

Medizinische Biophysik 2016. 03. 20.

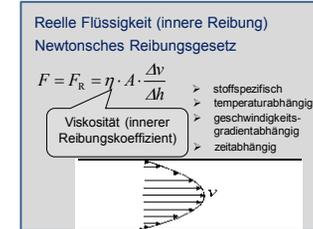
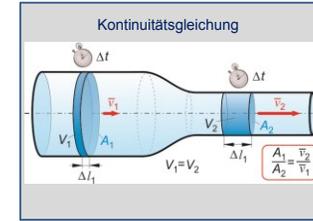
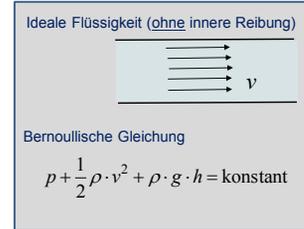
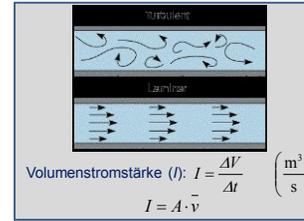
Transportprozesse

I. Strömungen (Volumentransport) Fortsetzung

4. Strömung von reellen Flüssigkeiten
- Kritische Geschwindigkeit → Anwendung: **Blutströmung**
 - Transportgesetz (Hagen-Poiseuille-Gesetz)
Anwendung: **Blutströmung**

II. Diffusion (Stofftransport)

1. Grundbegriffe Stoffstromstärke, -dichte
2. Transportgesetz = 1. Ficksches Gesetz
- Diffusionskoeffizient, Einstein-Stokes-Gleichung
 - chemisches Potenzial für Lösungen:



- Ist eine gewisse Strömung laminar oder turbulent?
- Was treibt die Strömung?
- Wovon hängt die Stromstärke der Strömung ab?

4. Strömung von reellen Flüssigkeiten

- Kritische Geschwindigkeit (v_{krit}):



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

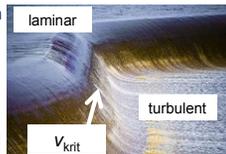
$$v_{\text{krit}} = Re \cdot \frac{\eta}{\rho \cdot r}$$

Viskosität

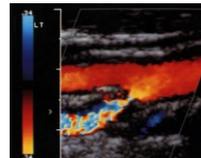
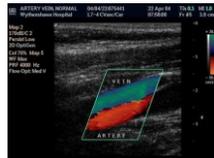
Dichte

Radius des Rohres

Ist die Blutströmung laminar oder turbulent? ?



Osborne Reynolds
1842-1912
Physiker und Wasseringenieur



- Was treibt die Strömung?
- Wovon hängt die Volumenstromstärke der Strömung ab?

- Transportgesetz (Hagen-Poiseuille-Gesetz):

$$\Delta p = p_2 - p_1 < 0$$



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

Stromstärke

Druckgradient

Viskosität

Radius



G. H. L. Hagen
1797-1884
Wasseringenieur

J. L. M. Poiseuille
1799-1869
Physiologe

Weitere Gültigkeitsvoraussetzungen:

- stationäre Strömung
- newtonsche Flüssigkeit

Alternativform:

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

Stromdichte

„Strömungsleitfähigkeit“

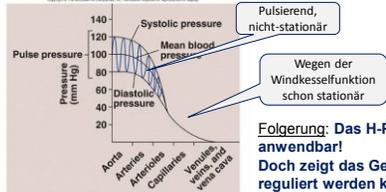
Strömungswiderstand ($R_{\text{Strömung}}$):

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

(siehe elektrischen Widerstand!)

Anwendung: Blutkreislauf

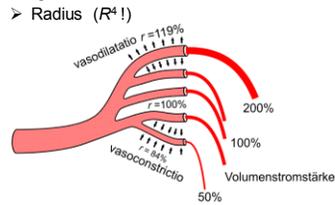
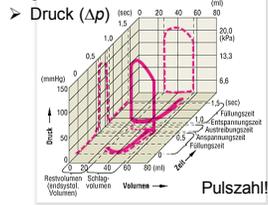
- Ist das H-P-Gesetz anwendbar für die Blutströmung?



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

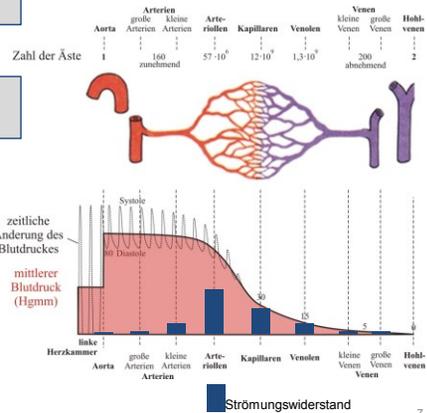
- inkompressible Fl.?
- laminare Strömung?
- stationäre Strömung?
- newtonsche Fl.?

- Regulation der Volumenstromstärke laut Hagen-Poiseuille-Gesetzes:



Die Blutströmung wird aufgrund des Hagen-Poiseuille-Gesetzes durch Δp , r und r reguliert.

Der Strömungswiderstand ist im Bereich der Arteriolen und Kapillaren am größten.



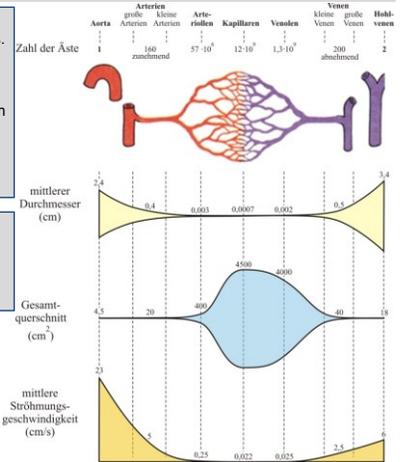
Zusammenfassend über Blut und Blutströmung

Das Blut ist eine reelle Flüssigkeit mit einer Viskosität von 2-10 mPa·s. Die Viskosität hängt

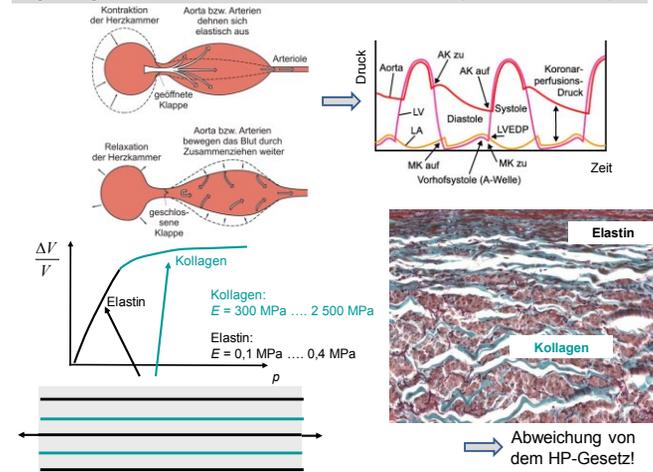
- von der Temperatur,
- vom Hämokritwert,
- vom Geschwindigkeitsgradienten (pseudoplastische Flüssigkeit),
- und vom Blutgefäßdurchmesser ab.

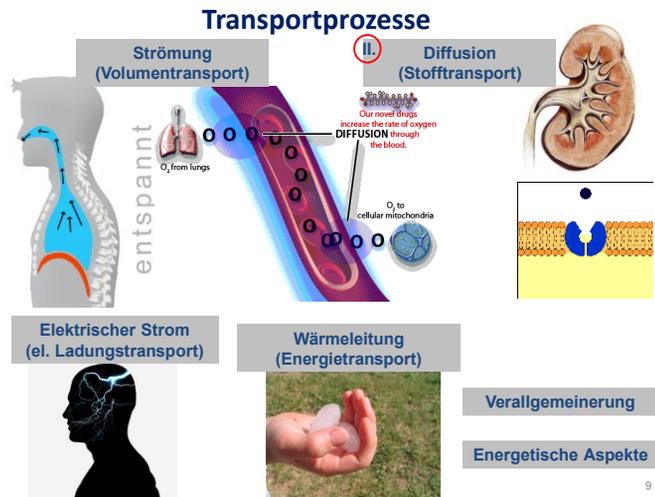
Die Blutströmung ist

- laminar ($v < v_{crit}$),
- in dem ersten Abschnitt des Blutkreislaufs nicht-stationär, später schon stationär.



Ergänzung: Rolle der Elastizität der Aorta und der Arterien (Windkesselfunktion)





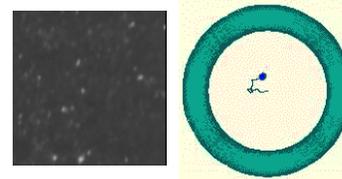
II. Diffusion (Stofftransport)



Diffusion: Tendenz zur gleichmäßigen Verteilung von Molekülen durch die thermische Bewegung

0. Grundvoraussetzung: thermische Molekularbewegung

brownsche Bewegung

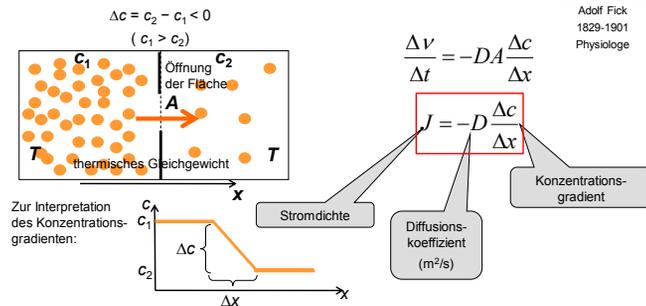


10

1. Grundbegriffe

- Stoffstromstärke (I): (Diffusionsstromstärke) $I = \frac{\Delta v}{\Delta t} \left(\frac{\text{mol}}{\text{s}} \right)$
- Stoffstromdichte (J): (Diffusionsstromdichte) $J = \frac{\Delta v}{A \cdot \Delta t} \left(\frac{\text{mol}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}} \right)$
- stationäre Diffusion: zeitlich konstant

2. Transportgesetz = 1. Ficksches Gesetz



Analogie

	Was strömt?	Stärke?	Was treibt die Strömung?	Zusammenhang?
Volumentransport	V	$J_V = \frac{\Delta V}{A \cdot \Delta t}$	p	$J_V = -\frac{R^2 \Delta p}{8\eta \Delta l}$
Stofftransport	v	$J_v = \frac{\Delta v}{A \cdot \Delta t}$	c	$J_v = -D \frac{\Delta c}{\Delta x}$

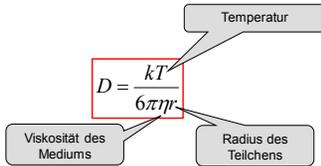
12

▪ Diffusionskoeffizient:

- ☐ stoffspezifisch
 - diffundierendes Molekül
 - Medium (η)
- ☐ temperaturabhängig
 - Größe
 - Form

➤ **Einstein-Stokes-Gleichung**

(Diffusionskoeffizient von kugelförmigen Teilchen):

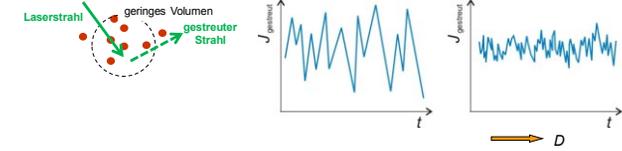


(Kontrollfrage: Wie hängt D von der Temperatur ab?)

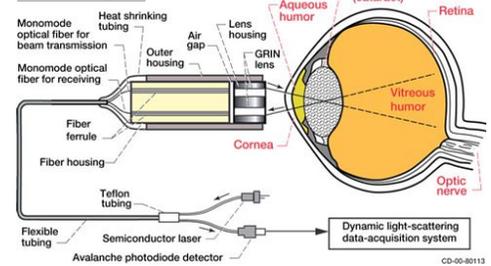
Diffundierendes Teilchen (Molmasse)	Medium	D (m ² /s)
H ₂ (2)	Luft	6,4·10 ⁻⁵
O ₂ (32)	Luft	2·10 ⁻⁵
CO ₂ (44)	Luft	1,8·10 ⁻⁵
H ₂ O (18)	Wasser	2,2·10 ⁻⁹
O ₂ (32)	Wasser	1,9·10 ⁻⁹
Glyzin (75)	Wasser	0,9·10 ⁻⁹
Serum Albumin (69 000)	Wasser	6·10 ⁻¹¹
Tropomyosin (93 000)	Wasser	2,2·10 ⁻¹¹
Tabakmosaikvirus (40 000 000)	Wasser	4,6·10 ⁻¹²

➤ Messung des Diffusionskoeffizienten:

eine Möglichkeit – dynamische Lichtstreuungsmessung



Zur Erinnerung:



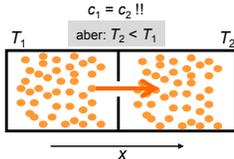
$$D = \frac{kT}{6\pi\eta r}$$

↓
Teilchengröße

13

14

▪ Ohne thermisches Gleichgewicht:



Temperaturinhomogenitäten können zur Diffusion führen. Man braucht also zur allgemeineren Beschreibung der Diffusion statt der Konzentration eine Größe, die einerseits die Konzentration, andererseits aber auch die Temperatur enthält.

Konzentration (c) \Rightarrow chemisches Potenzial (μ)

chemisches Potenzial für Lösungen:

Referenzlösung



$$\mu = \mu_0 + RT \ln \frac{c}{c_0} \quad [\mu] = \frac{J}{mol}$$

(Falls $c_0 = 1 \text{ mol/l}$, dann $\mu = \mu_0 + RT \ln c$)

Die Triebkraft der Diffusion im Allgemeinen: $-\frac{\Delta\mu}{\Delta x}$

15