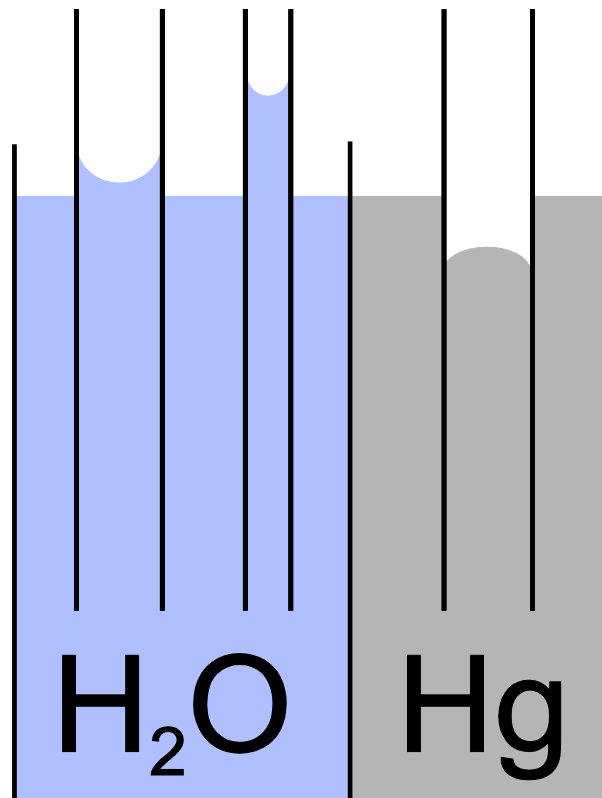


Physikalisches Grundpraktikum

Mechanik der Flüssigkeiten



WWW-Adresse Grundpraktikum Physik: <http://grundpraktikum.physik.uni-saarland.de/>

Kontaktadressen der Praktikumsleiter:

Dr. Manfred Deicher
Zimmer: 1.11, Gebäude E 2.6
e-mail: manfred.deicher@tech-phys.uni-sb.de
Telefon: 0681/302-58198

Dr. Patrick Huber
Zimmer: 3.23, Gebäude E2.6
e-mail: p.huber@physik.uni-saarland.de
Telefon: 0681/302-3944

Stoffgebiet: Molekularkräfte
Grenzschichten
Innere Reibung in Flüssigkeiten
Laminare und turbulente Strömung
Hagen-Poiseuillesches Gesetz
Spezifische Oberflächenenergie
Oberflächenspannung
Kapillarität

Fragen

1. Die Bezeichnung „Kohäsionskräfte“ gibt keinen Hinweis auf die Natur dieser Bindungskräfte. Geben Sie daher genauer an, welche Kräfte
 - (a) in Wasser,
 - (b) in einer Salzschnmelze und
 - (c) in einer Metallschnmelze wirken.
2. Zählen Sie die heute bekannten Aggregatzustände auf.
3.
 - (a) Skizzieren Sie das Stromlinienbild einer laminaren und einer turbulenten Strömung in einem Rohr.
 - (b) Um wieviel Prozent muß I) der Radius einer Kapillare bei gleichbleibendem Druck, oder II) der Druck bei gleichbleibendem Radius geändert werden, damit die Durchflußmenge pro Zeit verdoppelt wird?
4. Oberflächenspannungen von Flüssigkeiten lassen sich mit der Bügelmethode messen. Erklären Sie diese Methode.
5. Erklären Sie die Wirkung eines Waschmittels, die infolge der Änderung der Oberflächenspannung entsteht.
6. Wie hoch würde infolge der Kapillarität die Wassersäule in einer $10\ \mu\text{m}$ dicken Kapillare steigen, falls diese extrem sauber ist?
7. Für die Sedimentation von Blut (Blutsenkung) ist folgende Frage wichtig: Welche Kräfte wirken auf eine in einer Flüssigkeit fallende Kugel? Welche Bewegung führt die Kugel aus?
8. Erklären Sie, wieso man mit einem Aräometer (Senkspindel) z.B. die Konzentration von Batteriesäure, von Zucker in Wein oder von Fett in der Milch bestimmen kann.
9. Welche Kapillaritätswirkung beobachtet man, wenn man eine Glaskapillare in Quecksilber eintaucht? (Wieso?)
10. Wieso ist ein aus einer Pipette abfallender Wassertropfen größer als ein aus derselben Pipette abtropfender Alkoholtropfen?

Grundlagen

In der Literatur ist zu finden, daß das Röhrensystem der Adern im menschlichen Körper etwa 10^5 km lang sei. Dies entspricht etwa einem Viertel der Entfernung bis zum Mond. Durch dieses System zirkuliert das Blut und organisiert den Stoffwechsel. Das geschieht, trotz der relativ geringen Pumpleistung des Herzens, mit einer erstaunlichen Anpassung an die vom Körperzustand abhängigen Bedürfnisse. Zugrunde liegen diesem Kreislauf einfache physikalische Gesetze: die der laminaren Strömung von Flüssigkeiten und die der Kapillarwirkung dünner Röhren. Diese Gesetze sollen im vorliegenden Versuch untersucht werden. Wie stets in der Physik, reduzieren wir die Probleme auf einfache Versuchsanordnungen, um die Einflüsse verschiedener Parameter studieren zu können.

Teil I: VISKOSITÄT

Zur Untersuchung der Strömung lassen wir Wasser aus einem Vorratsgefäß V durch ein Kapillarrohr K ausfließen. Den Druck erzeugt hier nicht eine Pumpe, sondern, einfacher, das Gewicht des Wassers. Fließt Wasser in die Kapillare, so wirken - abgesehen vom Gewicht - zwei Kräfte: die **Kohäsionskräfte** zwischen Atomen oder Molekülen im Innern der Flüssigkeit und die **Adhäsionskräfte** zwischen Flüssigkeitsmolekülen und den Glaswänden. Beide beruhen im Grunde auf den atomaren Anziehungskräften, durch deren Wechselwirkung sich Atome oder Moleküle zu Flüssigkeiten oder festen Stoffen zusammenschließen. In der Flüssigkeit sind diese zwar nicht stark genug, die Teilchen - wie im Festkörper - an feste Plätze zu binden, dennoch können die Moleküle sich nicht unabhängig von ihrer Umgebung bewegen. Verschiebt man nämlich einzelne Moleküle, so versuchen die Nachbarmoleküle infolge der Kohäsionskräfte, diese Bewegung zu hindern: Es entsteht eine Reibung, die wir, da sie im Innern der Flüssigkeit auftritt, als „**innere Reibung**“ oder „**Viskosität**“ bezeichnen.

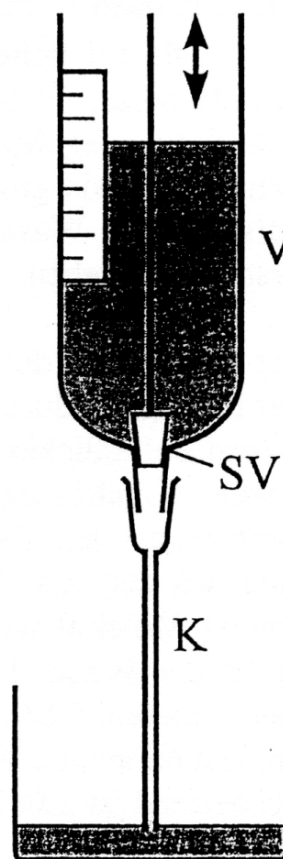


Abb.1

Schütten wir eine Flüssigkeit aus, so werden die Moleküle gegeneinander bewegt, und wir bemerken die Reibung an der Zähflüssigkeit. Strömt die Flüssigkeit derart aus, daß dabei Flüssigkeitsschichten parallel zueinander verschoben werden, so nennen wir diese Strömung „**laminar**“. Treten aber bei dem Ausströmvorgang Wirbel auf, so ist die Strömung „**turbulent**“. Die Erzeugung von Wirbeln benötigt Energie, die der Bewegungsenergie der Flüssigkeit entzogen wird: Wirbelbildung bewirkt also eine zusätzliche, unkontrollierbare Reibung, die die Flüssigkeit langsamer ausströmen läßt.

Wollen wir die durch Kohäsionskräfte verursachte innere Reibung untersuchen, so müssen wir uns daher auf laminare Strömungen beschränken. Auch im Blutkreislauf ist diese Strömung vorherrschend. Es ist bekannt, daß, falls die Blutströmung turbulent wird, Thrombosen entstehen können. Allgemein ist zu sagen, daß a) hohe Strömungsgeschwindigkeiten und b) Hindernisse wie Kanten, Ecken usw. das Entstehen turbulenter Strömungen begünstigen.

Die Viskosität hängt von der Art und Stärke der atomaren Wechselwirkungskräfte und daher vom Stoff ab. Die Materialkonstante, die sie quantitativ beschreibt, ist der **Koeffizient der inneren Reibung**, der meist mit η bezeichnet und in Einheiten Pascal·Sekunde (Pa·s) angegeben wird. (Veraltete Einheit: poise = dyn·s·cm⁻²)

Äußere Einflüsse können η stark verändern: z.B. ist Öl bei tiefen Temperaturen viel dickflüssiger, als bei hohen Temperaturen. Einige Beispiele: Bei 20°C hat Wasser etwa 0.01 poise, Öl hat etwa 2 poise. Die Viskosität des Blutes wird meist nicht absolut angegeben, sondern als Relativwert bezogen auf Wasser derselben Temperatur. Als groben Richtwert kann man sich merken, daß sie 4 mal größer als die des Wassers ist. Der genaue Wert kann Aufschluß über bestimmte Krankheiten geben.

In einem Rohr wirkt außer der inneren Reibung auch eine **äußere Reibung**: die Anziehung der Flüssigkeit durch die Rohrwand infolge der Adhäsionskräfte.

Ein an der Wand befindliches Molekül wird aus dem mit Flüssigkeit gefüllten Halbraum durch Kohäsionskräfte angezogen und von der Wand durch Adhäsionskräfte angezogen. Es entsteht also eine Konkurrenz zwischen den zur Flüssigkeit und den zur Wand gerichteten Kräften. Überwiegen erstere, so ist unser betrachtetes Molekül weiterhin in der Flüssigkeit beweglich. Im anderen Fall haftet es an der Wand. Letzteres trifft beim wassergefüllten Glas zu: Die Adhäsion einer sauberen, fettfreien Glasoberfläche ist so stark, daß diese sich mit einem dünnen, fest haftenden Wasserfilm überzieht. Man sagt, Wasser „**benetzt**“ Glas. (Nicht benetzend ist z.B. flüssiges Quecksilber.)

Nun können wir überlegen, wie Wasser (laminar) durch eine senkrecht stehende Glaskapillare fließt: Das Gewicht beschleunigt die Wassermoleküle; entgegen wirken am Rand die Adhäsionskräfte, wodurch an der Wand Wasserschichten haften. Benachbarte Wasserschichten können sich wegen der inneren Reibung nur langsam an ihnen vorbeibewegen, und je weiter eine Wasserschicht von der Wand entfernt ist, desto schneller fließt sie. Die größte Strömungsgeschwindigkeit wird in der Mitte des Kapillarquerschnitts erreicht. (Mathematisch beschreibt man diese Geschwindigkeitsverteilung durch die Gleichung einer Parabel.)

In der Praxis interessiert die Geschwindigkeit weniger, als z.B. die Menge einer Flüssigkeit, die bei vorgegebenen Werten des Druckes, der Dauer, der Kapillarlänge und der Dicke durch eine Kapillare fließt. Das Gesetz, das diesen Zusammenhang quantitativ beschreibt, nennt man das **Hagen-Poiseuillesche Gesetz**. Es lautet:

$$(1) \quad V = \frac{\pi R^4 p t}{8 \eta l}$$

Dabei bedeuten: V = Durchflußvolumen; R = Kapillarenradius; p = Druck;
 t = Durchflußzeit; l = Kapillarenlänge.

Voraussetzungen für die Gültigkeit sind: a) laminare Strömung und b) sehr geringe Strömungsgeschwindigkeit und c) eine fest haftende Flüssigkeitsschicht an der Kapillarenwand.

Anmerkung: Haftet eine Flüssigkeit nicht fest an der Wand, so kann man zur Beschreibung der Reibung zwischen äußerster Flüssigkeitsschicht und Rohrwand einen Koeffizienten der äußeren Reibung ξ einführen, und man erhält dann die Beziehung:

$$(1') \quad V = \frac{\pi p t \left(R^4 + 4 \frac{\eta}{\xi} R^3 \right)}{8 \eta l}$$

Bei Wasser im Glasgefäß ist $\xi \cong \infty$ und Glg.(1') geht in Glg. (1) über.

Das Hagen-Poiseuille'sche Gesetz werden wir in der 1. Aufgabe untersuchen. Es gilt im wesentlichen auch für die laminare Strömung des Kreislaufs. Wichtig ist besonders die Abhängigkeit mit R^4 , denn: benötigt der Körper eine schnellere Blutzirkulation so braucht nur der Durchmesser der Adern geringfügig erhöht zu werden. Umgekehrt kann z.B. bei Blutverlust durch Verengung der Adern in den Extremitäten dort die Zirkulation herabgesetzt werden.

Aber auch die Abhängigkeit von η ist entscheidend: Blut fließt umso schneller, je dünnflüssiger es ist (Arteriell und venöses Blut). Es sei nur darauf hingewiesen, daß der Blutkreislauf in einer Beziehung von Glg. (1) abweicht: der Druck variiert periodisch im Rhythmus des Pulsschlages, und wegen der Elastizität der Aderwände ändern sich dabei die Aderdurchmesser.

Teil II: Spezifische Oberflächenenergie

An der Oberfläche einer Flüssigkeit bewirken die atomaren Wechselwirkungskräfte eine weitere Erscheinung: die **Oberflächenspannung**. Die Oberflächenspannung einer freien Oberfläche wird in der 2. Aufgabe unseres Versuches untersucht werden. Ist eine Flüssigkeit nicht durch eine Wand, sondern durch eine freie Oberfläche begrenzt, dann wirken zwar die Kohäsionskräfte aus dem Innern der Flüssigkeit, aber es sind keine Adhäsionskräfte vorhanden, die diesen Kräften entgegenwirken. (Abb. 2).

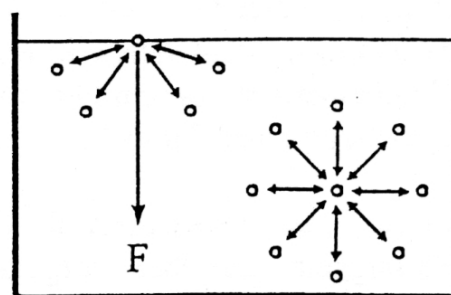


Abb.2

Auf jedes Oberflächenmolekül wirkt eine ins Innere gerichtete Kraft F , die aus der Summe aller atomaren Wechselwirkungskräfte resultiert. Jedes Oberflächenmolekül sollte daher ins Innere gezogen werden. Nun geht es aber nicht ganz ohne Oberfläche, und so nimmt die Flüssigkeit diejenige Form an, bei der die Oberfläche - bezogen auf das Volumen - unter den gegebenen Randbedingungen am kleinsten ist. Ein Beispiel: Ein Wassertropfen ist aus diesem Grunde meist kugelförmig.

Will man aber die Oberfläche vergrößern, so muß man Arbeit leisten, um die dazu nötige Zahl von Molekülen gegen die Kohäsionskräfte aus dem Innern an die Oberfläche zu bringen. Die Arbeit, die man verrichten muß, um eine Flächeneinheit (also 1 m^2 oder 1 cm^2) neuer Oberfläche zu schaffen, bezeichnet man als „**spezifische Oberflächenenergie**“. Sie ist eine Materialkonstante und wird meist mit ϵ gekennzeichnet und in Einheiten Joule/m^2 angegeben.

Zuweilen benutzt man auch eine andere Materialkonstante, die in enger Beziehung zu ϵ steht: die „**Oberflächenspannung**“ σ . Ihr liegt die Vorstellung zugrunde, längs der Oberfläche wirke eine Kraft, gegen die zur Oberflächenvergrößerung eine Arbeit zu leisten sei. Bezogen auf die Breite $l = 1\text{ m}$ (bzw. $l = 1\text{ cm}$) der Oberfläche nennt man diese Kraft die Oberflächenspannung und gibt sie in Einheiten Newton/m an. Im selben Maßsystem ist die Maßzahl von σ gleich der von ϵ . Dies ist plausibel, denn ϵ ist die Arbeit, die gegen σ geleistet wird, um die Oberfläche der Breite 1 m um die Flächeneinheit zu vergrößern.

Kehren wir nun zu unserer Glaskapillare zurück, und stellen sie in einen wassergefüllten Glasbecher. Wir wissen bereits, daß die ganze Innenwand der Kapillare benetzt wird, falls sie sauber, d.h. fettfrei ist. Das bedeutet aber, daß dabei die freie Wasseroberfläche stark vergrößert wird, und zwar um die ganze Innenfläche A der Kapillare.

Diese Situation ist energetisch ungünstig, da ja in dieser Oberfläche die Oberflächenenergie $E_0 = \epsilon \cdot A$ gespeichert ist. Die Kohäsionskräfte bewirken nun, daß ein Teil der freien Oberfläche verschwindet, indem der Wasserspiegel in der Kapillare angehoben wird. Diese Erscheinung nennt man „**Kapillarität**“. Die Oberflächenenergie der dadurch vernichteten freien Wasseroberfläche a : $E = \epsilon \cdot a$ wird also in potentielle Energie (Lageenergie) der in der Kapillare angehobenen Wassersäule umgewandelt. Damit ist bereits klar, wie hoch diese Säule angehoben werden kann. Die Änderung dE_{pot} ihrer potentiellen Energie bei Anhebung der Säule um dh darf höchstens gleich der bei Verkleinerung der Oberfläche freiwerdenden Oberflächenenergie dE_0 sein. Es gilt also im Gleichgewichtsfall (siehe Abb. 3):

$$\begin{aligned} dE_{pot} &= dE_0 \\ m \cdot g \cdot dh &= \epsilon \cdot da \\ \pi \cdot R^2 \cdot h \cdot \rho \cdot g \cdot dh &= \epsilon \cdot 2 \cdot \pi \cdot R \cdot dh \end{aligned} \quad (2)$$

Dabei bedeuten: R = Radius der Kapillare; g = Erdbeschleunigung; h = Steighöhe der Wassersäule; ρ = Dichte der Flüssigkeit.

Aus Glg. (2) können wir ausrechnen, daß die Steighöhe h sich ergibt zu:

$$(3) \quad h = \frac{2\epsilon}{R\rho g}$$

Man sieht, daß die Steighöhe proportional zur spezifischen Oberflächenenergie ist und umgekehrt proportional zum Kapillarenradius. Letzteres bedingt, daß nur in dünnen Kapillaren die Steighöhe merklich ist, nicht aber in normalen Röhren oder Gefäßen. Der Grund liegt darin, daß in der Kapillare die Oberfläche, bezogen auf das Volumen, sehr

Ein Beispiel: Für ein 1 cm dickes Glasrohr ist $h = 0.3$ cm. In einer 0.1 mm dicken Kapillare steigt Wasser dagegen etwa 30 cm hoch (falls die Kapillare extrem sauber ist!). Dies geschieht, - um das zu unterstreichen - ohne äußeren Druck. Auf diese Weise gelangt Blut auch in die feinsten Blutgefäße. Auf der Kapillarität beruhen z.B. auch die Wasserversorgung in Pflanzen und die Chromatographie genannte chemische Analysenmethode. Wie wir gesehen haben, ist dazu Voraussetzung, daß die Kapillare benetzt wird.

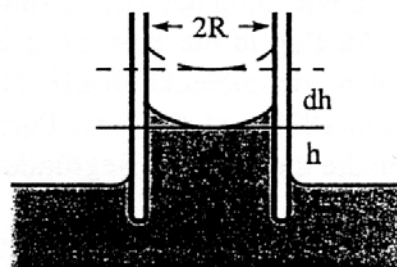


Abb.3

groß ist.

Mit Glg. (3) bietet sich ein einfaches Meßverfahren für ϵ an: Man muß nur eine Kapillare in ein wassergefülltes Gefäß stellen und die Steighöhe h der Wassersäule über der Wasseroberfläche im Gefäß messen. Die spezifische Oberflächenenergie folgt dann aus Glg. (3).

Aufgabe 1:

Das Hagen-Poiseuille'sche Gesetz ist experimentell nachzuprüfen. Bei unserem Versuchsaufbau ist es einfacher, die Durchflußzeit t als Funktion von V , l , R und p zu messen, als das Durchflußvolumen V in seiner Abhängigkeit von t , l , R und p . Daher formen wir Glg. (1) um, indem wir nach t auflösen:

$$(1'') \quad t = \frac{8V\eta l}{\pi R^4 p}$$

Diese Form des Hagen-Poiseuille'schen Gesetzes wird in Aufgabe 1 untersucht werden.

Hinweis:

Um den Zusammenhang der Glg. (1'') als Formel zu finden, gibt es zwei prinzipiell verschiedene Methoden. Die erste ist die **deduktive**:

Man versucht, die Beziehung aus allgemeinen physikalischen Grundgesetzen durch Rechnung herzuleiten. Die Gefahr dieser Methode ist, daß man einige der Grundgesetze nicht berücksichtigt, beispielsweise weil man sie noch nicht kennt, und daher zu einer Formel gelangt, die nicht mit dem experimentellen Befund übereinstimmt.

Die zweite Methode ist die **induktive**:

Man führt geeignete Experimente durch und versucht, die Gesetzmäßigkeit durch planvolle Variation der physikalischen Größen (Parameter) zu ermitteln. Die Übereinstimmung mit dem Experiment ist dabei gesichert, aber der Zusammenhang mit physikalischen Grundgesetzen muß erst nachträglich geklärt werden. Beide Methoden ergänzen sich, und erst das Zusammenspiel beider hat die Entwicklung der Physik (und der Naturwissenschaften allgemein) ermöglicht.

Ein Ausflug in die Historie zeigt, daß das Hagen-Poiseuille'sche Gesetz mit der 2. Me-

thode entdeckt wurde: Durch sorgfältige Experimente haben der Ingenieur Hagen 1839 und der Arzt Poiseuille 1840 das Gesetz hergeleitet. Später wurde dann die theoretische Begründung nachgeliefert.

Um sich mit dem Gesetz praktisch vertraut zu machen, soll in unserer Aufgabe der historische Weg wiederholt und durch Auswertung experimenteller Resultate die Gesetzmäßigkeit (im Rahmen der Meßgenauigkeit) hergeleitet werden.

Methoden:

Aus einem Zylinder lasse man Wasser durch eine senkrecht hängende Glaskapillare strömen und bestimme die Abhängigkeit der Durchflußzeit t von

- a) dem Kapillarenradius R
- b) der Kapillarenlänge l
- c) dem Durchflußvolumen V
- d) dem Druck p

Für die Messungen a) und b) werden Kapillarrohre verschiedenen Durchmessers bzw. verschiedener Länge verwendet. Sie werden ausgewechselt, indem man den Stopfverschluß SV (siehe Abb. 1) im Zylinder schließt, die eine Kapillare durch vorsichtiges (!) Drehen von Glasschliff ablöst und ebenso vorsichtig, aber dennoch fest, die nächste Kapillare leicht drehend auf den Schliff schiebt. Durch zwei Gummiringe wird sie zusätzlich gesichert. Dann öffnet man kurz den Verschlußstopfen, um Luftblasen über der Kapillare entweichen zu lassen und schließt ihn bis zum Versuchsbeginn wieder. Radius und Länge der Kapillaren sind angegeben. Die Meßzeit wird mit der Tischstoppuhr bestimmt. Das Durchflußvolumen wird an der Skala des Vorratszylinders abgelesen. Ein Skalenteil entspricht 1cm^3 .

Der Druck, unter dem das Wasser durch die Kapillare fließt, ergibt sich aus der Höhe der Wassersäule, gemessen zwischen den Wasserspiegeln des unteren Auffanggefäßes und des Vorratszylinders. Da sich die Höhe beim Auslaufen ändert, nimmt man den Mittelwert zwischen der Höhe H_1 vor Beginn und der Höhe H_2 nach Beendigung der Messung.

Um stets die gewünschte mittlere Höhe H_m einhalten zu können, empfiehlt sich folgendes Vorgehen: Soll das Durchflußvolumen z.B. 40cm^3 betragen, so füllt man mit der Spritzflasche den Vorratszylinder bis 20 Teilstriche ($= 20\text{cm}^3$) über die Höhe H_m . Nach der Messung steht der Wasserspiegel dann 20 Skalenteile unter H_m , so daß die mittlere Höhe gleich H_m ist. (Dabei ist es wichtig, daß zwischen Kapillare und Verschlußstopfen keine Luftblasen enthalten sind.)

- Gruppe A mißt 4 Kapillaren verschiedenen Durchmessers aus, wobei $V = 60\text{cm}^3$, und p sich aus $H_m = 100\text{cm}$ ergibt.
- Gruppe C mißt an 4 Kapillaren verschiedener Länge l , wobei ebenfalls $V = 60\text{cm}^3$ und $H_m = 100\text{cm}$.
- Gruppe D mißt bei $H_m = 100\text{cm}$ an 1 Kapillare die Zeiten, die die Volumina $V = 20, 40, 60, 80\text{cm}^3$ zum Durchlauf benötigen.
- Gruppe B mißt an 1 Kapillare die Durchflußzeiten t in Abhängigkeit vom Druck ($H_m = 80, 100, 120, 140\text{cm}$), wobei $V = 60\text{cm}^3$.

Auswertung:

Um die Abhängigkeit von einem Parameter zu bestimmen, darf nur dieser verändert werden, während **alle** übrigen konstant gehalten werden müssen.

Hat man z.B. die Durchflußzeiten bei 4 verschiedenen Kapillarenradien R gemessen, wobei stets l , p und V gleich waren, so kann man die Funktion $t = t(R)$ graphisch darstellen. Für unsere Zwecke besonders geeignet ist es, diese Funktion doppeltlogarithmisch aufzuzeichnen. Benutzen Sie dazu Ihren Taschenrechner. Wählen Sie den Maßstab der graphischen Darstellung möglichst groß (z.B. durch Unterdrücken des Nullpunktes). Stattdessen kann man auch direkt die Funktion $t = t(R)$ auf doppeltlogarithmisches Papier zeichnen.

Ein kurzer Exkurs in die Schulmathematik: Finden wir in unserer Darstellung z.B. eine Gerade, so ist diese formelmäßig zu beschreiben durch:

$$(4) \quad \log(t) = a_1 \log(R) + b_1$$

Steigung a_1 und Achsenabschnitt b_1 können wir der Zeichnung entnehmen. Glg. (4) können wir aber auch umschreiben:

$$(5) \quad \log(t) = \log(10^{b_1} R^{a_1}) \quad \text{und daraus folgt } t = 10^{b_1} R^{a_1}$$

Damit haben wir bereits den formelmäßigen Zusammenhang zwischen t und R aus dem Experiment gewonnen. In der Konstanten, die wir hier (willkürlich) als 10^{b_1} kennzeichnen, sind enthalten: l , p , V und η . Diese Konstante numerisch zu bestimmen, ist etwas umständlich, daher beschränken wir uns bei der graphischen Auswertung auf die Ermittlung der Konstanten a_1 .

Findet man durch graphische Darstellung der gemessenen Funktionen $t = t(l)$, $t = t(p)$ und $t = t(V)$ die entsprechenden Konstanten a_2 , a_3 und a_4 , so ergibt sich die allgemeine Gesetzmäßigkeit zu:

$$(6) \quad t(R, l, p, V) = Z \cdot R^{a_1} \cdot l^{a_2} \cdot p^{a_3} \cdot V^{a_4}$$

Dabei ist Z eine Konstante.

Für die Auswertung tauschen alle Gruppen ihre Meßergebnisse aus. Die Auswertung besteht darin, die Glg. (6) explizit anzugeben und sie mit der exakten Gleichung (1'') zu vergleichen.

Zuletzt ist noch die Viskosität η des Wassers zu ermitteln. Dazu setzen Sie die aus einer Ihrer Messungen gewonnenen bzw. bekannten Parameter R , l , V , p , t in Glg. (1'') und lösen diese nach η auf. Da η stark temperaturabhängig ist, geben Sie zusammen mit dem Wert von η auch die Raumtemperatur an.

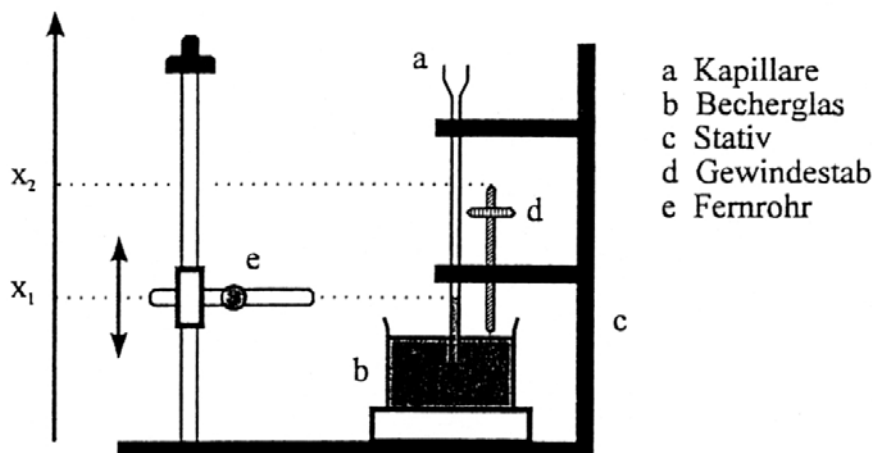


Abb.4

Aufgabe 2:

Aus der Kapillarität ist die spezifische Oberflächenenergie von Wasser experimentell zu bestimmen.

Methode:

Ein Kapillarrohr mit gegebenem Radius wird in einen mit Wasser gefüllten Glasbecher gestellt, der auf dem Grundbrett der Meßapparatur steht. Zur Halterung der Kapillare dient eine am Stativ angebrachte Vorrichtung. Die Höhe des Wasserspiegels in der Kapillare über dem im Glasbecher wird durch das Ablesefernrohr bestimmt. Dieses ist durch eine Drehspindel in der Höhe verstellbar; die Höhe kann auf 1/100 mm genau abgelesen werden. Man verschiebt das Fernrohr solange, bis der Wasserspiegel der Kapillare im Zentrum des Fadenkreuzes liegt, und notiert die Höhe x_1 . Als nächstes muß man den Wasserspiegel in dem Glasbecher messen. Dies ist wegen der Wölbung der Oberfläche an der Becherwand bei direkter Messung nur ungenau möglich. Daher wendet man eine indirekte Methode an: Über dem Becher ist am Stativ ein Gewindestab angebracht, der an beiden Enden zugespitzt ist. Seine Länge: $l = 100 \text{ mm}$. Dreht man diesen Stab nun soweit herunter, daß die untere Spitze gerade die Wasseroberfläche im Becher berührt, und mißt die Höhe x_2 des oberen Endes mit dem Fernrohr, so weiß man, daß die Oberfläche im Becher sich auf der Höhe $x_3 = x_2 - 100 \text{ mm}$ befindet. Die richtige Lage des Stabes kann man sehr genau einstellen, indem man die untere Spitze und ihr Spiegelbild im Wasser gleichzeitig beobachtet. Man stellt auf diejenige Höhe ein, bei der der Abstand zwischen Spitze und Spiegelbild Null ist. Die Steighöhe h bestimmt sich dann zu:

$$h = x_1 - x_2 + 100 \text{ mm}$$

Glg.(3) liefert daraus den Zahlenwert der spezifischen Oberflächenenergie ϵ . Man führe die Messung fünfmal durch, bilde den Mittelwert von ϵ und gebe die Standardabweichung von ϵ an.