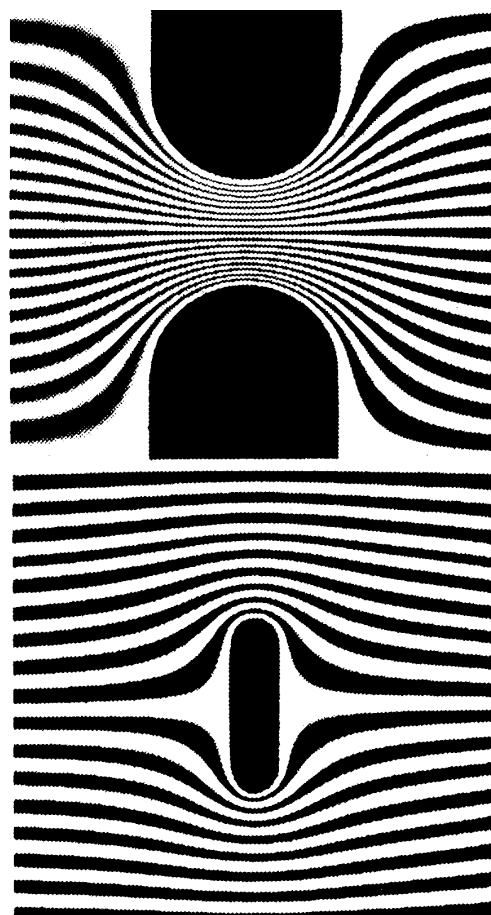


VISKOSITÄT



VISKOSITÄT

Das Herz hält die Blutströmung aufrecht, es leistet dabei Reibungsarbeit und überwindet den Widerstand, den der Kreislauf (Gefäßsystem und zähes Blut) erfährt. Der Strömungswiderstand hängt ab vom Koeffizienten der inneren Reibung des Blutes, auch Zähigkeit oder Viskosität genannt, und der Blutgefäßgeometrie.

Einige diagnostische Tests (Blutsenkung, Zähigkeitsbestimmung des Blutes, Plasmas, Serums usw.) beruhen auf Prinzipien, die Sie bei diesem Versuch kennenlernen.

Exakte Zähigkeitsmessungen sind aufwendig; ein Präzisionsviskosimeter soll Ihnen davon einen Eindruck vermitteln.

Außerdem haben wir ein einfaches Viskosimeter, wie es in der Praxis sinnvollerweise nicht verwendet wird, aufgebaut, das hauptsächlich aus medizinischen Einmalgeräten wie Spritze, Injektionskanüle, Infusionsschlauch und Infusionspumpe besteht. Mit diesem Viskosimeter können auch die KIRCHHOFF-schen Gesetze im Flüssigkeitsstrom, die für das Verständnis des Kreislaufs förderlich sind, nachgeprüft werden.

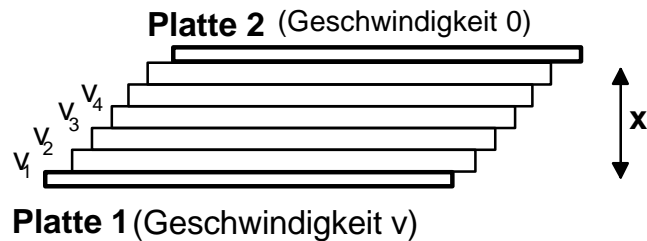
1 Grundlagen

1.1 Definition Viskosität

Gedankenversuch:

Zwischen zwei parallelen, gleich großen Platten im Abstand x befindet sich eine Flüssigkeit.

Abb.1: Flüssigkeitsschichten



Man denkt sich den Raum zwischen den Platten in Flüssigkeitsschichten zerlegt und bewegt die Platte (1) mit einer konstanten Geschwindigkeit v . Setzt man ferner voraus, daß die Flüssigkeit an den Platten haftet, so heißt das, daß die direkt an der ruhenden Platte (2) befindliche Flüssigkeitsschicht auch ruht und die an der bewegten Platte (1) haftende Schicht die Geschwindigkeit v hat. Die dazwischen befindlichen Flüssigkeitsschichten müssen dann mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten aneinander vorbeigleiten.

Die Geschwindigkeit nimmt von der ruhenden zur bewegten Platte zu, im einfachsten - oben gezeichneten - Fall linear.

Die unterste, an der bewegten Platte haftende Schicht übt eine Tangentialkraft auf die über ihr liegende aus, die sich als Folge davon mit einer Geschwindigkeit v_1 fortbewegt. Diese Flüssigkeitsschicht wirkt wiederum auf die über ihr liegende und führt zur Geschwindigkeit v_2 . So beschleunigt jede Schicht die folgende und wird von dieser - nach dem Reaktionsprinzip - gebremst.

Es zeigt sich im Experiment, daß die Kraft F , die nötig ist, um die Platte zu bewegen, proportional ihrer Fläche A und ihrer Geschwindigkeit v und umgekehrt proportional dem Abstand x der Platten ist:

$$F \sim A \quad \text{und} \quad F \sim v \quad \text{und} \quad F \sim 1/x$$

Daraus folgt:

$$F \sim A \cdot v/x$$

bzw. als Gleichung geschrieben:

$$F = \eta \frac{A \cdot v}{x}$$

Die auftretende Proportionalitätskonstante η heißt dynamische Viskosität, meist einfach Viskosität genannt.

Der Quotient F/A heißt Schubspannung und wird meistens mit τ abgekürzt:

$$\tau = F/A = \eta \cdot v/x$$

VIS

Falls η unabhängig von v ist, so sprechen wir von einer NEWTON'schen Flüssigkeit; wir erhalten bei diesen das oben abgebildete, lineare Geschwindigkeitsprofil. NEWTON'sche Flüssigkeiten sind die meisten reinen Flüssigkeiten, z.B. Wasser. Erweist sich η als nicht-konstante Funktion von v , dann heißt die Flüssigkeit nicht-NEWTON'sch; naheliegendes Beispiel hierfür ist Blut.

Von der physikalischen Theorie lassen sich die NEWTON'schen Flüssigkeiten leichter behandeln, aber weiter verbreitet sind die nicht-NEWTON'schen. Margarine gehört zur Gruppe der thixotropen Flüssigkeiten; das bedeutet, ihre Viskosität nimmt unter dem Einfluß der Schubkraft ab; hört die Kraft auf, so braucht die Viskosität einige Zeit, um ihren alten Wert wieder zu erreichen. Deshalb ist Margarine immer streichfähig. Thixotrop sind z.B. noch Ketch-up, Rasiercreme und einige Malerfarben. Bei diesen ist es wichtig, daß sie leicht zu verteilen sind, dünnflüssig bleiben, um Unebenheiten auszugleichen, und dann zäh werden. Nicht-NEWTON'sch und auch nicht thixotrop sind Honig, Kondensmilch, Druckerschwärze, Kugelschreibertinte und Motoröl.

Die Viskosität ist eine Eigenschaft, die auf die innere Reibung der Flüssigkeit zurückzuführen ist. Die Einheit der Viskosität ist die Pascal-Sekunde (Zeichen: Pas).

$$\text{Einheit } \eta = \text{Pas} = \text{Nsm}^{-2} = \text{kg/ms}$$

In Tabellenwerken findet man häufig die - alte - Angabe in Poise (Zeichen: P).

$$1 \text{ P} = 0,1 \text{ Pas} \quad \text{bzw.} \quad 1 \text{ cP} = 1 \text{ mPas} \quad (1 \text{ Zentipoise} = 1 \text{ Millipascal-Sekunde})$$

Tabelle 1:	Diäthyläther	0,240
Viskositäten von Flüssigkeiten	Wasser	1,002
für 20°C und Normaldruck	Serum	1,56
(Angaben in mPas)	Plasma	1,73
	Motorenöl	100 - 600
	Glyzerin (rein)	1480 (mit Wasser gemischt Faktor 10 und mehr kleiner!)

Die Viskosität von Blut beträgt ca. 4,5mPas; dies ist aber nur ein ungefährender Wert, da die Viskosität einer nicht-NEWTON'schen Flüssigkeit schubkraftabhängig ist. Außerdem bestehen Abhängigkeiten von der Zellzahl im Blut, sowie vom Alter und vom Geschlecht (siehe Tabelle 2). Die Viskosität ist bei Männern größer als bei Frauen; bei Neugeborenen kann sie über 6mPas betragen, sie nimmt aber dann rasch ab; ein kaltes Bad oder heiße Luft sowie Sättigkeit im Vergleich zu Hunger erhöhen sie. In der Diagnostik können Viskositätsmessungen wegen der Einwirkungen von Krankheiten auf die Viskosität und der daraus möglichen Rückschlüsse auf das Krankheitsbild hilfreich sein.

Tabelle 2: Viskosität von Blut in Abhängigkeit von Alter und Geschlecht (bei 37°C)	Alter in Jahren	Viskosität in mPas	
		Männer	Frauen
	0 - 10	3,9	3,8
	10 - 20	4,4	4,2
	20 - 35	4,7	4,2
	35 - 50	4,7	4,4
	50 - 80	4,7	4,5
	Mittel	4,7	4,4

Analog zur obigen Herleitung und Definition der Viskosität von Flüssigkeiten läßt sich die Viskosität von Gasen erklären.

Tabelle 3: Viskosität (in mPas) von Gasen bei 20°C und Normaldruck		
	Luft	0,0182
	Wasserstoff	0,0088

Zu beachten ist, daß die Viskosität einer Flüssigkeit bei Temperaturerhöhung zumeist sinkt, die von Gasen steigt.

Die Angabe eines Viskositätswertes ohne Temperatur ist wenig aussagekräftig und sollte deshalb in ihrer Auswertung nicht vorkommen!



Der Quotient von dynamischer Zähigkeit η und Dichte ρ heißt kinematische Zähigkeit ν := η/ρ ; ν soll hier den griechischen Buchstaben ν bedeuten. ν hat die Einheit Quadratmeter pro Sekunde (m^2/s), die ältere Einheit ist Stokes (Zeichen St) und es gilt: $1 \text{ St} = 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$.

1.2 Laminare, turbulente Strömung

Gleiten die Schichten einer Flüssigkeitsströmung aneinander vorbei, ohne sich gegenseitig zu stören, d.h. ohne Wirbel zu verursachen, spricht man von einer Schicht- oder Laminarströmung.

Abb.2 zeigt Beispiele von laminaren Flüssigkeitsströmungen zwischen zwei vertikal stehenden Glasplatten und an anderen Hindernissen. Die Stromlinien entstehen durch gefärbtes und ungefärbtes Wasser, das durch nebeneinanderliegende Düsen von oben herabströmt.

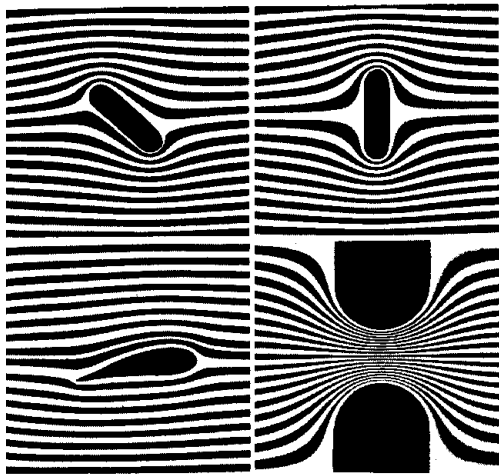


Abb.2: Laminare Strömung

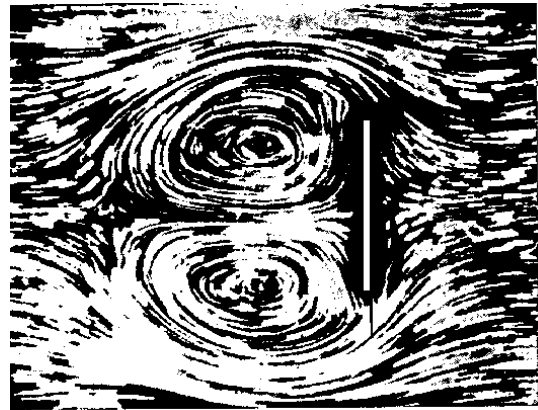


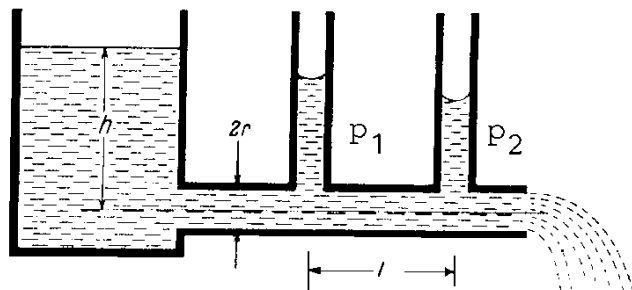
Abb.3: Turbulente Strömung

An Kanten nicht stromlinienförmiger Körper, oder wenn die Strömungsgeschwindigkeit zu groß wird, reißen die Stromlinien ab, es entstehen Wirbel. Man spricht von turbulenter Strömung, ihr Strömungswiderstand ist viel größer, als der einer laminaren Strömung.

1.3 Das HAGEN-POISEUILLE'sche Gesetz

Beim Ausströmen einer Flüssigkeit aus einem Gefäß durch ein Rohr stellt sich folgende Druckverteilung ein:

Abb.4: Druckverteilung beim Ausströmen durch ein Rohr.



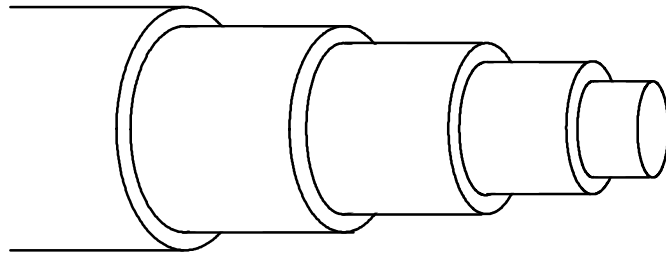
Der deutsche Ingenieur Hagen (1839) und der französische Arzt Poiseuille (1840 in einer Untersuchung über den Blutkreislauf) stellten unabhängig voneinander das nach ihnen benannte Gesetz auf.

Die Stromstärke i (pro Zeiteinheit ausfließendes Volumen) ist umgekehrt proportional zur Zähigkeit η und zur Länge des Rohres l , direkt proportional zur Druckdifferenz $\Delta p = p_1 - p_2$ und zur 4. Potenz des Rohrradius r :

$$i = \frac{V}{t} = \frac{\pi \cdot r^4 \cdot \Delta p}{8 \cdot \eta \cdot l}$$

Man kann sich die Flüssigkeitsschichten bei der Strömung durch ein Rohr als ineinander liegende Zylinder vorstellen, deren innerster die höchste Geschwindigkeit hat.

Abb. 5: Flüssigkeitsschichten in einem Rohr



Läßt man angefärbtes Wasser hinter klarem Wasser mit anfangs ebener Grenzschicht durch ein Rohr fließen, so hat man zunächst eine Strömung wie links in Abb.6. Nach einiger Zeit stellt sich die Strömung so ein, wie rechts in Abbildung wiedergegeben.

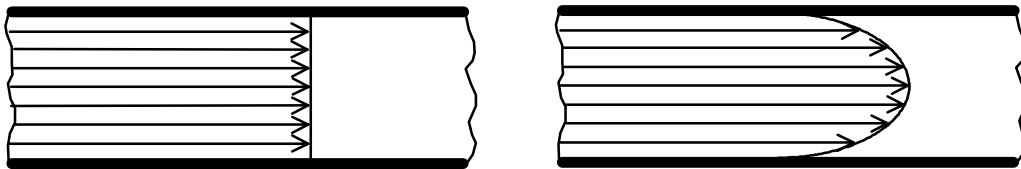


Abb.6: Geschwindigkeitsprofile im Rohr

Das Geschwindigkeitsprofil ergibt sich parabelförmig (proportional zu $(R^2 - r^2)$); die Teilchengeschwindigkeit ist in der Mitte des Rohres am größten. Die Stromstärke i ist gleich der mittleren Strömungsgeschwindigkeit v_{mittel} mal Querschnittsfläche A .

$$i = V/t = A \cdot v_{\text{mittel}}$$

A und v_{mittel} sind jeweils proportional zum Quadrat des Radius, i ist deshalb proportional zu r^4 .

Das HAGEN-POISEUILLE'sche Gesetz gilt nur unter folgenden idealisierten Bedingungen (sonst eben nur näherungsweise):

1. Es treten nur Reibungskräfte auf, keine Trägheitskräfte, das bedeutet, die Flüssigkeitsteilchen werden während der Bewegung im Rohr nicht mehr beschleunigt, die gesamte aufgebrachte Arbeit ist Reibungsarbeit. Man spricht auch von stationärer Strömung, d.h. eine zeitlich sich nicht ändernde Strömung.
2. $v = 0$ an der Rohrwand. Es wird nur die innere Reibung der Flüssigkeit berücksichtigt. Nicht berücksichtigt wird, daß die Flüssigkeit nicht an der Rohrwand haftet.
3. $\eta = \text{const}$; es handelt sich um eine NEWTON'sche Flüssigkeit, das Stromstärke-Druckdifferenz-Diagramm zeigt eine Gerade.

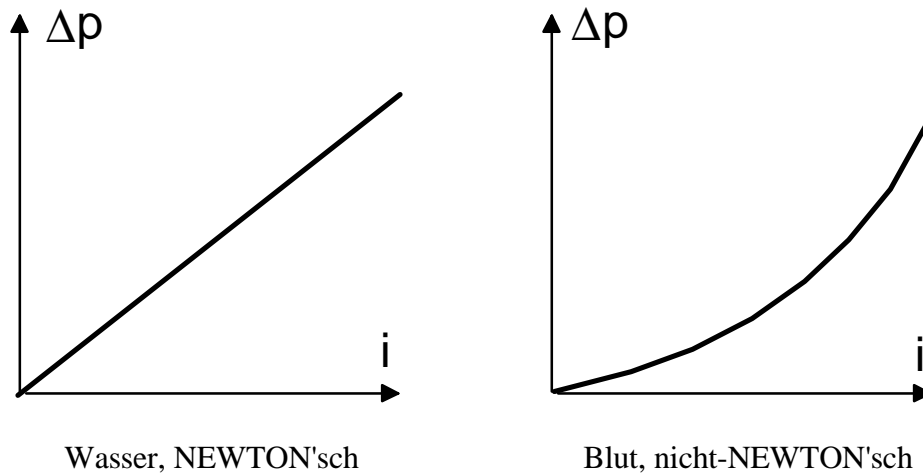


Abb.7: Stromstärke-Druckdifferenz-Diagramm von Flüssigkeiten

4. $\rho = \text{const}$, d.h. Inkompressibilität; für Flüssigkeiten meist gültig, für Gase nicht.
5. $r = \text{const}$
6. Laminare Strömung: Einlaufstörungen werden nicht berücksichtigt, sie erhöhen den Strömungswiderstand. Bei zu hoher Strömungsgeschwindigkeit reißt die laminare Strömung ebenso ab. Die Strömung ist meist laminar, solange die sogenannte Reynoldszahl $Re < 2300$ ist.

Definition der Reynoldszahl: $Re := r \cdot \rho_{\text{Flüssigkeit}} \cdot v_{\text{mittel}} / \eta$
 (vgl. Lehrbücher)

diese Definition gilt allgemein

Für $Re < 1160$ tritt mit Sicherheit laminare Strömung auf, zwischen 1160 und 2300 können Einlaufstörungen zu turbulenter Strömung führen, wodurch der Strömungswiderstand beträchtlich größer wird (*dies gilt nur für Rohrströmungen!*).

7. Keine äußeren Kräfte wirken (waagrechttes Rohr oder geschlossener Kreislauf)

Da in der HAGEN-POISEUILLE-Formel für das Durchströmen eines Rohres alle Größen bis auf η meßbar sind, kann man so die Zähigkeit experimentell bestimmen.

1.4. Strömungswiderstand

Das HAGEN-POISEUILLE'sche Gesetz läßt sich leicht umformen zu:

$$\Delta p = W \cdot i \quad \text{mit} \quad W = \frac{8\eta l}{\pi r^4}$$

W heißt der Strömungswiderstand; er ist nicht nur abhängig von der Geometrie des Rohres, sondern auch noch von der Zähigkeit der durchströmenden Flüssigkeit.

Wenn Sie sich an die allgemeine Form der Geradengleichung erinnern, erkennen Sie, daß W die Steigung im Stromstärke-Druckdifferenz-Diagramm ist.

Diese Formel ist analog zum bekannten OHM'schen Gesetz der Elektrizitätslehre. Es entsprechen sich dabei:

Gefäßsystem	Stromkreis
Δp Druckdifferenz	U Spannung
i (Volumen) Stromstärke	I Stromstärke
W Strömungswiderstand	R elektr. Widerstand
$L = 1/W$ Leitwert	$L = 1/R$ elektr. Leitwert

Bei Parallelschaltung gilt:

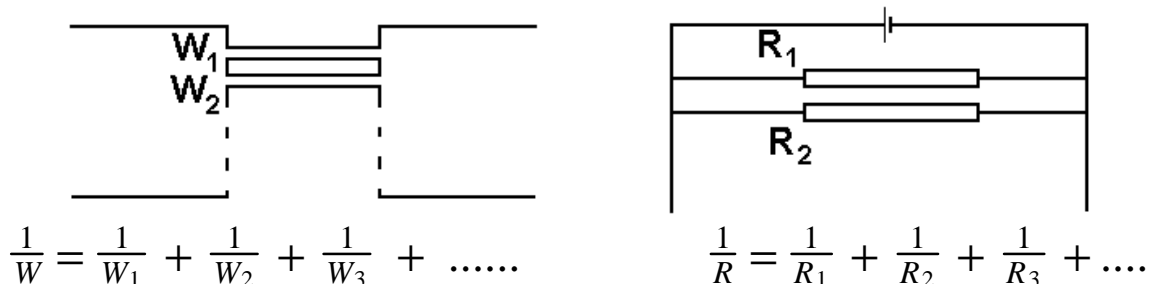


Abb.8: Parallelschaltung von Gefäßen bzw. Widerständen

Herleitung:

Wir betrachten eine Parallelschaltung von zwei Kapillaren mit den Strömungswiderständen W_1 und W_2 , die zugehörigen Volumenstromstärken seien i_1 und i_2 . Weil die Druckdifferenz an beiden Kapillaren gleich ist, gilt:

$$\Delta p = W_1 \cdot i_1 \quad \text{und} \quad \Delta p = W_2 \cdot i_2$$

Weil die Gesamtstromstärke i gleich der Summe der Einzelstromstärken i_1 und i_2 ist,

$$\Delta p = W \cdot (i_1 + i_2)$$

Einsetzen liefert:

VIS

$$\Delta p = W \cdot \left(\frac{1}{w_1} + \frac{1}{w_2} \right) \cdot \Delta p$$

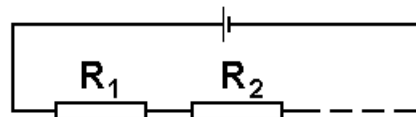
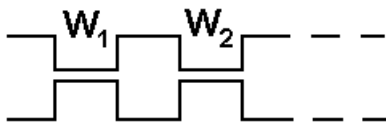
Daraus folgt:

$$\frac{1}{W} = \frac{1}{w_1} + \frac{1}{w_2}$$

d.h. die Leitwerte addieren sich.

Der Gesamtwiderstand einer Parallelschaltung wird immer kleiner als der kleinste Einzelwiderstand.

Bei Serienschaltung gilt:



$$W = W_1 + W_2 + W_3 + \dots$$

$$R = R_1 + R_2 + R_3 + \dots$$

Abb. 9: Serienschaltung von Gefäßen bzw. Widerständen

Bei einer Serienschaltung von zwei Kapillaren gilt, weil die Volumenstromstärke konstant ist:

$$\Delta p_1 = W_1 \cdot i \quad \text{und} \quad \Delta p_2 = W_2 \cdot i$$

Da außerdem $\Delta p = \Delta p_1 + \Delta p_2$, ergibt sich:

$$W = W_1 + W_2$$

Der Gesamtwiderstand einer Serienschaltung wird immer größer als der größte Einzelwiderstand.

1.5 Das STOKES'sche Gesetz

Ein Fallschirmspringer erreicht auch bei beliebig langer Fallzeit keine beliebig hohe Fallgeschwindigkeit. Die Luftreibung erlaubt eine Höchstgeschwindigkeit im freien Fall von etwa 200km/h, mit geöffnetem Schirm 10km/h. Die auftretenden Kräfte - Erdanziehung, Auftrieb und Reibung - halten sich bei diesen Geschwindigkeiten das Gleichgewicht.

Betrachten wir die Physik des Sprungs etwas vereinfacht: Auf eine Kugel, die sich durch ein unendlich ausgedehntes, zähes Medium bewegt (in Abb.10 nach unten) wirken folgende Kräfte:

1. Gravitationskraft: $F_G = mg$
2. Auftriebskraft: $F_A = V_{\text{Kugel}} \cdot \rho_{\text{Fl}} \cdot g$
3. Reibungskraft F_R : sie ist immer der Bewegung entgegengerichtet und ihr Betrag berechnet sich nach der STOKES'schen Formel:

$$F_R = 6 \cdot \pi \cdot \eta \cdot r \cdot v$$

$$\text{Re} < 1 \text{ !!!!!!!}$$

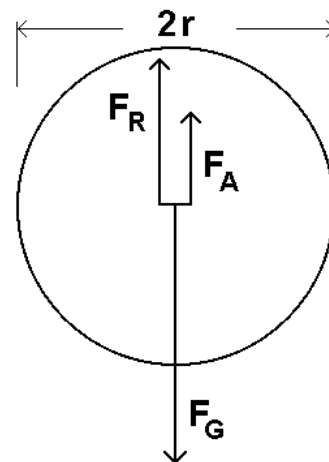


Abb.10: Kräfte an fallender Kugel

Das STOKES'sche Gesetz bezieht sich wieder auf Kräfte, die durch die innere Reibung der Gas- oder Flüssigkeitsschichten entstehen;

Achtung: Es gilt nur für Reynoldszahl $\text{Re} < 1$ (Unterschied zur Rohrströmung)

Beim Fallschirmspringer tritt aber nicht nur die nach der STOKES'schen Formel zu berechnende Reibungskraft auf. Beachten Sie dazu Aufgabe 7.

Die Kugel in obiger Abbildung wird beschleunigt, bis das Kräftegleichgewicht eintritt:

$$F_G = F_R + F_A$$

Damit folgt für die dynamische Viskosität η :

$$\eta = \frac{2 \cdot r^2 \cdot g}{9 \cdot v} (\rho_{\text{Kugel}} - \rho_{\text{Flüssigkeit}})$$

Formel (1)

Bewegt sich die Kugel nicht in einem unendlich ausgedehnten Medium, sondern in einem unendlich langen Zylinder mit einem endlichen Radius R , so ist für η die korrigierte Formel zu benutzen:

$$\eta = \frac{2 \cdot r^2 \cdot g}{9 \cdot v \cdot (1 + 2,4 \cdot \frac{r}{R})} (\rho_{\text{Kugel}} - \rho_{\text{Flüssigkeit}})$$

Formel (2)

Für einen endlich langen Zylinder sind weitere, kleinere Korrekturen vorzunehmen, die hier nicht mehr aufgeführt werden.

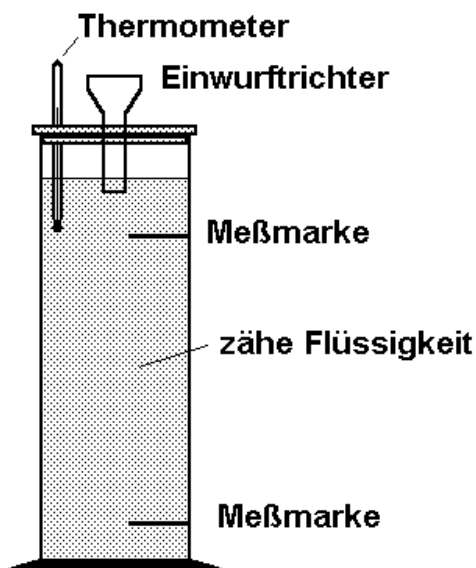
Überlegungsfrage: Wie sieht das Kräftegleichgewicht für eine Kohlendioxidblase im Bierglas aus?

2 Versuchsaufbau

2.1 Kugelfallviskosimeter

Für die Kugelfallviskosimetrie wird ein Fallrohr verwendet, das ist ein langer durchsichtiger Zylinder mit zwei Meßmarken, in den die Flüssigkeit eingefüllt wird. Der Einwurftrichter sorgt dafür, daß die Falllinie möglichst mit der Zylinderachse zusammenfällt (siehe Abb.11).

Eine Digital-Meßlehre dient zur genauen Bestimmung von Längen ($\pm 0,01\text{mm}$). Man legt das Meßstück zwischen die Schieber und drückt sie gefühlvoll zusammen (siehe Abb.12). Bei deformierbaren (z.B. kleine Kugeln aus Plastik) muß man natürlich besonders sorgfältig vorgehen, um keine systematischen Fehler zu produzieren.



Ab.11: Fallrohr

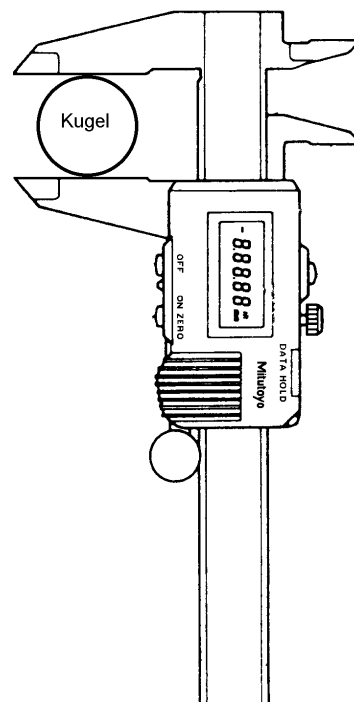


Abb.12: Digital-Meßlehre

Weiteres Versuchszubehör sind ein Aräometer zur Bestimmung der Flüssigkeitsdichte, außerdem Thermometer, Handstoppuhr, Metermaß, Meßmikroskop und Waage (sehr empfindlich; nicht verrücken. Bedienungsanleitung beachten).

2.2 Kapillarviskosimeter mit Injektionskanüle

Als Kapillaren werden bei diesem Versuchsteil Injektionskanülen verwendet, die es in vielerlei Ausführungen gibt.

Aus einem in der Höhe verschiebbaren Gefäß (wie bei einem Tropf) läuft die Flüssigkeit durch einen Schlauch durch einen Hahn bis zur Kanüle.

Die Höhendifferenz zwischen Flüssigkeitsspiegel im Vorratsgefäß und Kanüle ist ein Maß für den Druck. Die Volumenstromstärke durch die Kanüle bestimmt man einfach durch Messen von Volumen und Zeit.

Bestimmt man noch Länge und Durchmesser der Kanüle, verfügt man über alle Daten, um die Zähigkeit der Flüssigkeit berechnen zu können. Diese Meßmethode ist sicher nicht besonders genau, dafür aber einfach.

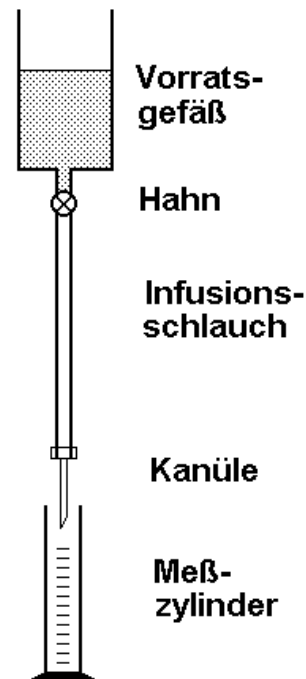


Abb.3: Kapillarviskosimeter mit Kanüle

2.3 Viskosimeter nach Ubbelohde

Dieses geeichte Präzisionsviskosimeter besteht im Wesentlichen aus drei Rohrteilen (1, 2 & 3), der Kapillare (7) mit dem Meßgefäß (8), der Vorlaufkugel (9) und dem Niveaugefäß (5). Über und unter dem Meßgefäß (8) sind auf dem Rohr die Ringmarken M_1 und M_2 eingätzt; durch diese Marken ist sowohl das Durchflußvolumen der Probe abgegrenzt, als auch die mittlere Druckhöhe festgelegt. Die Kapillare (7) endet im als Kugelkalotte ausgebildeten oberen Teil (6) des Niveaugefäßes (5). Über diese Kugelkalotte (6) läuft die Probe aus der Kapillare (7) in Form eines dünnen Films ab (hängendes Kugelniveau). Zum Versuch werden noch eine Stoppuhr, eine Wasserstrahlpumpe, ein Temperiermantel für das Viskosimeter mit Thermostat und ein Thermometer benötigt.

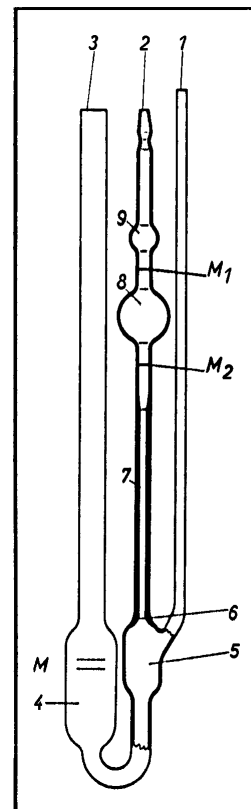


Abb.14: Viskosimeter nach Ubbelohde

3 Versuchsdurchführung und -auswertung

Achtung: Immer Originalmeßwerte notieren!

3.1 Kugelfallviskosimeter

Bestimmen Sie die Größen, die nötig sind, um die Viskosität der Flüssigkeit im Fallrohr nach Formel (1) und (2) zu berechnen. Ihr Betreuer sagt Ihnen welchen Satz Kugeln Sie verwenden sollen. Fragen Sie ihn! Suchen Sie dann mindestens zehn Kugeln gleicher Größe, messen ihre Radien und Fallzeiten. Es kann günstig sein, die Masse für zehn Kugeln zusammen zu bestimmen und dann durch zehn zu dividieren.

Notieren Sie die Nummer des Fallrohres.

Mit dem Auffangsieb entfernen Sie die Kugeln wieder aus dem Fallrohr und reinigen sie anschließend mit aqua dest.

Schätzen Sie die bei den Messungen vorkommenden Fehler quantitativ ab.

Auswertung

Berechnen Sie die Viskosität (in mPas) bei Raumtemperatur nach Formel (1) und nach der korrigierenden Formel (2) mit Fehlerangabe.

Berechnen Sie die Reynoldszahl. Herrscht laminare Strömung?

3.2 Kapillarviskosimeter

Ihr Betreuer gibt Ihnen zwei Kanülen. Notieren Sie die Daten der Aufreißpackung!

3.2.1 Einfache und schnelle Bestimmung der Viskosität

Ziehen Sie den Kolben einer 50 ml-Spritze bis auf 50 ml heraus, verschließen Sie die Spritze am Ende mit Ihrem Finger möglichst dicht und drücken mit Ihrem Daumen den Kolben möglichst weit hinein. Lesen Sie das erreichte Volumen ab. Falls der Kolben in der Spritze schwergängig ist, tun Sie etwas Silikonöl auf die Gummilippen.

Messen Sie anschließend die Zeit, die Sie benötigen, um 5ml Wasser bzw. 50ml Luft schnellstmöglich durch die beiden Meßkanülen durchzudrücken. Schätzen Sie die Längen der Kanülen (die auf der Aufreißpackung angegebene Länge bezieht sich auf den sichtbaren Teil der Kanüle). Der Innendurchmesser ist etwa gleich der Hälfte des Außendurchmessers der Kanüle (der Außendurchmesser ist auf der Aufreißpackung angegeben).

Auswertung:

Berechnen Sie den beim Spritzen erzielbaren Überdruck Δp mittels des Boyle-Mariotteschen Gesetzes (grobe Annahme: herrschender Druck = Normalluftdruck = 1000hPa) und bestimmen Sie dann gemäß dem HAGEN-POISEUILLE'schen Gesetz die Zähigkeit von Wasser und Luft.

Vergleichen Sie Ihren Wert mit dem Literaturwert.

Diskutieren Sie Unsicherheiten.

Die Rechnung ist sofort durchzuführen, dem Betreuer zu zeigen und von ihm zu testieren.

3.2.2 Strömungswiderstand zweier Kanülen

Füllen Sie das Vorratsgefäß mit zimmerwarmen, deionisiertem Wasser.

Befestigen Sie die Kanüle am unteren Ende des Schlauchs (bitte mit Gefühl; die Plastikgewinde können leicht überdreht werden) und messen Sie mit Hilfe des Meßzylinders und der Stoppuhr die für das Durchlaufen eines bestimmten Volumens benötigte Zeit.

Notieren Sie den Höhenunterschied zwischen Flüssigkeitsspiegel im Vorratsgefäß und Kanüle.

Messen Sie für mindestens vier weitere, deutlich unterschiedliche Höhen des Vorratsgefäßes ebenfalls Zeit und Volumen.

Wiederholen Sie diese Messungen für die zweite Kanüle.

Erhitzen Sie die Injektionskanülen mit einem Feuerzeug dort, wo die Kanüle im Plastikanschluß sitzt und ziehen mit einer Zange die Kanüle aus dem Plastikanschluß heraus.

Messen Sie die Länge der Kanüle mit der Meßlehre (von wo bis wo ist es sinnvoll?) und den Innendurchmesser mit dem Meßmikroskop (Eichung beim Mikroskop). Das Bild der Kanüle im Mikroskop zu finden kann lange dauern, wenn man überhaupt keine Methode dabei anwendet.

Achtung: Kanülen in speziellen Abfallbehälter deponieren.

Nicht in den normalen Papierkorb werfen!

Auswertung:

Tragen Sie in eine grafische Darstellung (Karopapier genügt) die zu den jeweiligen Stromstärken gehörigen Druckdifferenzen ein. Zeichnen Sie eine Ausgleichsgerade durch die Punkte und bestimmen Sie deren Steigung (oder berechnen Sie die Steigung mit entsprechendem Taschenrechner).

Mit der Steigung hat man den Strömungswiderstand W bestimmt.

Die Auswertung über die Steigung hat zwei Vorteile: zum einen wird dabei ein Mittelwert gebildet, zum anderen werden Fehler, die sich als Konstante zum Druck addieren (z.B. von der Oberflächenspannung herrührende Anteile), eliminiert.

Berechnen Sie die Viskosität mit Hilfe der Daten aus Punkt 3.2.2. Vergleichen Sie Ihre Werte mit den Literaturwerten.

Vergleichen Sie auch noch den hier ermittelten Innenradius mit dem unter Punkt 3.2.1 geschätzten Innenradius. Sind die Überschlagsrechnungen eventuell wegen Abweichungen grob daneben?

$$\eta = \frac{\pi \cdot d^4 \cdot W}{16 \cdot 8 \cdot l} = \frac{\pi \cdot r^4 \cdot W}{8 \cdot l}$$

3.3 Viskosimeter nach Ubbelohde

Schalten Sie die Pumpe des Thermostaten ein. Eventuell gießen Sie deionisiertes Wasser im Thermostaten nach (bis ca. 2cm unter dem Rand). Falls im Betrieb am Deckel des Viskosimeters Wasser austritt, ziehen Sie die Schlauchklemme beim Einfluß etwas an. Die Prüfflüssigkeit wird ins Rohr (3) eingefüllt, bis sie zwischen den beiden Marken im Vorratsbehälter (4) steht. Regulieren Sie die Temperatur am Thermostaten so, daß Sie im Viskosimeter die gleiche Temperatur haben wie beim Versuch 3.2. Warten Sie 15 Minuten für den Temperatenausgleich, wenn Sie den Thermostaten verstellt haben. Kontrollieren Sie die exakte vertikale Lage der Meßkapillare im Viskosimeter.

Verschließen Sie das Rohr (1) mit dem Finger und saugen Sie die Flüssigkeit mit der Wasserstrahlpumpe in die Vorlaufkugel. Schalten Sie die Pumpe ab, trennen Sie die Schlauchverbindung zwischen Wasserstrahlpumpe und Viskosimeter und öffnen Sie erst danach das Rohr(1).

Messen Sie die Durchflußzeit zwischen den Marken M_1 und M_2 , sowie die Temperatur im Temperiermantel.

Wiederholen Sie den Versuch für eine Temperatur, die Sie vom Betreuer erfragen!

Am Ende des Versuchs schalten Sie die Pumpe ab.

Lesen Sie die auf dem Viskosimeter selbst vermerkte Gerätekonstante K (Einheit cSt/s ; Zentistokes pro Sekunde) ab.

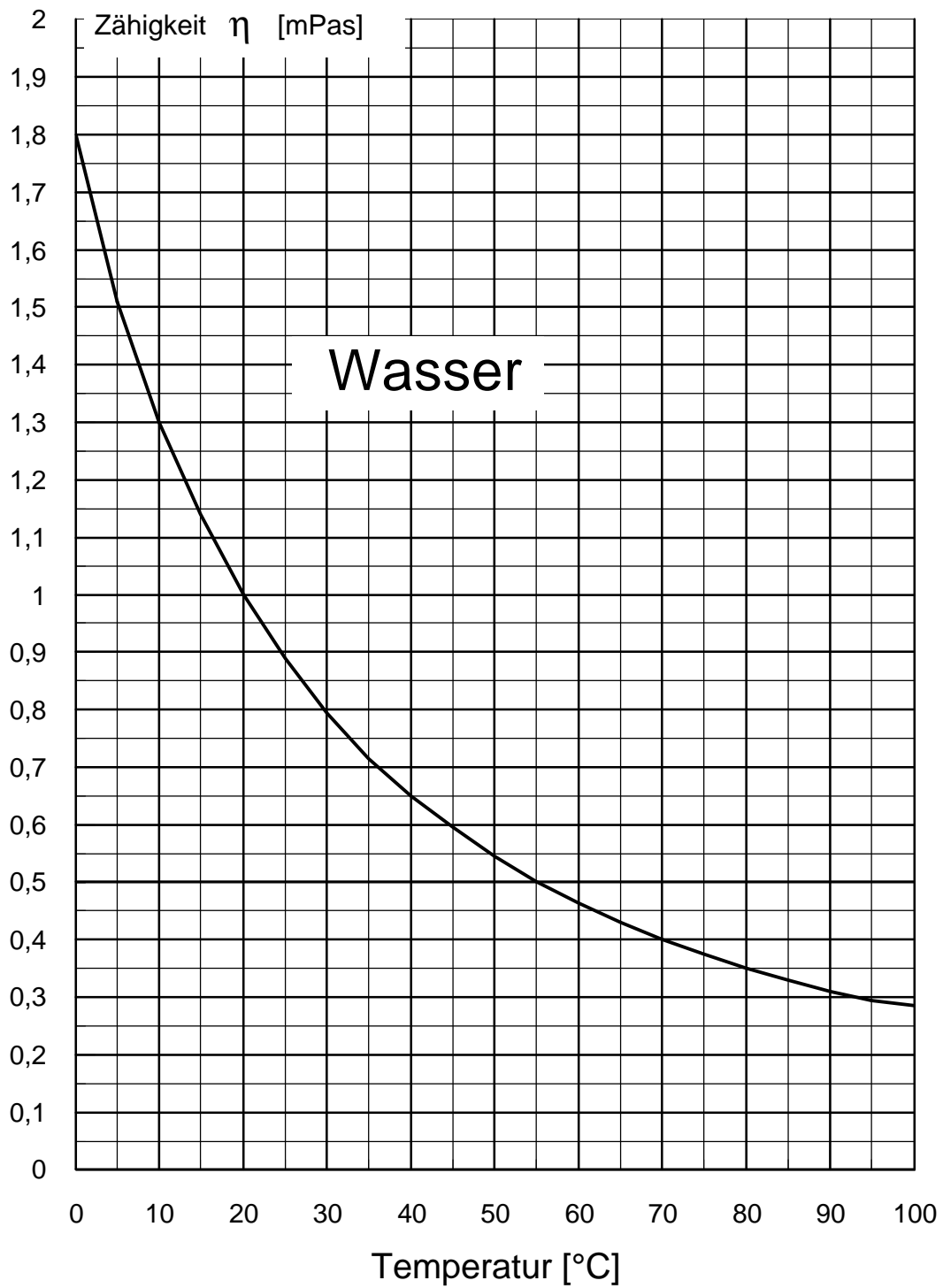
Auswertung (sofort im Praktikum):

Berechnen Sie die kinematische Viskosität ν als Produkt der Durchflußzeit t (in s) und der Gerätekonstanten K :

$$\nu = K \cdot t$$

Berechnen Sie daraus die dynamische Viskosität η .

Vergleichen Sie die Werte aus Versuch 3.2 und 3.3 mit dem Literaturwert für die jeweilige Temperatur (Grafik siehe nächste Seite).



4 Aufgaben

- 1) Bei der Blutsenkung mißt man die Sinkgeschwindigkeit der Erythrozyten im Blutplasma. Eine erhöhte Sinkgeschwindigkeit liefert Hinweise auf Entzündungen und vermehrten Gewebszerfall (Tumore).

Bestimmen Sie unter den idealisierten Bedingungen:

1. Die Erythrozyten sind Kugeln, sie fallen
2. in einem unbegrenzten Raum
3. in einer NEWTON'schen Flüssigkeit;
den Radius der Erythrozyten!

$$\rho_{\text{Ery}} = 1,096\text{g/cm}^3; \rho_{\text{Plasma}} = 1,027\text{g/cm}^3$$

BlutSenkungsGeschwindigkeit Männer = 3-6mm/h; BSG Frauen = 8-10mm/h

Bestimmen Sie die Reynoldszahl! Treten Wirbel auf?

- 2) Wie ändert sich der Gefäßwiderstand bei Halbierung des Kapillardurchmessers? Diskutieren Sie die Folgen der Arterienverkalkung!
- 3) Welche Wirkung auf den Widerstand hat die Ersetzung einer Kapillare vom Radius r durch eine Parallelschaltung von 2 Kapillaren mit den Radien $r/2$ und gleichen Längen?
- 4) Wie müssen Sie Gefäße vom Radius $r/2$ und Länge l verbinden, um den Widerstand eines Rohres mit Radius r und Länge l zu erhalten?
- 5) Berechnen Sie den Strömungswiderstand (in Pas/m^3) des Blutkreislaufs, den sogenannten totalen peripheren Widerstand TPR (total peripheral resistance).
 $i = 80\text{cm}^3/\text{s}$; $\Delta p = 1,33 \cdot 10^4 \text{ Pa}$ (mittlere Druckdifferenz zwischen linker Kammer und rechtem Vorhof)
- 6) Wie groß ist die Reynoldszahl in der Aorta für die mittlere Blutgeschwindigkeit $v_{\text{mittel}} = 40\text{cm/s}$ und die maximale systolische Geschwindigkeit $v_{\text{max}} = 120\text{cm/s}$. Welche Strömungsart erwarten Sie? Von welcher Blutgeschwindigkeit an gibt es sicher turbulente Strömung?
 $r_{\text{Aorta}} = 1,2\text{cm}$; $\rho_{\text{Vollblut}} = 1,06\text{g/cm}^3$.
- 7) Welche Viskosität der Luft berechnen Sie aus der Höchstgeschwindigkeit eines Fallschirmspringers im freien Fall? Machen Sie ergänzende Annahmen. Was fällt Ihnen auf? Berechnen Sie die Reynoldszahl!
- 8) Berechnen Sie die Reynoldszahl bei normaler Atmung durch die Nase, indem Sie Radius und Länge der Nasenlöcher abschätzen. Bei normaler Ruheatmung atmet man ca. 15 mal pro Minute jedesmal ca. 0,5 Liter Luft (Dichte von Luft = $1,29 \cdot 10^{-3}\text{g/cm}^3$).
Versuchen Sie abzuschätzen, ob bei verstärkter Atmung turbulente Strömung in den Nasenlöchern erreicht wird.