

Medizinische Biophysik 2018. 04. 18.

Transportprozesse

II. Strömungen (Volumentransport) Fortsetzung

4. Strömung von reellen Flüssigkeiten
 - Zusammenfassung über das Blut und den Blutkreislauf
5. Bewegung von Teilchen in reellen Flüssigkeiten

III. Diffusion (Stofftransport)

1. Grundbegriffe Stoffstromstärke, -dichte
2. Transportgesetz = 1. Ficksches Gesetz
 - Diffusionskoeffizient, Einstein-Stokes-Gleichung
 - chemisches Potenzial für Lösungen
 - Anwendung : O_2 -Diffusion Lunge-Blut (Löslichkeit von Gasen, Henry-Gesetz)

Zusammenfassend über Blut und Blutströmung

Blut

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

Die Viskosität hängt

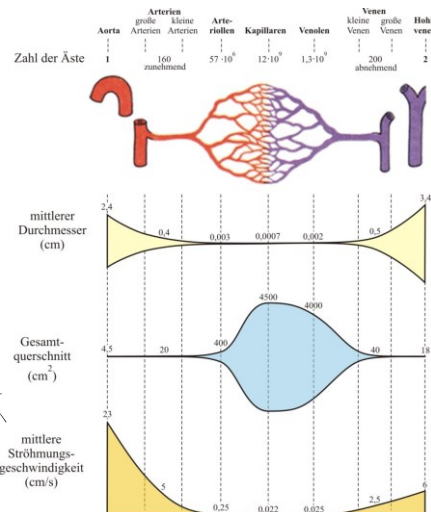
- vom Hämatokritwert,
- vom Geschwindigkeitsgradienten (pseudoplastische Flüssigkeit),
- vom Blutgefäßdurchmesser,
- und von der Temperaturab.

Blutströmung

Die Blutströmung ist

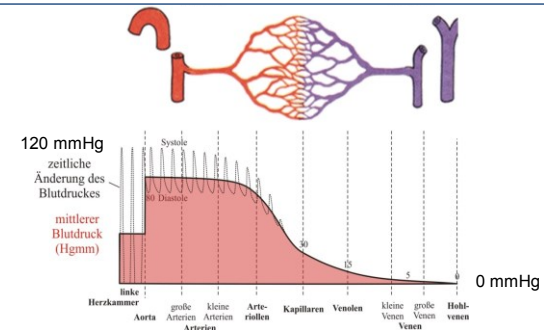
- überwiegend laminar ($v < v_{krit}$),
- in dem ersten Abschnitt des Blutkreislaufs nicht-stationär (pulsierend), später schon stationär.

Es gilt die Kontinuitätsgleichung:



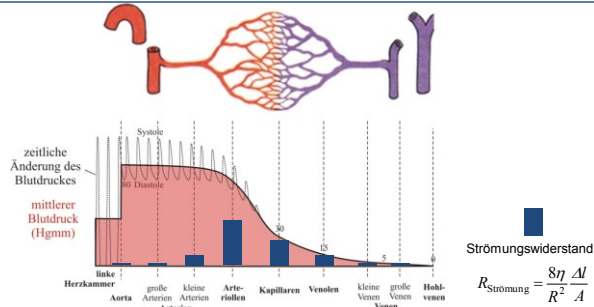
Die Blutströmung wird durch die Herzarbeit aufrecht erhalten: Durch Muskelkontraktion wird in dem linken Ventrikel (über dem atmosphärischen Druck (cca. 760 mmHg)) ein Überdruck erzeugt.

- Der Überdruck schwankt zwischen 0 und etwa 120 mmHg.
- Der Höchstdruckwert sinkt vom linken Ventrikel bis zum rechten Vorhof (0 mmHg).
- Der mittlere Blutdruck steigt vom linken Ventrikel bis zur Aorta (Klappen!), danach sinkt er bis zum rechten Vorhof.



Die Volumenstromstärke (Blutversorgung der Organe/Gewebe) wird aufgrund des Hagen-Poiseuille-Gesetzes durch

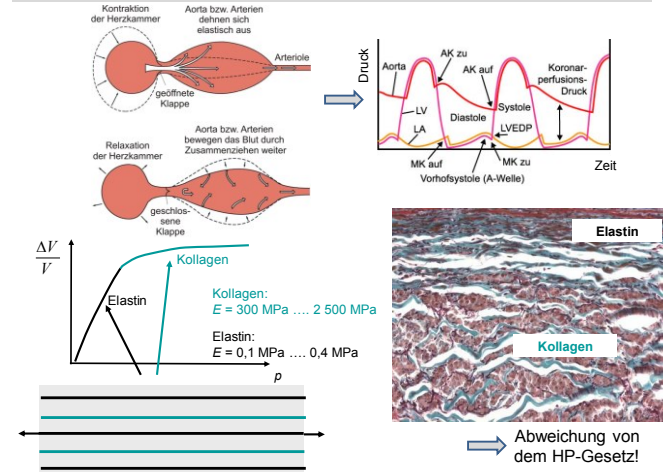
- Δp (durch Herzfrequenz!)
- und r (Gefäßweiterung bzw. Gefäßverengung; r^4 !) reguliert.



Der Strömungswiderstand ist im Bereich der Arteriolen am größten (=Widerstandgefäße).

Der periphere Gesamtwiderstand ($\frac{\Delta p}{I}$) ist die Summe aller Widerstände. Er kann am effektivsten im Bereich der Arteriolen reguliert werden. \Rightarrow Druckregulierung!

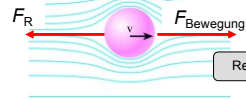
Ergänzung: Rolle der Elastizität der Aorta und der Arterien (Windkesselfunktion)



5. Bewegung von Teilchen in reellen Flüssigkeiten

Bei kleineren Geschwindigkeiten:

stokessches Reibungsgesetz:



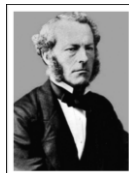
$$F_R = 6\pi\eta r v$$

Reibungskraft

Radius des kugelförmigen Teilchens

Viskosität

Geschwindigkeit des Teilchens



G. G. Stokes
1819-1903
Mathematiker
Physiker

Bei gleichmäßigen Bewegung: $F_{\text{Bewegung}} = F_R$

Beweglichkeit (u) eines Teilchens: $u = \frac{v}{F_{\text{Bewegung}}} \Rightarrow u = \frac{1}{6\pi\eta r} \Rightarrow$ s. Diffusion

III. Diffusion (Stofftransport)

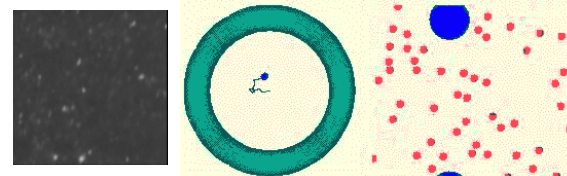


Diffusion: Tendenz zur gleichmäßigen Verteilung von Molekülen durch die thermische Bewegung

0. Grundvoraussetzung: thermische Molekularbewegung

brownsche Bewegung

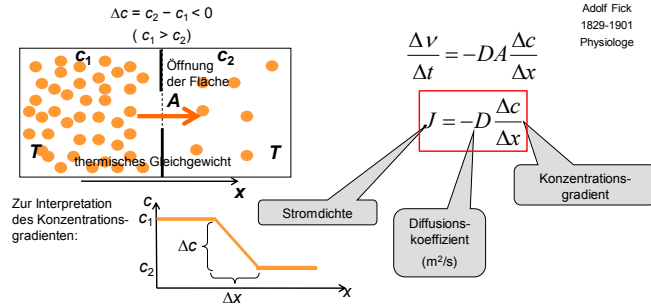
Molekularbewegung



1. Grundbegriffe

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

2. Transportgesetz = 1. Ficksches Gesetz



Analogie

	Was strömt?	Stärke?	Was treibt die Strömung?	Zusammenhang?
Ladungs-transport	q	$J_q = \frac{\Delta q}{A \cdot \Delta t}$	φ	$-\frac{\Delta \varphi}{\Delta l}$ $J_q = -\sigma \frac{\Delta \varphi}{\Delta l}$
Volumen-transport	V	$J_V = \frac{\Delta V}{A \cdot \Delta t}$	p	$-\frac{\Delta p}{\Delta l}$ $J_V = -\frac{R^2}{8\eta} \frac{\Delta p}{\Delta l}$
Stoff-transport	v	$J_v = \frac{\Delta v}{A \cdot \Delta t}$	c	$-\frac{\Delta c}{\Delta x}$ $J_v = -D \frac{\Delta c}{\Delta x}$

Diffusionskoeffizient:

Beweglichkeit des Teilchens $D = u k T$ Temperatur

stoffspezifisch

- diffundierendes Molekül – Größe
- Medium (η) – Form

temperaturabhängig

Einstein-Stokes-Gleichung

(Diffusionskoeffizient von kugelförmigen Teilchen):

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

Temperatur

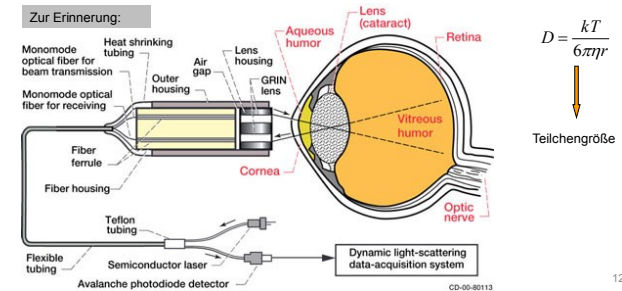
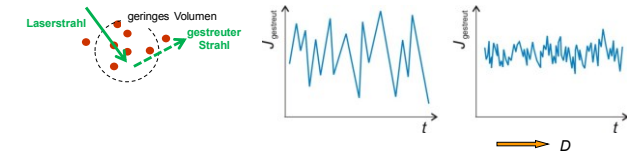
Viskosität des Mediums

Radius des Teilchens

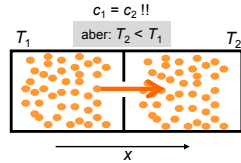
Diffundierendes Teilchen (Molmasse)	Medium	D (m^2/s)
H_2 (2)	Luft	$6,4 \cdot 10^{-5}$
O_2 (32)	Luft	$2 \cdot 10^{-5}$
CO_2 (44)	Luft	$1,8 \cdot 10^{-5}$
H_2O (18)	Wasser	$2,2 \cdot 10^{-9}$
O_2 (32)	Wasser	$1,9 \cdot 10^{-9}$
Glyzin (75)	Wasser	$0,9 \cdot 10^{-9}$
Serum Albumin (69 000)	Wasser	$6 \cdot 10^{-11}$
Tropomyosin (93 000)	Wasser	$2,2 \cdot 10^{-11}$
Tabakmosaik-virus (40 000 000)	Wasser	$4,6 \cdot 10^{-12}$

Messung des Diffusionskoeffizienten:

eine Möglichkeit – dynamische Lichtstreuungsmessung



- Ohne thermisches Gleichgewicht:

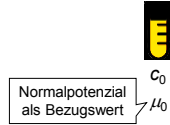


Temperaturinhomogenitäten können zur Diffusion führen. Man braucht also zur allgemeineren Beschreibung der Diffusion statt der Konzentration eine Größe, die einerseits die Konzentration, andererseits aber auch die Temperatur enthält.

Konzentration (c) \Rightarrow chemisches Potenzial (μ)

chemisches Potenzial für Lösungen:

Referenzlösung



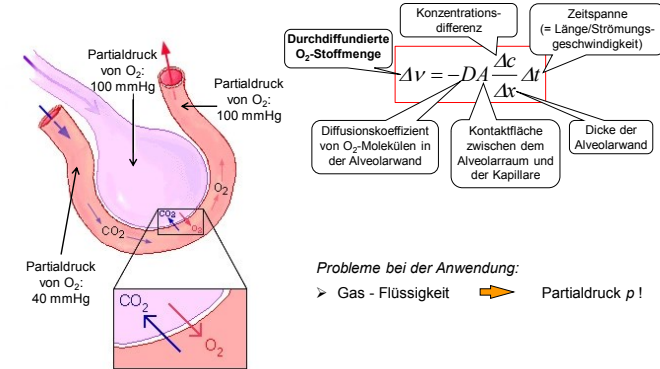
$$\mu = \mu_0 + RT \ln \frac{c}{c_0} \quad [\mu] = \frac{\text{J}}{\text{mol}}$$

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

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

13

Anwendung des 1. Fickschen Gesetzes für O_2 -Diffusion von Lunge ins Blut



14

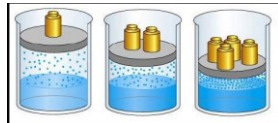
Löslichkeit von Gasen in Flüssigkeiten

Henry-Gesetz:

$c = k_H \cdot p$

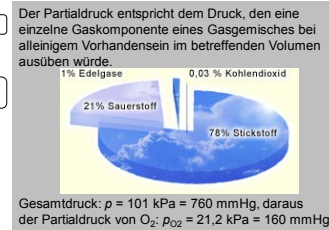
Konzentration in der Lösung
 Partialdruck im Gas
 Löslichkeitskoeffizient oder Henry-Konstante

- Voraussetzungen:
- Gleichgewicht
 - Dünne Lösung
 - Keine chemische Reaktion

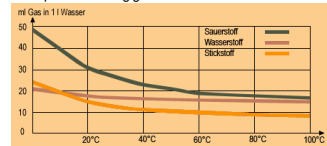


z. B. bei 25°C:

Gas	$k_H \left(\frac{\text{mol}}{\text{l} \cdot \text{kPa}} \right)$
O_2	$1,26 \cdot 10^{-5}$
N_2	$0,64 \cdot 10^{-5}$
CO_2	$33,2 \cdot 10^{-5}$



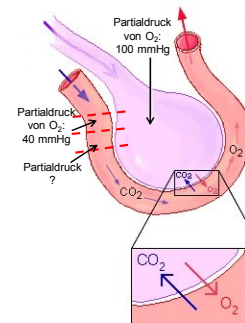
Temperaturabhängigkeit:



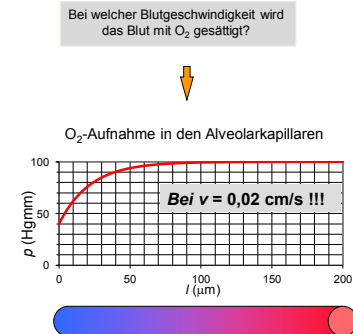
15

➤ Partialdruck im Blut wo?

Die Kapillare wird auf so kleine Abschnitte aufgeteilt, dass innerhalb eines Abschnittes der Partialdruck schon als konstant betrachtet werden kann. Das 1. Ficksche Gesetz wird dann für diese Abschnitte nacheinander verwendet. ➡ Excel



➤ Membran \approx Wasser



16