



FLUIDE

Ruhende Flüssigkeiten und Gase

Grenzflächeneffekte

Bewegte Flüssigkeiten und Gase



Flüssigkeiten
Nahordnung
frei beweglich
geringe thermische Bewegung
kleiner Abstand
Volumenelastizität
geringe Kompressibilität

Fluide

Festkörper
Bestandteile geordnet,
gebunden um Gleichgewichtslage
geringe thermische Bewegung
kleiner Abstand
Gestaltelastizität

Gase
keine Ordnung
frei beweglich
füllt verfügbares Volumen aus
große thermische Bewegung,
großer Abstand ($> \times 10$)
geringe Wechselwirkung
komprimierbar

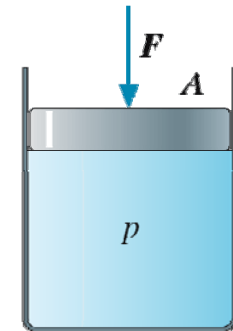


- Warum Fluide ?
- Blutkreislauf
z.B.: Transport der Wirkstoffe
- Lösungen, Emulsionen etc.
- Pumpen, Waagen, Pipette

2.1.1 Hydrostatik F

• **Druck:** $p = \frac{F}{A}$

- Greift an einem Flächenstück A senkrecht zu ihm die gleichmäßig über die Fläche verteilte Kraft F an, dann heißt das Verhältnis der Kraft zur Fläche Druck
- Einheit: $1\text{Nm}^{-2} = 1\text{ Pa (1 Pascal)} = 10^{-5}\text{ bar}$



(auch $\text{atm} = 101\,325\text{ Pa}$, $\text{Torr} = 101\,325/760\text{ Pa}$)

• **Kompressibilität** $\kappa = -\frac{1}{\Delta p} \frac{\Delta V}{V}$

- Druckänderung ist verbunden mit Volumenänderung $\Delta p = -K \frac{\Delta V}{V}$
- Kompressibilitätsmodul $K = 1/\kappa$
- κ : z.B. Aceton 1,27; Benzol 0,97; Wasser 0,46; Glycerin 0,22; Quecksilber 0,039 ; ideales Gas 10^4 (in $10^{-9}\text{ m}^2/\text{N}$; bei 20°C und 10^5 Pa)

- Kolbendruck

es herrscht überall im inneren und an den Grenzflächen der Druck $p=F/A$. Druck ist Skalar!

- Hydraulische Presse

$$F_1 = pA_1 \quad F_2 = pA_2 \Rightarrow \frac{F_1}{F_2} = \frac{A_1}{A_2}$$

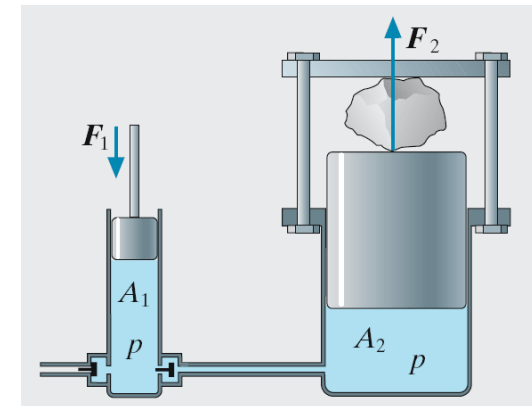
- Arbeit

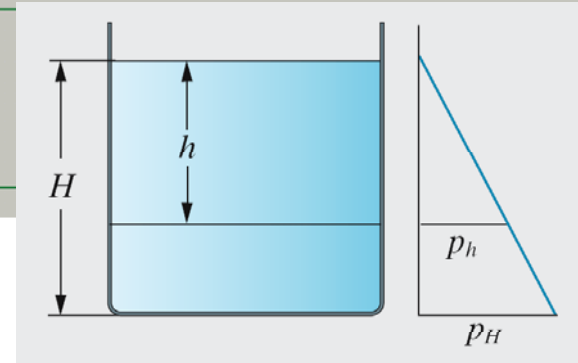
s...Kolbenhub

$$W = F_1 s_1 = F_2 s_2 \Rightarrow \frac{F_1}{F_2} = \frac{s_2}{s_1}$$

- Kolben-, Membranpumpen

- Auf- und Abbewegung des Kolbens (1) befördert Flüssigkeit von links nach rechts. Bei Membranpumpe Kolben ersetzt durch Membran (weniger diskontinuierlich)
 - Herz: Druck-Saugpumpe betreibt 2 Kreisläufe





- Schweredruck

- Gewicht der höheren Schichten erzeugt zusätzlichen Druck für die unteren.

$$G = mg = \rho Vg = \rho hAg \quad (\rho \dots \text{Dichte})$$

$$p_h = \rho hg$$

- Kommunizierende Gefäße

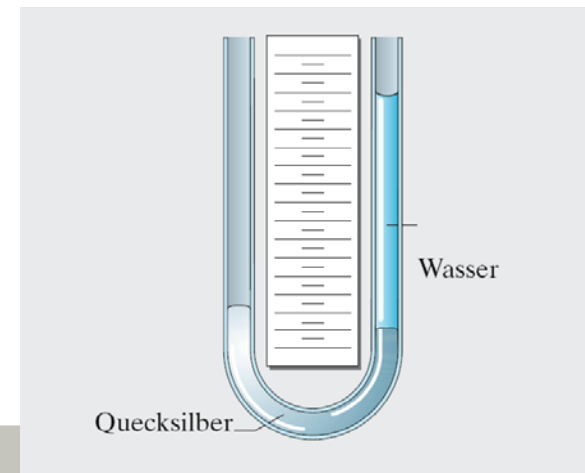
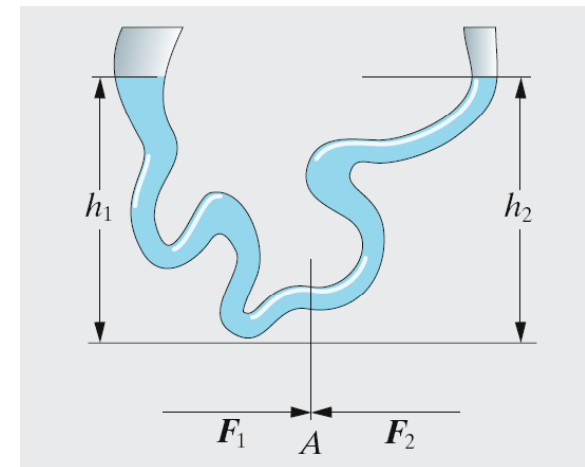
- an jeder Stelle müssen Kräfte (Drücke) gleich sein

$$p = \rho_1 h_1 g = \rho_2 h_2 g$$

⇒ gleiche Dichten – gleiche Höhen ($h_1 = h_2$)

⇒ unterschiedliche Dichten

– unterschiedliche Höhen ($h_1 \neq h_2$)





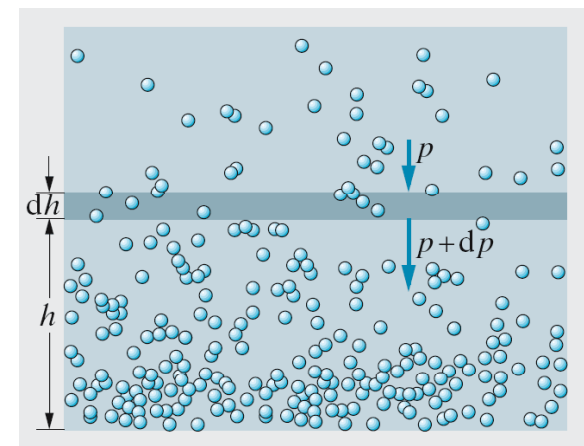
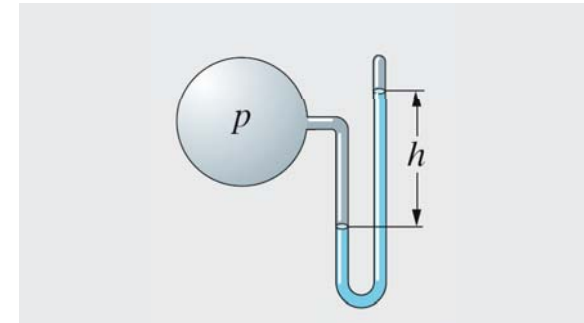
- Gase sind leicht komprimierbar (z.B.: Gasflaschen), Druck wirkt nach allen Seiten
- in idealen Gasen (Wasserstoff, Helium, Stickstoff...) gilt bei konst. Temperatur

$$pV = \text{const} \quad \text{bei } T = \text{const}$$

- **Atmosphärendruck** (Barometrische Höhenformel)

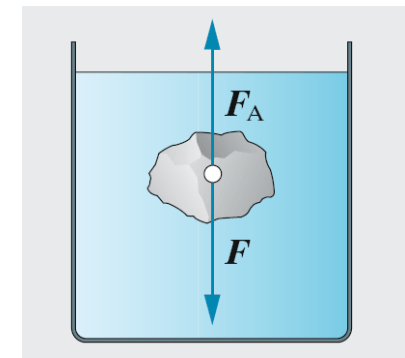
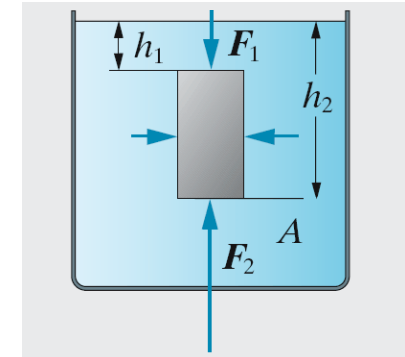
- Gewicht der höheren Luftschichten
⇒ Luftdruck
- Normdruck $h=760$ mm Quecksilbersäule
 $\hat{=} 101\,325$ Pa
- "Vakuum": Feinv. 10^2 - 10^{-1} Pa; Hochv. - 10^{-4} Pa
- Dichte der Gase ist druckabhängig $p/\rho = p_0/\rho_0$
- Barometrische Höhenformel:

$$p_h = p_0 e^{-\frac{\rho_0}{p_0}gh}$$





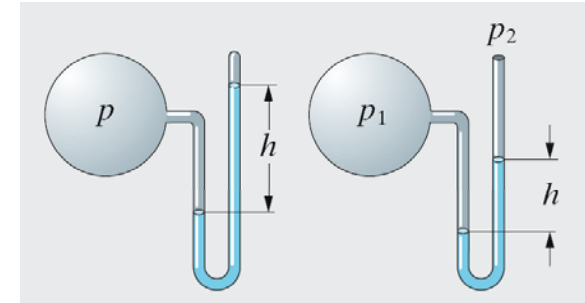
- Druck, und damit Kraft, von Höhe h_i abhängig
$$F_A = F_2 - F_1 = g\rho h_2 A - g\rho h_1 A = g\rho(h_2 - h_1)A = g\rho V$$
 - auch in Gasen
 - beliebige Formen (Seitenkräfte heben sich auf) \Rightarrow Auftrieb aus Differenz zwischen Kräften von unten (F_2) und oben (F_1)
- Schwimmen
 - abhängig von $F_G - F_A < 0, = 0, > 0$
schwimmt, schwebt, sinkt Körper
 - Heliumballon in Luft (\Rightarrow max. Steighöhe?)





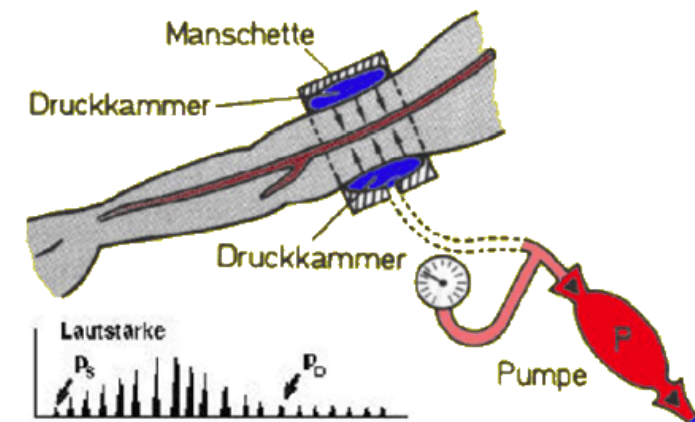
- **Druck:** Manometer (Barometer, Vakuummeter)

- Flüssigkeitsmanometer: U-Rohr, teilweise mit Hg gefüllt. offen: $p_1 - p_2$, geschlossen: p
- $1 \text{ mm Hg} \hat{=} 1 \text{ Torr} \hat{=} 133,3 \text{ Pa}$
- $1 \text{ mm H}_2\text{O} \hat{=} 9,81 \text{ Pa}$ ($\rho_{\text{Hg}} = 13,6 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$)
- Membranmanometer: Verformung einer Membran von Druck abhängig
 \Rightarrow mechanische Anzeige
oft auch elektrische Umformung



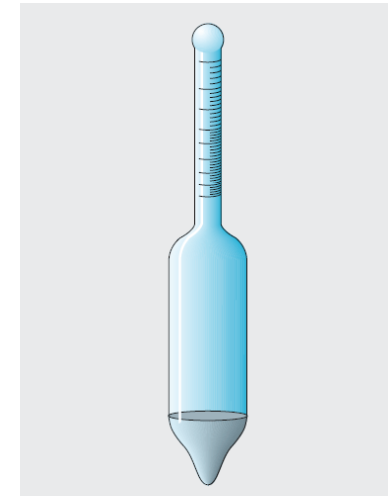
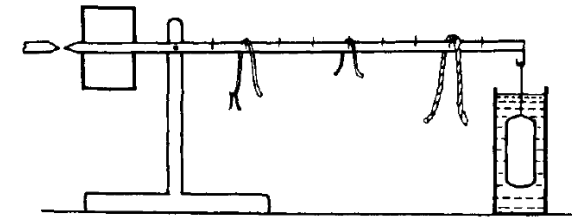
- Blutdruckmessung

- Blut fließt, solange Blutdruck + Druck der Gefäßwand > Aussendruck
- mit Stethoskop werden Geräusche bei turbulenter Strömung registriert



- **Dichte:**

- Moohrsche Waage (Hydrostatische Waage)
bestimme Gewicht in Luft und Wasser, aus
Verhältnis der Auftriebskräfte \Rightarrow Dichte
- Aräometer: beschwerter Glaskörper taucht in
Flüssigkeit, Spindel taucht ein, Ablesung an Spindel
 - ♦ Skala
- Pyknometer: Flasche mit geeichtem Volumen wird
mit und ohne Flüssigkeit gewogen \Rightarrow Dichte





- **Oberflächenspannung**

- Oberflächenenergie $E_{Ob} = \sigma A$ σ ...spezifische Oberflächenenergie
prop. Fläche !

- Ursache: Anziehung zwischen Molekülen im inneren von allen Seiten gleich, an Oberfläche fehlen Bindungen, ca. 12 Bindungen im inneren, 9 an Oberfl. $\Rightarrow E_{Ob} \approx E_{Verdampfung}$

- **Prinzip minimaler Energie** (Minimalflächen)

Tropfen: kleinste Oberfläche bei geg. Volumen \Rightarrow Kugel

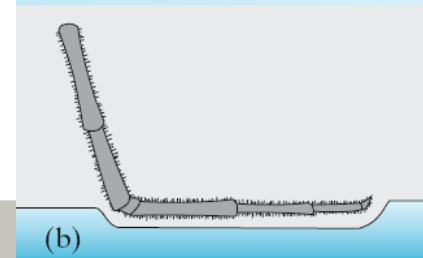
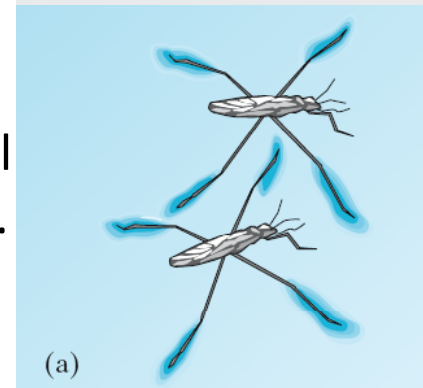
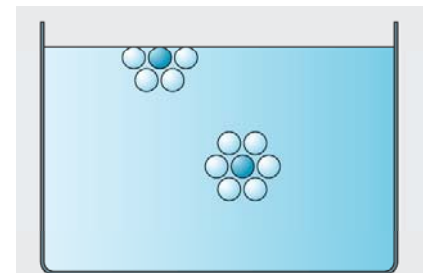
Wasserkäfer: tieferes Einsinken würde Oberflächenenergie vergrößern, Gleichgewicht: $F_G \Delta h = \Delta E_{Ob}$

Tröpfchengröße am Wasserhahn: Fläche am Hahn πr^2

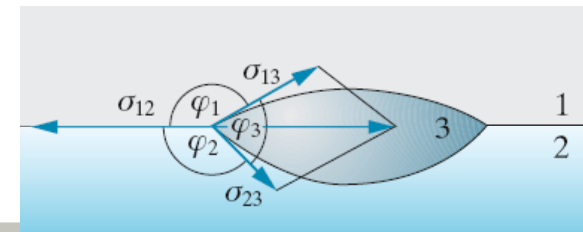
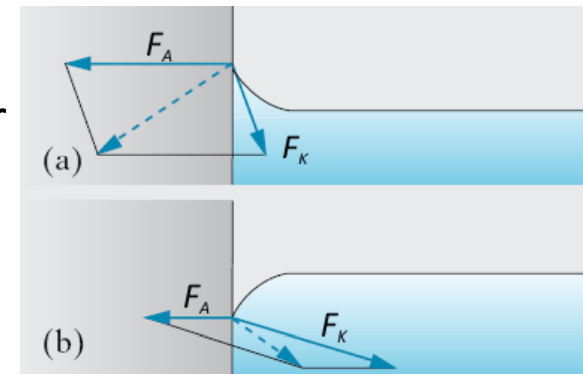
Änderung der Fläche \rightarrow Änderung der Energie \rightarrow Kraft

= Gewichtskraft $2\pi r\sigma = V\rho g$

für $r=1$ mm ergibt sich $V \sim 0,043 \text{ cm}^3$



- Seifenblase: Überdruck in Innerem
 - Bestreben zu minimaler Fläche muss Druck in Innerem aufgebaut werden $\Delta p = 4\sigma/r$
- Grenzflächenspannung σ_{ik}
 - hängt von Wechselwirkung zwischen Festkörper und Flüssigkeit ab (auch negativ: Festkörper zieht Moleküle stärker an, als diese einander)
Haftspannung, Kohäsions- Adhäsionskraft bestimmen Winkel Flüssigkeit/Oberfläche
 - Adhäsion: Kraft zwischen verschiedenen Molekülen F_A
Kohäsion: Kraft zwischen gleichen Molekülen F_K
 - benetzend (Randwinkel $\varphi < 90^\circ$) $F_A > F_K$
 - allgemeiner: σ_{ik} auch zwischen unterschiedlichen Flüssigkeiten, z.B.: Fettsäure, Emulsion...



- Kapillarität

- bei benetzender Fläche ist Gewicht gleich Kraft an Randlinie

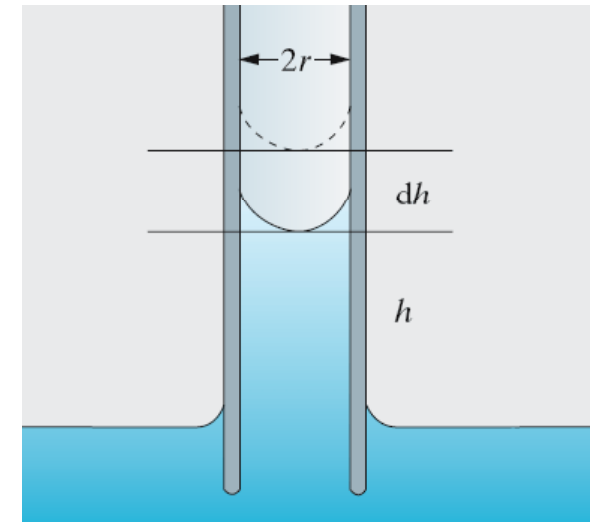
$$h = 2\sigma / r \rho g$$

- Bestimmung von σ

- Steighöhenmethode, Tropfengewicht, Normaltropfenzähler

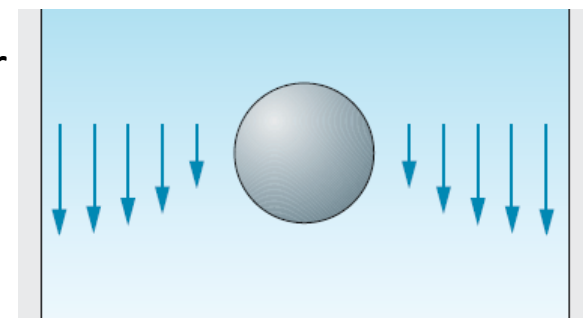
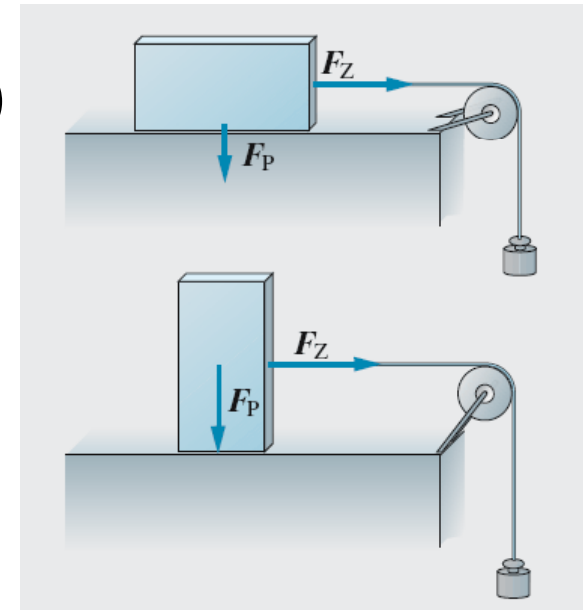
- Adsorption

- Anreicherung einer flüssigen (o. gasförmigen) Phase an einer Oberfläche
- ändert Oberflächenbeschaffenheit
- Wechselspiel von Oberflächenenergie, Thermodynamik, Chemie





- bewegte Körper werden abgebremst (negative Beschleunigung)
 - ⇒ Reibungskraft F_R
- äußere Reibung ↔ innere Reibung (Viskosität)
- Reibung zwischen Festkörpern
 - Oberflächen durch Kräfte deformierbar
an Grenzfläche mikroskopische Unebenheiten
 - ruhende Körper dringen tiefer in Unebenheiten
 - Haftreibung > Gleitreibung $F_R = \mu F_N$
(**Couloumbr.**) geschwindigkeitsunabhängig
 - Festkörper (Kugel) in Flüssigkeiten:
Randschicht der Flüssigkeit haftet an Festkörper
in einiger Entfernung ruht Flüssigkeit
– Geschwindigkeitsgefälle – Kraft
Stokesreibung (prop. Geschwindigkeit)
$$F = -6\pi\eta vr$$





- **η ...Viskosität** (Einheit: Pa.s Pascalsekunde) proportional elastischer Deformation in Festkörpern, zu Geschwindigkeitsgradienten dv/dz in Flüssigkeiten (innere Reibung)
- η nimmt stark ab mit T (Temperatur) in Flüssigkeiten, η steigt mit T in Gasen
- Kugelfallviskosimeter
- (Blut-) Sedimentation: Absinken im Schwerfeld

	η N s m^{-2}	Temperatur $^{\circ}\text{C}$
Wasser	0,001 82	0
	0,001 025	20
	0,000 288	100
Ethylalkohol	0,001 21	20
Ethylether	0,000 248	20
Glyzerin	1,528	20
Luft (1 bar)	0,000 017 4	0
Wasserstoff (1 bar)	0,000 008 6	0

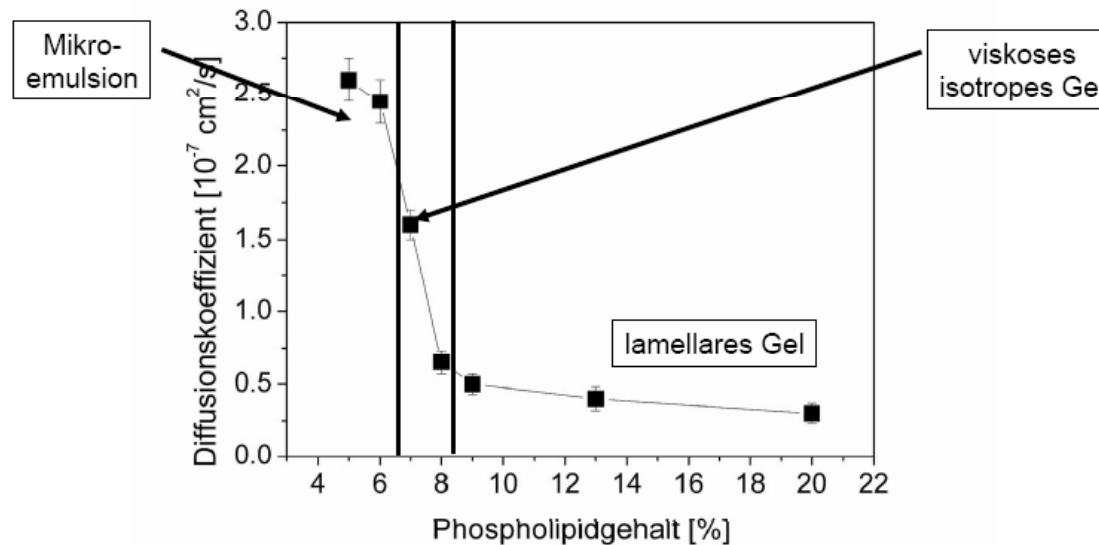
- **Newtonreibung:** schnelle Körper v verdrängen Fluid, beschleunigen Fluid auf etwa v_f . Bewegte Masse: $m_f = \rho A v dt$, kin. Energie $\frac{1}{2} m v_f^2 = \frac{1}{2} \rho A v^3 dt$
 $F_R = \frac{1}{2} c_w \rho A v^2$ prop. v^2 ! c_w Widerstandskoeffizient
 - ♦ \rightarrow Turbulenz, bei relativ niedrigen Geschwindigkeiten in Gasen (Fahrrad, Auto)



- Oberflächenspannung und Viskosität: beeinflusst Löslichkeit von Medikamenten – Retardarzneimittel – Emulsionen

- Streifen
 - Sedimentation
- Diffusion von Diclofenacdiethylamin aus phospholipidhaltigen Systemen durch exzidierte Humanhaut

- Anwendung
- Ausgang
- Injektion
- Physiologie
- Bioverfügbarkeit
- Emulsionen





- Oberflächenspannung und Viskosität: beeinflusst Löslichkeit von Medikamenten – Retardarzneimittel – Emulsionen
 - Streichfähigkeit von Salben
 - Sedimentation in Zäpfchen
 - Anwendung von Tablettenüberzügen
 - Ausgießen oder Abfüllen aus/in Flaschen, Tuben
 - Injizierbarkeit
 - Physikalische Stabilität von z.B. Suspensionen
 - Bioverfügbarkeit im GI-Trakt
 - Poröse Materialien
 - Mischen
 - Emulsionen !



2.3.1 Strömung

- Beschreibung durch Vektorfeld $\vec{v}(x, y, z, t)$
Stromlinien, Stromdichte
- Kräfte auf Masse (Volumen) in Flüssigkeit:
Schwerkraft, Druckkräfte, Reibungskräfte
- Strömung in idealen Flüssigkeiten
 - Kontinuitätsbedingung:

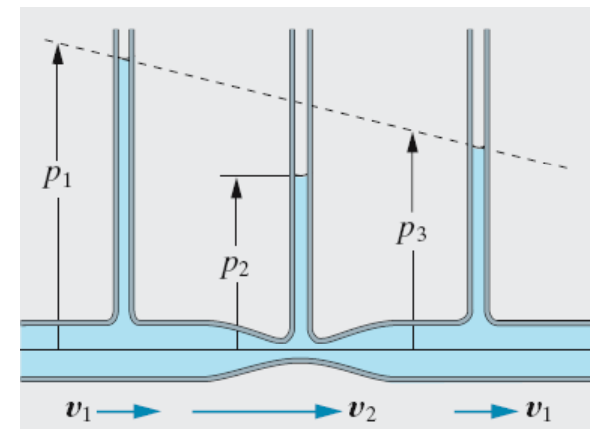
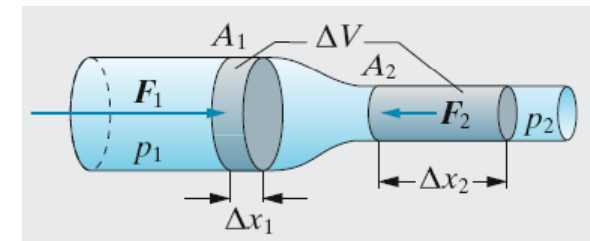
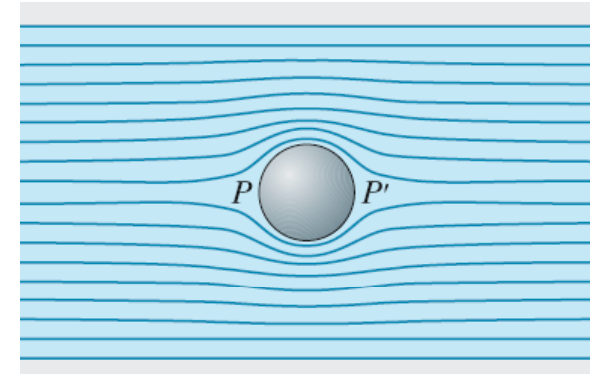
$$\Delta m = \rho \Delta V = \rho A \Delta x = \rho A v \Delta t \quad , \quad \Delta m_1 = \Delta m_2$$

$$\Rightarrow A_1 v_1 = A_2 v_2$$
 - Summe aus kinetischer Energie +
potentielle Energie (pV) konstant

$$\Rightarrow \text{Bernoulli-Gleichung}$$

$$\frac{1}{2} m v^2 + pV + p_0 V = \frac{1}{2} \rho v^2 + p_0 = \text{const}$$

stationärer Druck, Druck bei $v=0$



- Bunsenbrenner, Wasserstrahlpumpe

- laminare Strömung

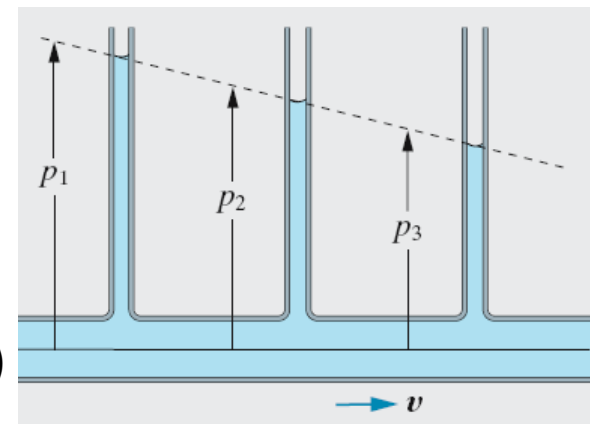
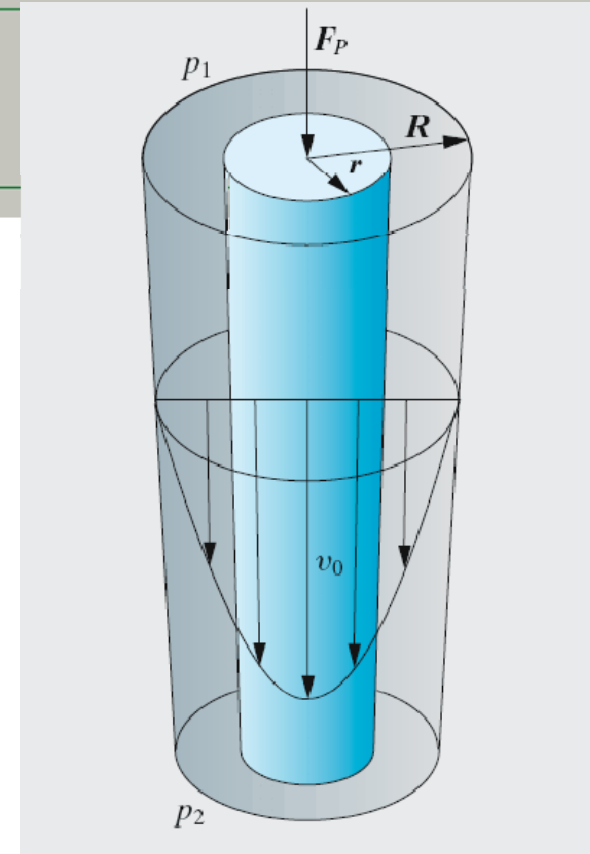
- dünne Flüssigkeitsschichten gleiten übereinander (Stokesreibung)
- Druckkraft proportional Druckdifferenz um Volumen – Geschwindigkeitsverteilung im Rohr $v = (p_1 - p_2)(R^2 - r^2) / 4\eta l$
Volumenstrom (im Rohr):

$$\dot{V} = \pi(p_1 - p_2)R^4 / 8\eta l \quad (\text{Hagen-Poiseuille})$$

$$\text{Strömungswiderstand} \quad 8\eta l / \pi R^4$$

- **Strömungswiderstand** (Beiwert c_W)

- turbulent $F_R = \frac{1}{2}c_W\rho Av^2$
- Druckabfall in Rohr
- Kirchhofsche Gesetze:
 - Gesamtstrom ist konstant (vor/hinter Verzweigung)
 - Strom in Zweig prop. Widerstand



- Turbulente Strömung

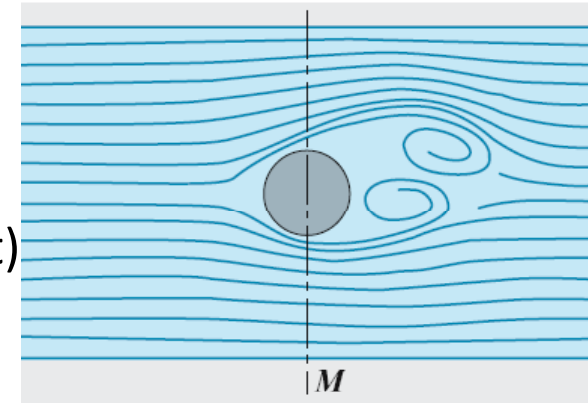
- bei kritischer Geschwindigkeit durchmischen sich benachbarte Schichten \Rightarrow Wirbel (Schwankungen der Strömungsgeschwindigkeit)

- Reynolds-Zahl
$$\text{Re} = \frac{l \bar{v} \rho}{\eta} = \frac{l \bar{v}}{\nu}$$

ν ...kinematische Viskosität

Re=Trägheitskraft / Reibungskraft

- $\text{Re} < \text{Re}_{\text{krit}}$ laminar $\text{Re} > \text{Re}_{\text{krit}}$ turbulent
- Strömung in Flüssen, hinter Fahrzeug, in Heizungs- und Kühlrohren



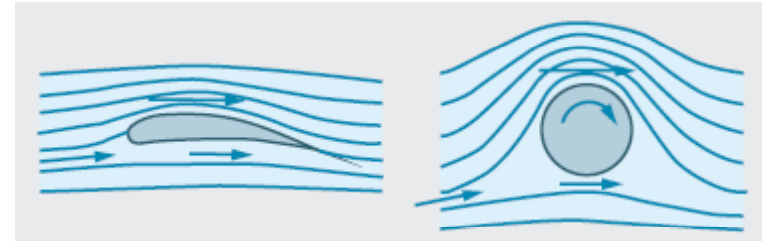
Körper	c_w
Halbkugel offen	1,33 / 0,35
Halbkugel geschlossen	1,17 / 0,4
Platte, eben	1,11
Stromlinienkörper (Tropfenform)	0,05
PKW	0,28 ... 0,4



	v [m/s]	d [m]	ρ [kg/m ³]	η [Ns/m ²]	Re	
Bach	1-10	1 m	10^3	10^{-3}	$10^6..10^7$	turbulent
Wasserleitung	0,1-1	0,01	10^3	10^{-3}	$10^3..10^4$	Übergang
Aorta	0,1	0,015	10^3	$8 \cdot 10^{-3}$	200	laminar
Atemwege	15	0,005	1,3	$2 \cdot 10^{-5}$	10^4	turbulent



- **rotierender Zylinder:**
- Zirkulationsströmung:



oberhalb	unterhalb	Zylinder
erhöhte	erniedrigte	Strömungsgeschwindigkeit
geringerer	erhöhter	Druck (Bernoulli!)

⇒ Auftriebskraft (Magnuseffekt)

"Anschneiden, Spin" von Fußbällen, Tennisbällen etc.

- Umströmung von **Tragflächen**
Auftriebskraft $F_a = c_a A \rho v^2 / 2$
- Auftriebsbeiwert ungefähr abhängig von Form, Anstellwinkel
Korrektur für endl. Länge des Flügels, Randeffekte (Wirbel)



- Ruhende Flüssigkeiten
 - Druck
 - Dichte
 - Auftrieb
- Grenzflächeneffekte
 - Oberflächen- Grenzflächenspannung
 - Reibung, Viskosität
- Bewegte Flüssigkeiten
 - Strömungen
 - Widerstand(sbeiwert)
 - laminar – turbulent (Reynoldszahl)
 - dynamischer Auftrieb