messen Sie ihn nicht selbst.

Achtung: Der Ring und die Probenflüssigkeit müssen absolut sauber bleiben! Berühren Sie sie auf keinen Fall mit der bloßen Hand und vermeiden Sie es, dicht über den Petrischalen auszumatmen.

2.6.2 Dichtemessung über die Auftriebskraft

Waagen messen eigentlich Kräfte, zeigen diese jedoch als Massen an. In diesem Versuch messen Sie die Gewichtskraft (angezeigt als Masse) eines Schneckengehäuses zweimal: normal und unter Wasser. Aus diesen zwei Werten kann man später auf die Dichte des Gehäuses schließen.

Geräte: Waage, Becherglas mit destilliertem Wasser, Probenkörper an Draht.

Gemessene Größen: Angezeigte Massen in Luft $m_L = F_L/g$ und in Wasser $m_W = F_W/g$, Raumtemperatur T_R .

Gegebene Größen: Masse des Drahtes m_D , Dichte von Wasser bei Raumtemperatur $\rho_{\text{H}_2\text{O}}(T_R)$ (siehe Anhang).

Durchführung:

- **Die Bedienung der Waage** wird vorher von der technischen Assistenz demonstriert.
- Messen Sie die Gewichtskraft des Gehäuses **in Luft**. Dabei muss das Teil **absolut trocken** sein, Papiertücher und ein Haartrockner liegen bereit um es ggf. zu trocknen.
- Stellen Sie nun den dafür vorgesehenen Tisch an der Waage nach oben, stellen Sie das **Becherglas** darauf und befestigen Sie das Gehäuse wieder an der Waage. Es muss **ganz von Wasser bedeckt** sein, außerdem sollten anhaftende **Luftblasen** nach Möglichkeit entfernt werden. Notieren Sie die angezeigte Masse.

Luftblasen im Schneckengehäuse können die Messung stark verfälschen! Schließen Sie diese Fehlerquelle aus, indem Sie das Gehäuse einige Male hin- und herschwenken.

2.6.3 Viskosität von Glycerinmischungen

Glycerin ist hochviskos, Wasser ist eher dünnflüssig. Mischt man beides, liegt die Viskosität dazwischen. Die Aufgabe für Ihr Team ist es, die kinematische Viskosität einer Glycerinlösung mit bekannter Konzentration zu bestimmen. Mit den anderen Teams zusammen ergibt das dann ein Diagramm, in dem die Viskosität in Abhängigkeit von der Konzentration aufgetragen wird.

Geräte: Zwei Ubbelohde-Viskosimeter (Abb. 2.11) mit versch. Messbereichen, Bechergläser, Stativmaterial, Stoppuhr, Messzylinder, Glycerin.

Gemessene Größen: Durchlaufzeit $t(c)$, Umgebungstemperatur T_R .

Eingestellte Größen: Konzentration der Glycerinlösung c .

Gegebene Größen: Viskosimeterkonstante k [mm^2/s^2] gemäß Aufdruck, fehlerfrei. **Denken Sie daran, die Werte zu notieren!**

Durchführung:

- Entscheiden Sie sich zunächst für eine Konzentration, die **zwischen 50 % und 85 %** liegt und in einem sinnvollen Abstand zu den Werten ist, die die anderen Teams bereits vermessen haben. Glycerinlösungen mit verschiedenen Konzentrationen sind bereits von der technischen Assistenz hergestellt worden, Sie müssen daher nicht selbst eine Mischung herstellen. Prinzipiell lassen sich die benötigten Massenanteile für verschiedene Konzentrationen beispielsweise mit dem **Mischungskreuz** (Abbildung 2.10) ausrechnen.

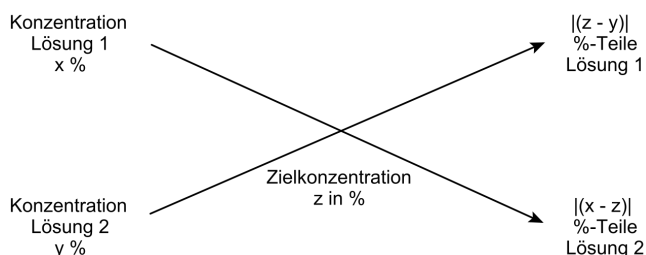


Abbildung 2.10: Das Mischungskreuz. Die Größen x , y und z sind gegeben, daraus ergeben sich die Massenanteile der Mischung.

- Es gibt **zwei Viskosimeter**. Welches Sie benutzen sollen, hängt von der Konzentration ab:
 - > 75 %: dickere Kapillare, grüne Kennfarbe am Gerät,
 - ≤ 75 %: dünnere Kapillare, gelbe Kennfarbe am Gerät.
- Betrachten Sie Abbildung 2.11 auf der nächsten Seite, um sich mit den Bestandteilen des Ubbelohde-Viskosimeters vertraut zu machen.
- Befüllen Sie das Viskosimeter mit Ihrer Glycerinlösung. Achten Sie auf die richtige Menge: Der Füllstand im Vorratsgefäß (4) sollte zwischen den beiden **Markierungen** liegen.
- Nehmen Sie – je nachdem, was die Technische Assistenz Ihnen zur Verfügung gestellt hat – einen kurzen Schlauch mit Glas-Mundstück **oder** einen Peleusball und stecken Sie es an das Ansaugrohr oben am

Achtung! Eines der Viskosimeter hat eine sehr dünne Kapillare, die Flüssigkeiten mit einer zu hohen Viskosität sehr nachhaltig verstopft werden kann. Die Reinigung übernehmen in so einem Fall natürlich Sie.

Viskosimeter (bei 1). Halten Sie einen Finger auf das dafür vorgesehene Rohr (2) und saugen Sie an dem Mundstück **oder** mit dem Peleusball, bis genug Flüssigkeit in die Messkugel (8) geflossen ist. Um den Rückfluss zu starten, entfernen Sie Ihren Finger und ggf. den Peleusball.

- Der andere Teampartner stoppt die Durchlaufzeit mit einer **Stoppuhr**. Start ist, wenn der Meniskus die Markierung oberhalb des oberen Reservoirs (M1) passiert, Stopp ist bei der unteren Markierung (M2).
- Notieren Sie auch die **Raumtemperatur**.
- Leeren Sie das Viskosimeter aus (am Stativ umdrehen) und **säubern** Sie es anschließend mit destilliertem Wasser, indem Sie es mehrmals ansaugen und durch die Kapillare strömen lassen. Anschließend lassen Sie das Viskosimeter einfach kopfüber in ein Becherglas austropfen und trocknen.
- Tragen Sie Ihren Wert in die **Tabelle** an der Tafel ein. Wenn alle Teams gemessen haben, übertragen Sie die gesamte Tabelle in Ihr Messprotokoll.

2.6.4 Temperaturabhängigkeit der Viskosität

Die Viskosität von praktisch allen Stoffen, insbesondere von Wasser, ist stark temperaturabhängig. Selbst sündhaft teure *Normöle*, die für die Kalibrierung von Viskosimetern ausgelegt sind, müssen aufwendig auf Bruchteile eines Grades temperiert werden, oder sie sind nutzlos.

Geräte: Ubbelohde-Viskosimeter in Tempermantel (befüllt mit Wasser), Thermostat, Thermoelement, Schläuche, Glasröhrchen, Schlauchmaterial, Stoppuhr.

Gemessene Größen: Durchlaufzeit $t(T)$.

Eingestellte Größen: Temperatur des Wasserbades für die jeweils nächste Messung T (4–5 Werte zwischen Raumtemperatur und 80 °C).

Gegebene Größen: Viskosimeterkonstante $k = (3,04 \pm 0,07) \cdot 10^{-3} \text{ mm}^2/\text{s}^2$.

Durchführung:

- Stellen Sie sicher, dass die **Temperatur** im Tempermantel schon **konstant** ist. Die Lampe an der Heizungssteuerung sollte gleichmäßig und kurz aufblincken.
- Betrachten Sie Abbildung 2.11, um sich mit den Bestandteilen des Ubbelohde-Viskosimeters vertraut zu machen.
- Nehmen Sie – je nachdem, was die Technische Assistenz Ihnen zur Verfügung gestellt hat – einen kurzen Schlauch mit Glas-Mundstück **oder** einen Peleusball und stecken Sie es an das Ansaugrohr oben am Viskosimeter (bei 1). Halten Sie einen Finger auf das dafür vorgesehene Rohr (2) und saugen Sie an dem Mundstück, bis genug Flüssigkeit in die Messkugel (8) geflossen ist. Um den Rückfluss zu starten, entfernen Sie Ihren Finger und ggf. den Peleusball.

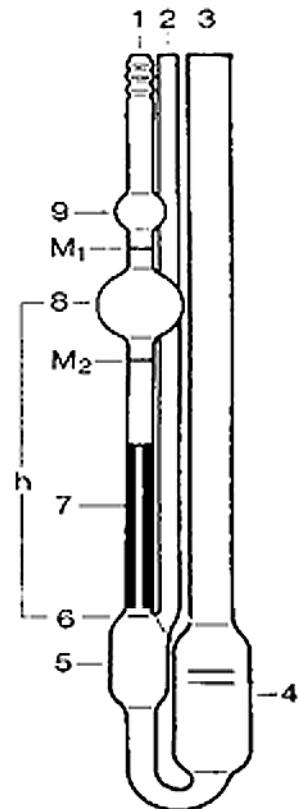


Abbildung 2.11: Schematische Darstellung eines Ubbelohde-Viskosimeters, wie es in den Versuchen 2.6.3 und 2.6.4 benutzt wird.

- (1) Ansaugrohr
- (2) Belüftungsrohr
- (3) Befüllrohr
- (4) Vorratsgefäß mit Füllmarken
- (5) Niveaugefäß
- (6) Austrittsöffnung
- (7) Kapillare
- (8) Messgefäß
- (9) Vorlaufkugel
- (M1, M2) Ringmessmarken

- Der andere Teampartner stoppt die Durchlaufzeit mit einer **Stoppuhr**. Start ist, wenn der Meniskus die Markierung oberhalb des oberen Reservoirs (M1) passiert, Stopp ist bei der unteren Markierung (M2).
- Lesen Sie die **Temperatur** (und die Ablesegenauigkeit) am Flüssigkeitsthermometer ab, nicht an der Heizungssteuerung.
- Stellen Sie die **Temperatur** für die nächste Gruppe ein.
- Tragen Sie Ihren Wert in die **Tabelle** an der Tafel ein. Wenn alle Teams gemessen haben, übertragen Sie die gesamte Tabelle in Ihr Messprotokoll.

2.6.5 Sedimentation im Dichtegradienten

Die Dichte von sehr kleinen, z.B. biologischen Proben kann mit der Methode der Dichtegradienten bestimmt werden. Sie beruht auf dem einfachen Prinzip, dass Stoffe mit höherer Dichte unter dem Einfluss der Schwerkraft nach unten sinken, bis sie auf eine Schicht mit noch höherer Dichte treffen. Um die Schwerebeschleunigung künstlich zu erhöhen, wird eine Zentrifuge benutzt.

Geräte: Pipetten, Glycerinlösung (verschiedene Konzentrationen), gradierete Reagenzgläser, Zentrifuge, Messschieber, Stroboskop, Trierwaage.

Durchführung 1 – Präparation des Dichtegradienten:

- Machen Sie sich am besten vorher mit der Funktion der **Pipettierhilfen** (»Gummibälle«) vertraut.
- Füllen Sie mit der Pipette **dünne Schichten**³ von Glycerinlösung aufeinander. Beginnen Sie mit reinem Glycerin; jede weitere Schicht hat eine etwas geringere Konzentration. Halten Sie das Reagenzglas schräg, setzen Sie die Pipette am Rand an. Lassen Sie nun sehr langsam die Lösung nach unten laufen.
- Die Lösung benetzt nun einen Teil der Innenwand des Reagenzglases. **Damit sich die Schichten nicht vermischen, muss die nächste Schicht an einer anderen Stelle herunterlaufen!** Drehen Sie das Reagenzglas also ein Stückchen.
- Erzeugen Sie auf diese Weise fünf Schichten.
- Zuletzt geben sie mit der dünnen Pipette etwas Hefe in das Reagenzglas.
- Vor dem Zentrifugieren muss der Rotor austariert werden. Dafür wird eine primitive, aber hochpräzise Balkenwaage benutzt. Die technische Assistenz sollte Ihnen hierbei assistieren.
- Zentrifugieren Sie Ihren Dichtegradienten mindestens 3 min lang. Die Hefe sollte sich (idealerweise) zwischen zwei Schichten abgelagert haben – zwischen welchen? Was bedeutet es, wenn Teile der Probe auf mehrere Schichten verteilt sind?

³ Die Höhe der Schichten hat keinen Einfluss auf das Ergebnis – sie sollte aber mindestens 5 mm betragen, damit die Sedimentation später gut zu sehen ist.



2.6.6 Zentrifugalkraft

In diesem Unterversuch soll die Drehzahl der Zentrifuge bei verschiedenen Schaltstufen mit Hilfe eines Stroboskops gemessen werden.⁴

⁴ Ein Stroboskop ist ein Blitzgerät mit einstellbarer Blitzfrequenz.

Eingestellte Größen: Vier Schaltstufen.

Gemessene Größen: Drehzahlen der Zentrifuge in den vier Schaltstufen f_i , Abstand des Bodens des Zentrifugenglases von der Drehachse r_u , Abstand des oberen Teils des Zentrifugenglases von der Drehachse r_o .

Durchführung:

- Benutzen Sie das Stroboskop, um über die Blitzfrequenz die Drehzahl der Zentrifuge zu bestimmen. Dies erfordert aber zunächst etwas Nachdenken!
- Der Rotor der Zentrifuge trägt eine **Markierung**. Je nachdem, in welchem Verhältnis Dreh- und Blitzfrequenz zueinander stehen, entsteht ein scheinbar stehendes Bild des Rotors mit einer, zwei oder vier Markierungen. Stellt man die Blitzfrequenz so ein, dass ein stehendes Bild mit einer Markierung zu sehen ist, so lässt sich allein aus dieser Einstellung noch keine Aussage über die Drehzahl gewinnen.

Beantworten Sie nun die folgenden Fragen für sich, und gehen Sie auch im Protokoll kurz darauf ein.

- Wie groß sind die **Drehzahlen** in den vier Schaltstufen?
- Erhält man die **wahre Drehzahl** des Rotors bei einer möglichst kleinen oder einer möglichst großen Frequenz des Stroboskops?
- Wie kann man überprüfen, ob man mit dem Stroboskop die richtige Umlauffrequenz f der Zentrifuge ermittelt hat und nicht etwa $f/2$ oder $f/3$?
- Messen Sie auch die **Radien** der Rotation: von der Welle zum Boden und zum oberen Teil des Zentrifugenglases.

2.6.7 Minimalflächen

Dieser Versuch muss weder dokumentiert noch ausgewertet werden.

- Tauchen Sie die Plexiglasvorrichtungen in das Seifenwasser. Wie ordnen sich die Seifenhäute an?
- Wiederholen Sie den Versuch ggf. ein paarmal, es können sich verschiedene Konstellationen ergeben.

2.7 Wie geht es weiter?

- Es gibt zu diesem Versuchstag wieder ein **Musterprotokoll** – allerdings ist es nur ein Gerüst, zu dem Sie den Inhalt größtenteils selbst beisteuern müssen. Laden Sie diese Datei runter und lesen Sie sich die Anweisungen durch.

- Lesen Sie den Abschnitt »Viel Protokoll mit wenig Stress«, falls Sie es noch nicht getan haben.
- Jetzt machen Sie sich zusammen an die **Auswertung** und schreiben Sie Ihr Protokoll!
- Das Musterprotokoll enthält auch eine **Checkliste zur Selbstkontrolle**. Gehen Sie diese Liste am Ende zusammen durch und unterschreiben Sie anschließend beide, dass das Protokoll den genannten Ansprüchen genügt.

2.8 Hinweise zur Auswertung

2.8.1 Oberflächenspannung

Die gemessenen Kräfte *erst* mitteln (und σ_n berechnen), *dann* mit diesem Wert die Oberflächenspannung berechnen.

Bei der Abreißmethode (siehe Abbildung 2.6) zieht der Ring **innen und außen** jeweils einen Wasserfilm um eine Strecke h nach oben, dessen Fläche einem Zylinder mit Durchmesser d entspricht. Es gilt Gleichung 2.6. Da an der Oberfläche des Rings durch Kapillarkräfte ein Volumen aus der Probe herausgezogen wird, muss die berechnete Oberflächenspannung mit einem Korrekturfaktor $f_{H_2O}(20^\circ C) = 0,91$ für Wasser und $f_{Spüli}(20^\circ C) = 0,85$ multipliziert werden, um die endgültige Oberflächenspannung zu erhalten.

Der Literaturwert für Wasser ist $\sigma_{H_2O}(20^\circ C) = 72,75 \text{ mN/m}$, das Spülmittel reduziert diesen Wert.

Passen Sie auf mit der **Notation**: σ ist doppelt belegt! Sie sind aber nicht sklavisch an die Konventionen dieses Skripts gebunden – falls Sie klare Verhältnisse brauchen, benutzen Sie andere Formelzeichen. Das muss aber für die Leserin Ihres Protokolls transparent sein.

2.8.2 Dichtemessung über die Auftriebskraft

Für die Dichte der Probe gilt die im Vorfeld hergeleitete Formel:

$$\rho = \rho_{Fl} \frac{F_L}{F_L - F_W} = \rho_{Fl} \frac{F_L/g}{F_L/g - F_W/g} \quad (2.15)$$

Die F_i/g sind die von der Waage als Massen angezeigten Messwerte. Der Draht, an dem die Schneckenhäuser befestigt sind, hat eine nicht zu vernachlässigende Masse von m_D , die bei den Messwerten zunächst kompensiert (d.h. abgezogen) werden muss.

Für die Berechnung von $\Delta\rho$ können ρ_{Fl} und g als fehlerfrei angenommen werden.

Die Schneckenschale hat drei Schichten. Die zwei inneren bestehen zum größten Teil aus *Aragonit*, einem Kalkmineral. Die äußerste Schicht, das *Periostracum*, besteht hingegen aus einem Protein, dem *Conchiolin*. Diese äußere Schutzschicht kann bei adulten Schnecken nicht mehr nachgebildet werden.

Aragonit hat eine Dichte von $\rho_{Ar} = (2,95 \pm 0,01) \text{ g/cm}^3$. Die Zusammensetzung des Conchiolin und somit auch seine Dichte können variieren: $\rho_{Co} = (1,35 \pm 0,15) \text{ g/cm}^3$ ist ein grober Richtwert für alle Proteine.

Schätzen Sie den Volumenanteil c des Conchiolin ab. Adulte Schnecken haben offenbar einen Wert um 10 % (das entspricht Dichten von ca. $2,75 \text{ g/cm}^3$), Jungtiere deutlich mehr. Stellen Sie dazu diese Formel nach c

um:

$$\rho = c \cdot \rho_{Co} + (1 - c) \cdot \rho_{Ar} \quad (2.16)$$

Machen Sie auch für dieses Ergebnis eine Fehlerfortpflanzung, um Δc zu berechnen. Da der Fehler in ρ_{Co} sehr groß ist, können alle anderen Fehlerinflüsse ignoriert werden. Diese Messmethode ist insgesamt sehr ungenau; die von Ihnen berechneten Fehlergrenzen werden das widerspiegeln. Beurteilen Sie den Erfolg oder Misserfolg der Messung kritisch!

2.8.3 Viskosität von Glycerinmischungen

Die Durchflussviskosimeter sind bereits kalibriert, daher beschränkt sich die Berechnung der Viskosität auf eine Multiplikation mit der »Viskosimeterkonstanten«:

$$\nu = k \cdot t(c) \quad (2.17)$$

Die kinematische Viskosität soll lediglich in einem Diagramm über der Konzentration aufgetragen werden. **Eine sinnvolle Fehlerrechnung ist nicht machbar**, weil der größte Beitrag zu $\Delta \nu$ nicht von der Zeitmessung, sondern von der Kalibrierung des Viskosimeters kommt und schwer abzuschätzen ist.

2.8.4 Temperaturabhängigkeit der Viskosität

Hier ist das gewünschte Ergebnis ein Temperatur-Viskosität-Diagramm. Zusätzlich sollen allerdings die Messpunkte mit Fehlerbalken versehen werden und ein Verlauf aus Literaturdaten zum Vergleich eingefügt werden. Wie das geht, ist im **Musterprotokoll** Schritt für Schritt beschrieben. Es ist wieder die kinematische Viskosität zu berechnen:

$$\nu(T) = k \cdot t(T) \quad (2.18)$$

Es folgen die besagten **Literaturdaten**. Die kinematische Viskosität von Wasser im Temperaturbereich von 20 °C und 90 °C lässt sich in guter Näherung beschreiben durch ein Polynom 4. Grades (T in °C):

$$\begin{aligned} \nu_{H_2O}(T) = & (1,781 - 5,562 \cdot 10^{-2} T + 1,007 \cdot 10^{-3} T^2 \\ & - 9,372 \cdot 10^{-6} T^3 + 3,385 \cdot 10^{-8} T^4) \text{ mm}^2/\text{s} \end{aligned} \quad (2.19)$$

2.8.5 Sedimentation im Dichtegradienten

Wenn ein Stoff sich zwischen zwei Schichten unterschiedlicher Dichte anlagert, folgt daraus etwas für seine eigene Dichte. Wie könnte man dieses Ergebnis angeben?

Berechnen Sie die Dichten der einzelnen Schichten unter der Annahme, dass die Volumenkontraktion bei der Mischung von Glycerin und Wasser vernachlässigbar klein ist.

2.8.6 Zentrifugalkraft

Erstellen Sie eine **Tabelle**, die für jede der vier Schaltstufen folgende Werte enthält: Die Drehzahl f in Hz, die Winkelgeschwindigkeit $\omega = 2\pi f$, die

Radialbeschleunigung am Boden a_u und im oberen Teil des Zentrifugenglases a_o , jeweils in m/s^2 und in Einheiten der Erdbeschleunigung g . Aus Rücksicht auf Ihre Wochenendpläne **entfällt die Fehlerrechnung** hierfür.

