

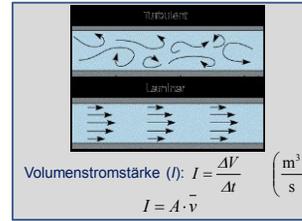
Medizinische Biophysik 2018. 04. 11.

Transportprozesse

II. Strömungen (Volumentransport) Fortsetzung

4. Strömung von reellen Flüssigkeiten

- Newtonsches Reibungsgesetz
- Viskosität → Anwendung: Viskosität von Körperflüssigkeiten
- Kritische Geschwindigkeit → Anwendung: **Atmung/Blutströmung**
- **Transportgesetz** (Hagen-Poiseuille-Gesetz)
Anwendung: **Atmung/Blutströmung**

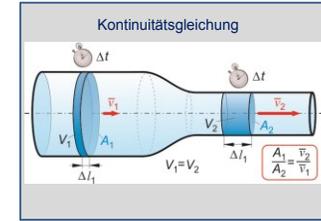


Ideale Flüssigkeit (ohne innere Reibung)



Bernoullische Gleichung

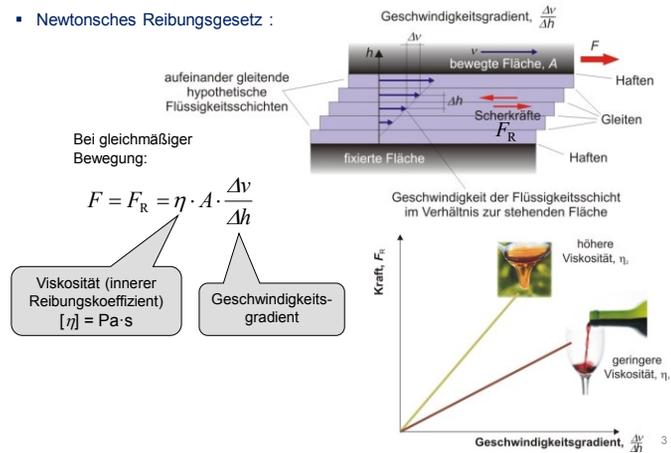
$$p + \frac{1}{2} \rho \cdot v^2 + \rho \cdot g \cdot h = \text{konstant}$$



- Wie kann die innere Reibung bei der Strömung einer reellen Flüssigkeit beschrieben werden?
- Ist eine gewisse Strömung laminar oder turbulent?
- Was treibt die Strömung?
- Wovon hängt die Stromstärke der Strömung ab?

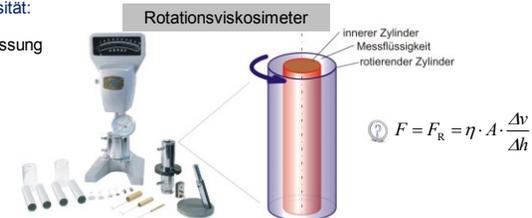
4. Strömung von reellen Flüssigkeiten

- Reelle Flüssigkeit: innere Reibung ist nicht vernachlässigbar
- Newtonsches Reibungsgesetz :



Viskosität:

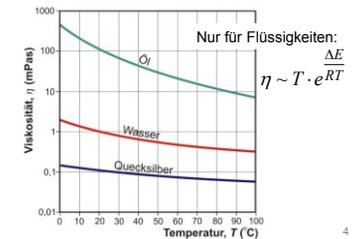
➤ Messung



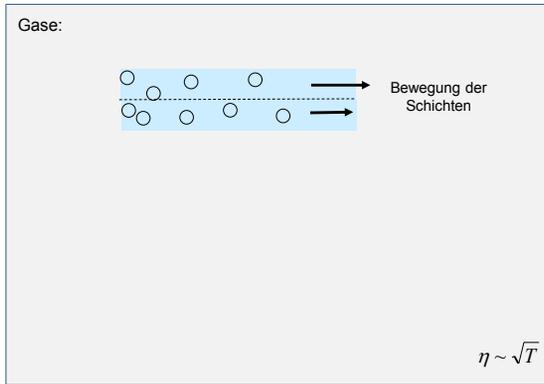
➤ stoffspezifisch

Stoff	η (mPa·s) 20 °C
Luft	(101 kPa) 0,019
Wasser	1
Äthanol	1,2
Blut (37 °C)	2–8
Glyzerin	1490
Honig	2000–14000

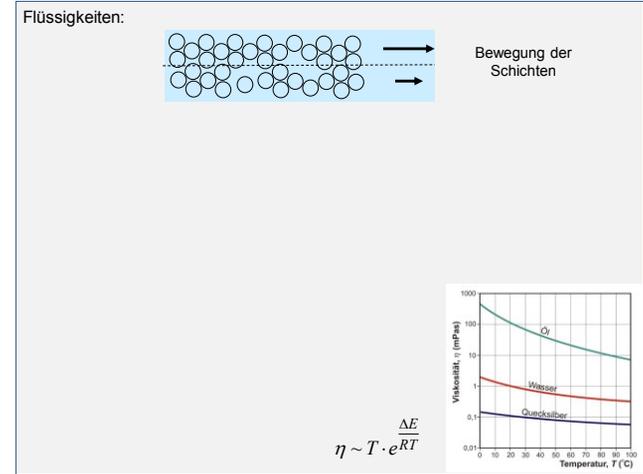
➤ temperaturabhängig



Ausführlicher über den Mechanismus der inneren Reibung :



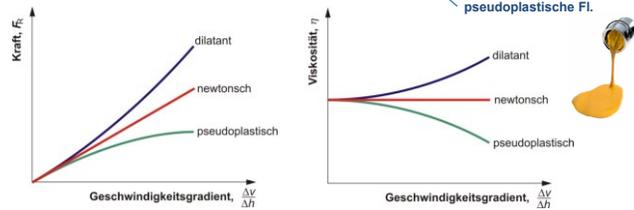
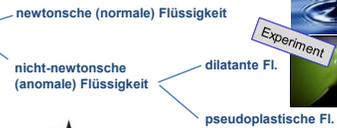
5



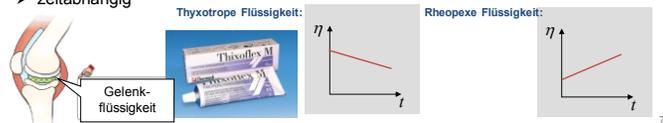
6

▪ Viskosität: > geschwindigkeitsgradientabhängig

Einteilung der Flüssigkeiten



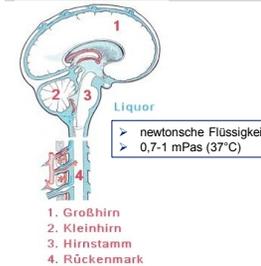
> zeitabhängig



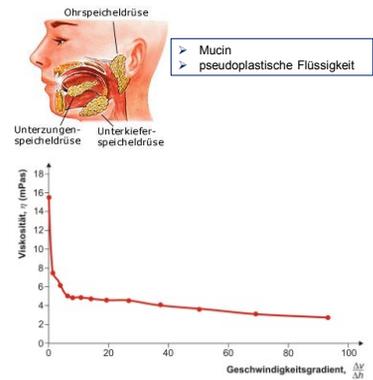
7

Viskosität der Körperflüssigkeiten

Liquor (Gehirn-Rückenmarks-Flüssigkeit, Cerebrospinalflüssigkeit)



Speichel



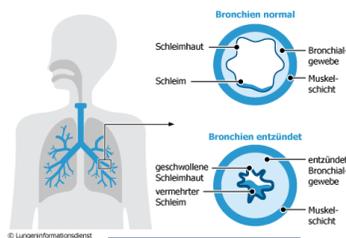
8

Gelenkflüssigkeit



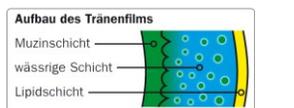
➤ Hyaluronsäure
➤ stark pseudoplastische Flüssigkeit

Bronchialschleim



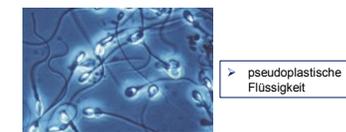
➤ pseudoplastische Flüssigkeit

Träne



➤ pseudoplastische Flüssigkeit
➤ 1-10 mPas

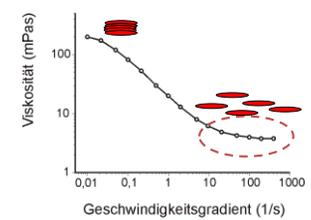
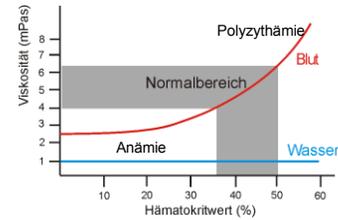
Sperma



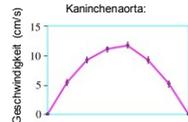
➤ pseudoplastische Flüssigkeit

Viskosität des Blutes

- bei Körpertemperatur und bei physiologischen Strömungsverhältnissen: 2-10 mPa·s
- hängt von der Temperatur ab (wie bei jeder Flüssigkeit)
- hängt sehr stark von dem Hämatokritwert des Blutes ab
- hängt vom Geschwindigkeitsgradienten ab, und zwar pseudoplastisch
- hängt vom Blutgefäßdurchmesser ab, in kleineren Gefäßen (< 1 mm) ist die Viskosität kleiner (Fahraeus-Lindqvist-Effekt)

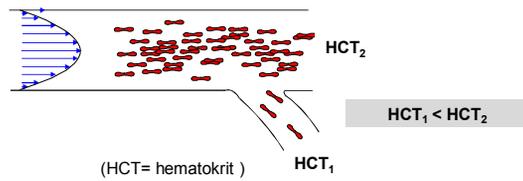


Geschwindigkeitsprofil von reellen Flüssigkeiten:

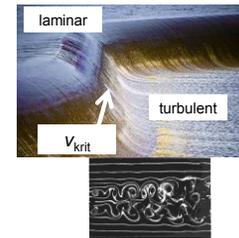
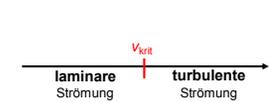


Eine physiologische Folgerung: Plasma-Skimming

Parabolisches Geschwindigkeitsprofil + Bernoulli'sche Gleichung



Kritische Geschwindigkeit (v_{krit}):

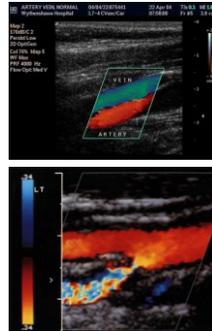


Osborne Reynolds
1842-1912
Physiker und
Wasseringenieur

$$v_{krit} = Rc \cdot \frac{\eta}{\rho \cdot r}$$

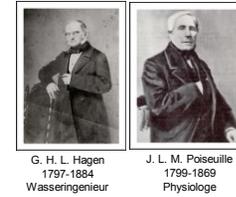
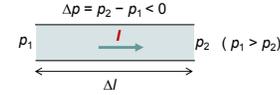
Reynolds-Zahl (für glatte Wand: Re = 1160)
Viskosität
Dichte
Radius des Rohres

Ist die Blutströmung laminar oder turbulent? ?



Ist die Strömung der Luft bei Atmung laminar oder turbulent? ?

- Was treibt die Strömung?
- Wovon hängt die Volumenstromstärke der Strömung ab?
- **Transportgesetz (Hagen-Poiseuille-Gesetz):**



$$I = \frac{\Delta V}{\Delta t} = -\frac{\pi}{8} \frac{1}{\eta} R^4 \frac{\Delta p}{\Delta l}$$

Labels: Stromstärke, Druckgradient, Viskosität, Radius

Allgemeine Gültigkeitsvoraussetzungen:

- inkompressible Flüssigkeit/Gas
- laminare Strömung

Weitere Gültigkeitsvoraussetzungen:

- stationäre Strömung
- newtonsche Flüssigkeit/Gas

13

14

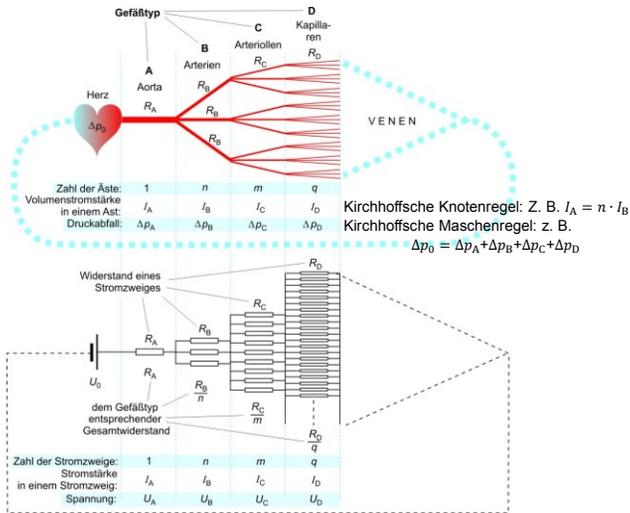
Analogie zwischen den zwei Transportprozessen:

<p>Strömung</p> $I = \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad \left(\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right)$ $J = \frac{\Delta V}{A \cdot \Delta t} \quad \left(\frac{\text{m}}{\text{s}} \right)$ $I = -\frac{\pi}{8} \frac{1}{\eta} R^4 \frac{\Delta p}{\Delta l}$ $J = -\frac{R^2}{8\eta} \frac{\Delta p}{\Delta l}$ $\Delta p = \frac{8\eta}{R^2} \frac{\Delta l}{R^2} I$ $R_{\text{Strömung}} = \frac{8\eta}{R^2} \frac{\Delta l}{A}$	<p>← Stromstärke →</p> <p>← Stromdichte →</p> <p>← H-P-Gesetz ohmsches Gesetz →</p>	<p>elektrischer Strom</p> $I = \frac{\Delta q}{\Delta t} \quad (\text{A})$ $J = \frac{\Delta q}{A \cdot \Delta t} \quad \left(\frac{\text{A}}{\text{m}^2} \right)$ $I = -\sigma \cdot A \cdot \frac{\Delta \varphi}{\Delta l}$ $J = -\sigma \frac{\Delta \varphi}{\Delta l}$ $U = R \cdot I$ $R = \rho \frac{\Delta l}{A}$
<p>„Strömungsleitfähigkeit“</p> <p>„Strömungswiderstand“</p>		<p>Potenzialdifferenz = Spannung (U)</p> <p>Elektrische Leitfähigkeit</p> <p>Elektrischer Widerstand</p>

15

<p>Strömung</p>	<p>← Kontinuitätsgleichung →</p> <p>← Kirchhoffsche Knotenregel →</p>	<p>elektrischer Strom</p>
$I_1 = I_2 = I_2' + I_2''$ $A_1 \cdot \bar{v}_1 = (A_2' + A_2'') \cdot \bar{v}_2$ <p>In einem geschlossenen Strömungskreis: $\sum \Delta p = 0$</p>	<p>← Kirchhoffsche Maschenregel →</p>	$I_1 = I_2 = I_2' + I_2''$ <p>In einem geschlossenen Stromkreis: $\sum U = 0$</p> <p>Summationsregel der Widerstände</p> $\left(\begin{aligned} R_{\text{gesamt}} &= R_1 + R_2 + \dots \\ \frac{1}{R_{\text{gesamt}}} &= \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots \end{aligned} \right)$

16

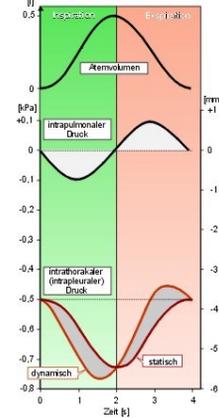


17

Anwendung des H-P-Gesetzes: Atmung

Ist das H-P-Gesetz anwendbar für die Atmung?

- inkompressible Luft? 🤔
- laminare Strömung? 🤔
- stationäre Strömung? 🤔
- newtonsches Gas? 🤔



Das H-P-Gesetz ist mit guter Annäherung anwendbar!

Regulation der Volumenstromstärke laut Hagen-Poiseuille-Gesetzes:

➢ Druck (Δp)

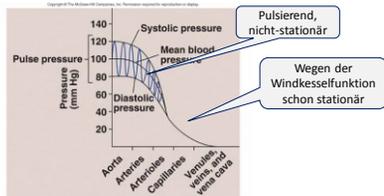
- Intrapulmonaler Druck (Δp) kann in einem Atemzyklus stark geändert werden: 0,1 kPa – 0,5 kPa
- Der Durchschnittswert des intrapulmonalen Druckes ($\bar{\Delta p}$) für die Einatmung kann durch die Atemfrequenz geändert werden: 12 1/min – 40 1/min

➢ ~~Radius (R^4)~~

18

Anwendung: Blutkreislauf

Ist das H-P-Gesetz anwendbar für die Blutströmung?



- inkompressible Fl.? 🤔
- laminare Strömung? 🤔
- stationäre Strömung? 🤔
- newtonsche Fl.? 🤔

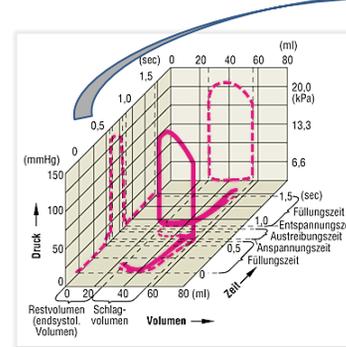
Folgerung: Das H-P-Gesetz ist nur annähernd anwendbar! Doch zeigt das Gesetz richtig, wie die Blutströmung reguliert werden kann.

19

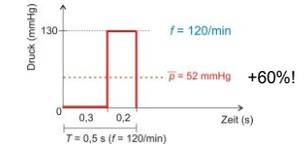
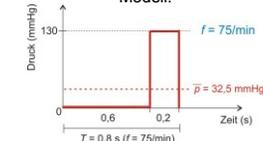
Anwendung: Blutkreislauf

Regulation der Volumenstromstärke laut Hagen-Poiseuille-Gesetzes:

➢ Druck (Δp)



Modell:



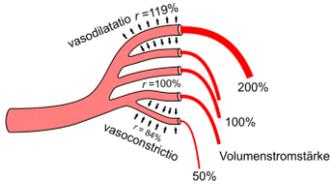
Der Durchschnittswert ($\bar{\Delta p}$) kann durch die Pulszahl geändert werden!

20

Anwendung: Blutkreislauf

Regulation der Volumenstromstärke laut Hagen-Poiseuille-Gesetzes:

➤ Radius (R^4 !)



Regulation der Druckverhältnisse im Blutkreislauf laut Hagen-Poiseuille-Gesetzes:

$$\Delta p = \frac{8\eta}{R^2} \frac{\Delta l}{A} I$$

„Strömungswiderstand“

$$R_{\text{Strömung}} = \frac{8\eta}{R^2} \frac{\Delta l}{A}$$

Durch Gefäßverengung (Vasokonstriktion) wird der Strömungswiderstand und dadurch auch der Druckabfall stark erhöht (falls die gleiche Stromstärke durch das Herz aufrechterhalten wird).

Wo, in welchem Abschnitt des Blutkreislauf kann diese Regulation am effektivsten stattfinden? [S. Fortsetzung](#)