

Medizinische Biophysik 2018. 04. 11.

Transportprozesse

II. Strömungen (Volumentransport) Fortsetzung

4. Strömung von reellen Flüssigkeiten

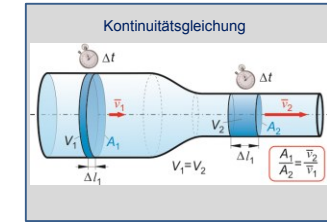
- Newtonsches Reibungsgesetz
- Viskosität → Anwendung: Viskosität von Körperflüssigkeiten
- Kritische Geschwindigkeit → Anwendung: **Atmung/Blutströmung**
- **Transportgesetz** (Hagen-Poiseuille-Gesetz)
Anwendung: **Atmung/Blutströmung**

Volumenstromstärke (I): $I = \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad \left(\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right)$

$$I = A \cdot v$$

Ideale Flüssigkeit (ohne innere Reibung)

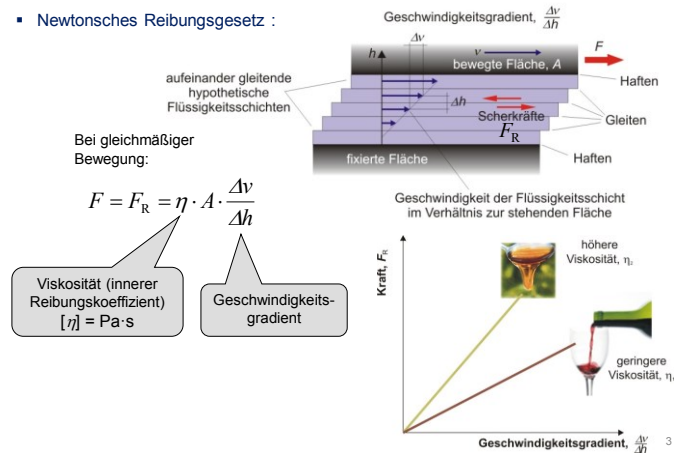
Bernoulli'sche Gleichung

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


- 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?

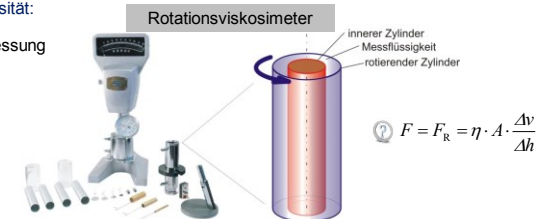
4. Strömung von reellen Flüssigkeiten

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



Viskosität:

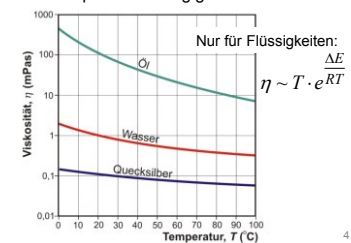
➤ Messung



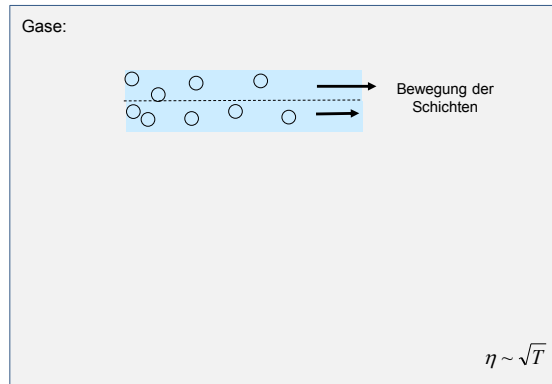
➤ stoffspezifisch

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

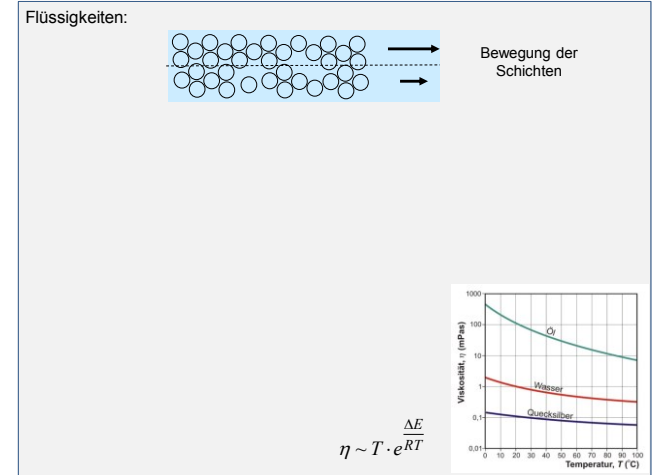
➤ temperaturabhängig



Ausführlicher über den Mechanismus der inneren Reibung :



5



6

- Viskosität: > geschwindigkeitsgradientabhängig

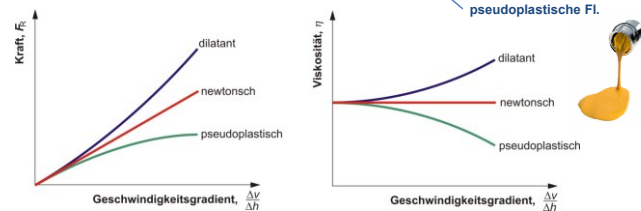
Einteilung der Flüssigkeiten

newtonsche (normale) Flüssigkeit

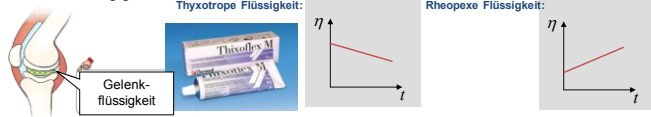
nicht-newtonsche (anomale) Flüssigkeit

dilatante Fl.

pseudoplastische Fl.



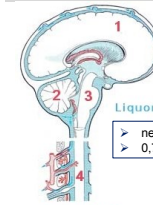
- > zeitabhängig



7

Viskosität der Körperflüssigkeiten

Liquor (Gehirn-Rückenmarks-Flüssigkeit, Cerebrospinalflüssigkeit)

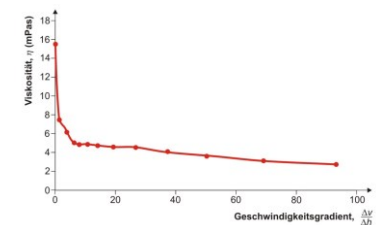


- > newtonsche Flüssigkeit
- > 0,7-1 mPa (37°C)

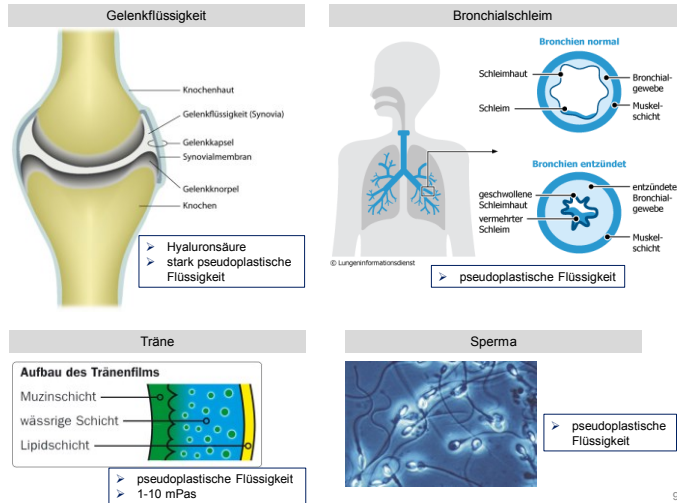
Speichel



- > Mucin
- > pseudoplastische Flüssigkeit

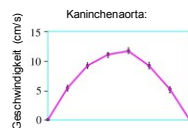
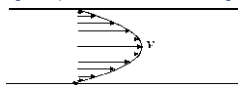


8



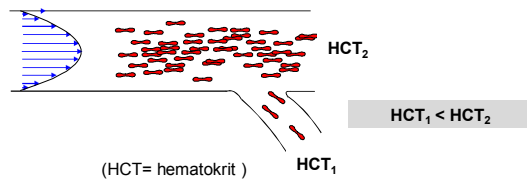
9

▪ Geschwindigkeitsprofil von reellen Flüssigkeiten:



Eine physiologische Folgerung: Plasma-Skimming

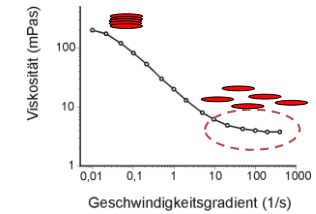
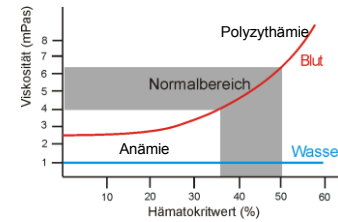
Parabolisches Geschwindigkeitsprofil + Bernoulli'sche Gleichung



11

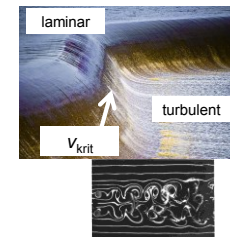
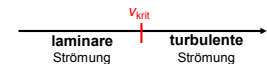
Viskosität des Blutes

- 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)



10

▪ Kritische Geschwindigkeit (v_{krit}):



Osborne Reynolds
1842-1912
Physiker und
Wasseringenieur

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

Reynolds-Zahl (für glatte Wand: $Re = 1160$)

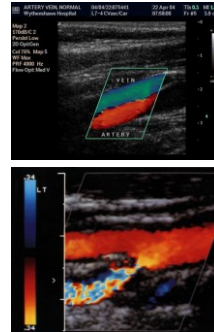
Viskosität

Dichte

Radius des Rohres

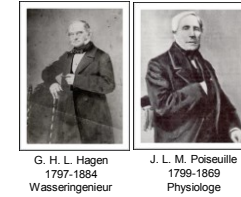
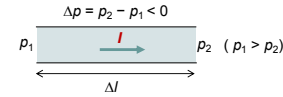
12

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):**



Stromstärke

Druckgradient

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

Viskosität

Radius

Allgemeine Gültigkeitsvoraussetzungen:

- inkompressible Flüssigkeit/Gas
- laminare Strömung

Weitere Gültigkeitsvoraussetzungen:

- stationäre Strömung
- newtonsche Flüssigkeit/Gas

Analogie zwischen den zwei Transportprozessen:

Strömung		elektrischer Strom
$I = \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad \left(\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right)$	← Stromstärke →	$I = \frac{\Delta q}{\Delta t} \quad (\text{A})$
$J = \frac{\Delta V}{A \cdot \Delta t} \quad \left(\frac{\text{m}}{\text{s}} \right)$	← Stromdichte →	$J = \frac{\Delta q}{A \cdot \Delta t} \quad \left(\frac{\text{A}}{\text{m}^2} \right)$
$I = -\frac{\pi}{8} \frac{1}{\eta} R^4 \frac{\Delta p}{\Delta l}$	← H-P-Gesetz ohmsches Gesetz →	$I = -\sigma \cdot A \cdot \frac{\Delta \varphi}{\Delta l}$
$J = -\frac{R^2}{8\eta} \frac{\Delta p}{\Delta l}$		$J = -\sigma \frac{\Delta \varphi}{\Delta l}$
$\Delta p = \frac{8\eta}{R^2} \frac{\Delta l}{\pi} I$		$U = R \cdot I$
$R_{\text{Strömung}} = \frac{8\eta}{R^2} \frac{\Delta l}{A}$		$R = \rho \frac{\Delta l}{A}$

Potenzialdifferenz = Spannung (U)

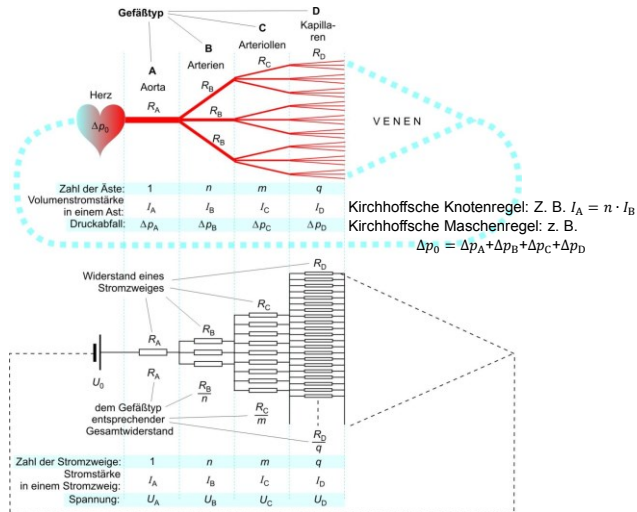
„Strömungs-leitfähigkeit“

„Strömungs-widerstand“

Elektrische Leitfähigkeit

Elektrischer Widerstand

Strömung		elektrischer Strom
$I_1 = I_2 = I_2' + I_2''$	← Kontinuitäts-gleichung →	$I_1 = I_2 = I_2' + I_2''$
$A_1 \cdot \vec{v}_1 = (A_2' + A_2'') \cdot \vec{v}_2$	← kirchhoffsche Knotenregel →	
In einem geschlossenen Strömungskreis: $\sum \Delta p = 0$	← kirchhoffsche Maschenregel →	In einem geschlossenen Stromkreis: $\sum U = 0$
Summationsregel der Widerstände		
$\begin{pmatrix} R_{\text{gesamt}} = R_1 + R_2 + \dots \\ \frac{1}{R_{\text{gesamt}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots \end{pmatrix}$		



17

Anwendung des H-P-Gesetzes: Atmung

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

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

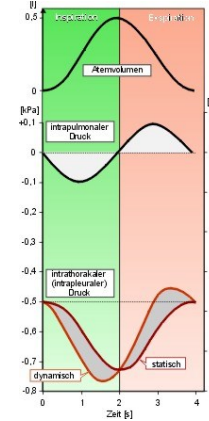
Das H-P-Gesetz ist mit guter Annäherung anwendbar!

- 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

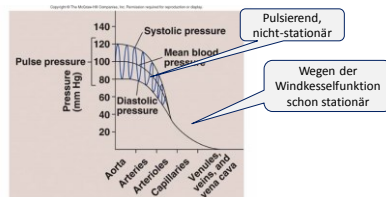
➤ ~~Radius (R^4)~~



18

Anwendung: Blutkreislauf

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



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

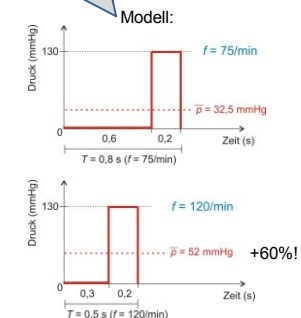
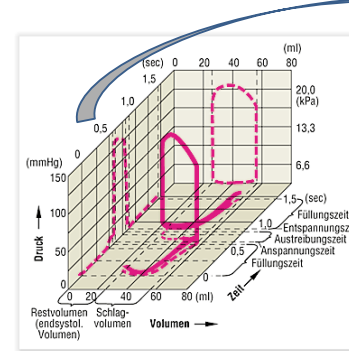
Folgerung: Das H-P-Gesetz ist nur annähernd anwendbar!
 Doch zeigt das Gesetz richtig, wie die Blutströmung reguliert werden kann.

19

Anwendung: Blutkreislauf

- Regulation der Volumenstromstärke laut Hagen-Poiseuille-Gesetzes:

➤ Druck (Δp)



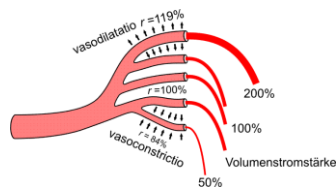
Der Durchschnittswert ($\bar{\Delta p}$) kann durch die Pulszahl geändert werden!

20

Anwendung: Blutkreislauf

- Regulation der Volumenstromstärke laut Hagen-Poiseuille-Gesetzes:

➤ Radius (R^4 !)



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

$$\Delta p = 4 \frac{8\eta}{R^2} \frac{\Delta l}{A} I$$

„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](#)

21