

Medizinische Biophysik

Transportprozesse

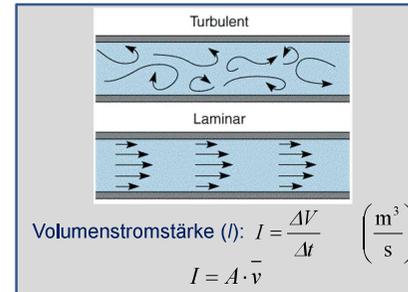
06.04.2020

I. 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**
- **Zusammenfassung über das Blut und den Blutkreislauf**

5. Bewegung von Teilchen in reellen Flüssigkeiten

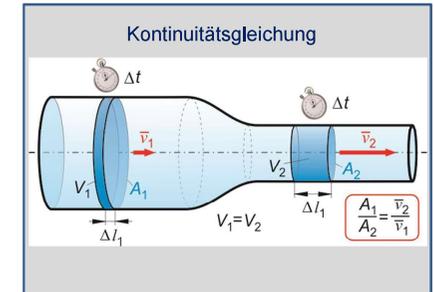


Ideale Flüssigkeit (ohne innere Reibung)



Bernoullische Gleichung

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



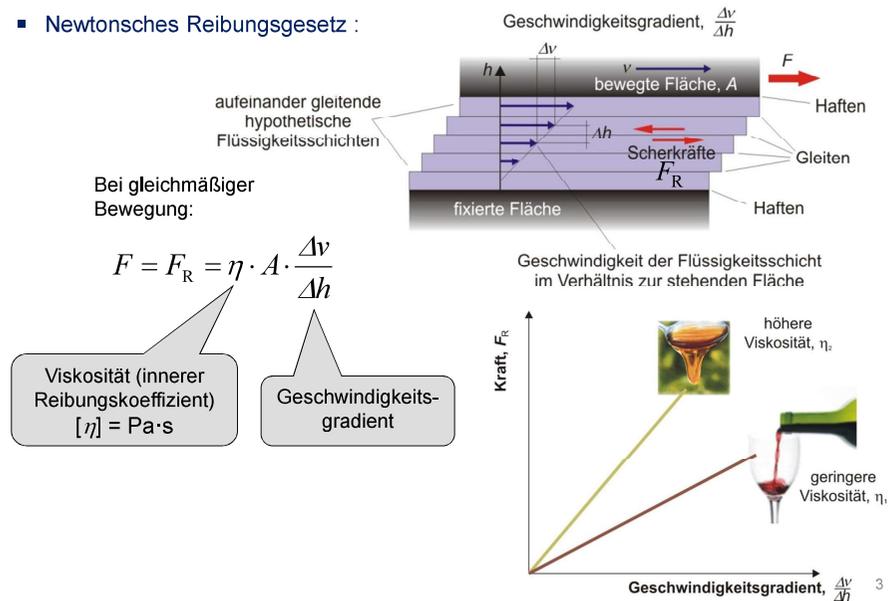
- Wie kann die innere Reibung bei der Strömung einer reellen Flüssigkeit beschrieben werden?
- Ist eine gewisse Strömung laminar oder turbulent?
- Was treibt die Strömung?
- Wovon hängt die Stromstärke der Strömung ab?

1

2

4. Strömung von reellen Flüssigkeiten

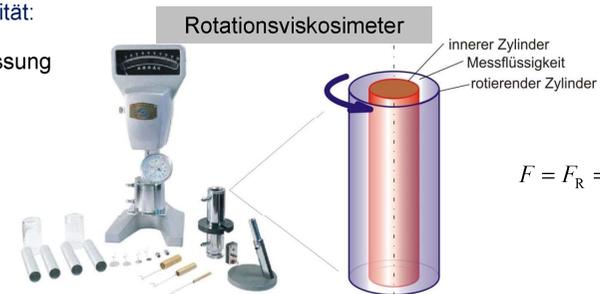
- Reelle Flüssigkeit: innere Reibung ist nicht vernachlässigbar
- Newtonsches Reibungsgesetz :



3

Viskosität:

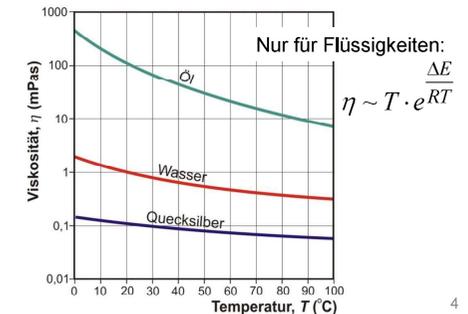
➤ Messung



➤ stoffspezifisch

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

➤ temperaturabhängig



4

Ausführlicher über den Mechanismus der inneren Reibung :

Gase:

Bewegung der Schichten

$T \uparrow \quad \eta \uparrow$

Flüssigkeiten:

Bewegung der Schichten

$T \uparrow \quad \eta \downarrow$

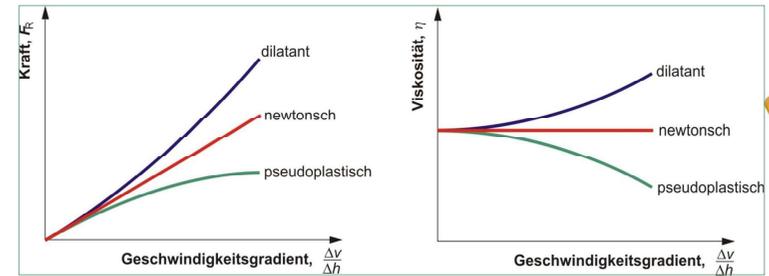
5

■ Viskosität: ➤ geschwindigkeitsgradientabhängig

Einteilung der Flüssigkeiten

- newtonsche (normale) Flüssigkeit
- nicht-newtonsche (anomale) Flüssigkeit
 - dilatante Fl.
 - pseudoplastische Fl.

Experiment



➤ zeitabhängig

Thixotrope Flüssigkeit:

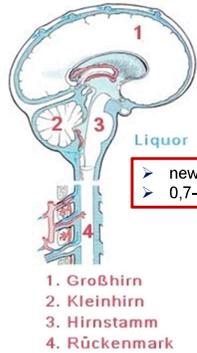
Rheopexie Flüssigkeit:

Gelenkflüssigkeit

6

Viskosität der Körperflüssigkeiten

Liquor (Gehirn-Rückenmarks-Flüssigkeit, Cerebrospinalflüssigkeit)



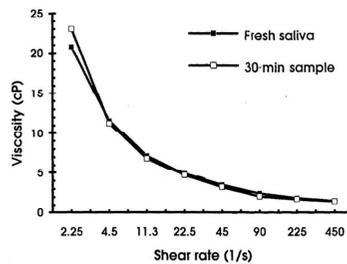
Speichel

Ohrspeicheldrüse

Unterzungspeicheldrüse

Unterkieberspeicheldrüse

- Mucin
- pseudoplastische Flüssigkeit



Nach Panu J. P., Rantanen E., Jukka H., Meunier (1998) Viscosity of whole saliva, Acta Otolaryngologica Scandinavica, 114, 220-224

7

Gelenkflüssigkeit



Bronchialschleim

Bronchien normal

Schleimhaut

Schleim

Bronchialgewebe

Muskelschicht

Bronchien entzündet

geschwollene Schleimhaut

vermehrter Schleim

entzündetes Bronchialgewebe

Muskelschicht

➤ pseudoplastische Flüssigkeit

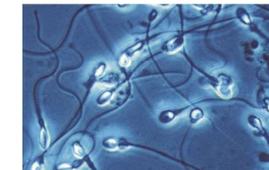
© Lungeninformationsdienst

Träne

Aufbau des Tränenfilms

- pseudoplastische Flüssigkeit
- 1-10 mPas

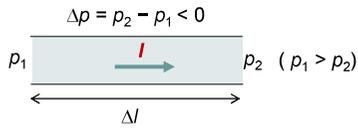
Sperma



8

- 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:

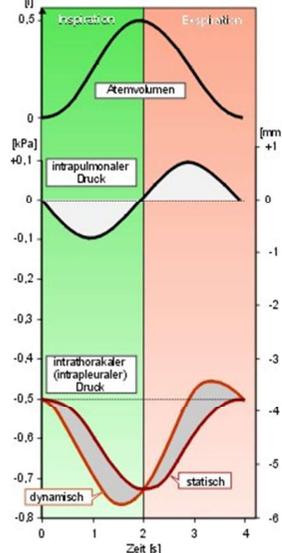
- stationäre Strömung
- newtonsche Flüssigkeit/Gas

■ **Strömungswiderstand (Analogie mit dem elektrischen Strom):**

Strömung		Elektrischer Strom
Hagen–Poiseuille-Gesetz		Ohmsches Gesetz
$I_{str} = \frac{\Delta V}{\Delta t} = -\frac{\pi}{8} \frac{1}{\eta} R^4 \frac{\Delta p}{\Delta l}$		$I_{el} = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = \frac{U}{R_{el}} = -\frac{\Delta \varphi}{R_{el}}$
$\frac{1}{R_{str}}$	↔ Analogie ↔	$\frac{1}{R_{el}}$
$I_{str} = \frac{\Delta V}{\Delta t} = -\frac{\Delta p}{R_{str}}$		$I_{el} = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = -\frac{\Delta \varphi}{R_{el}}$
$R_{str} = \frac{8}{\pi} \eta \frac{\Delta l}{R^4} = 8\pi\eta \frac{\Delta l}{(\pi R^2)^2} = 8\pi\eta \frac{\Delta l}{A^2}$		$R_{el} = \rho \frac{l}{A}$

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!

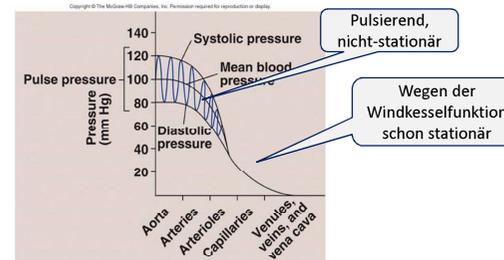
■ **Regulation der Volumenstromstärke laut Hagen–Poiseuille-Gesetzes:**

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

➢ ~~Radius (R^4)~~

Anwendung: Blutkreislauf

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



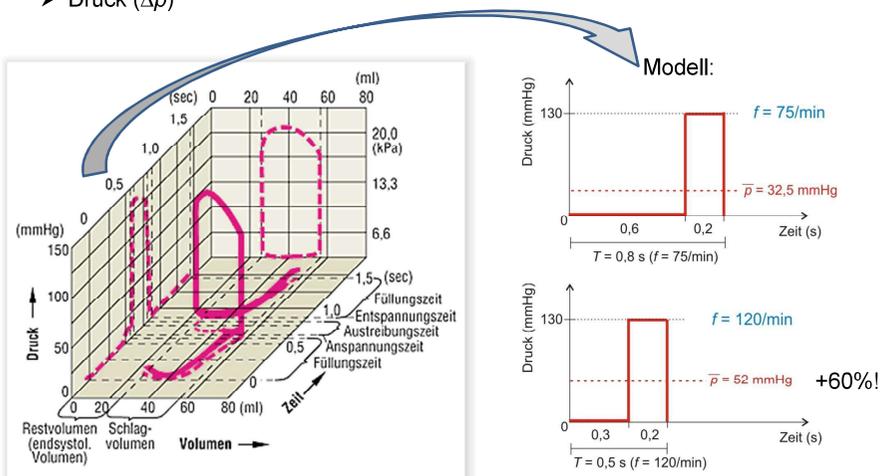
- inkompressible Fl.?
- laminare Strömung?
- stationäre Strömung?
- newtonsche Fl.?

Folgerung: Das H-P-Gesetz ist nur annähernd anwendbar!

Doch zeigt das Gesetz richtig, wie die Blutströmung reguliert werden kann.

Anwendung: Blutkreislauf

- Regulation der Volumenstromstärke laut Hagen-Poiseuille-Gesetzes:
 - Druck (Δp)

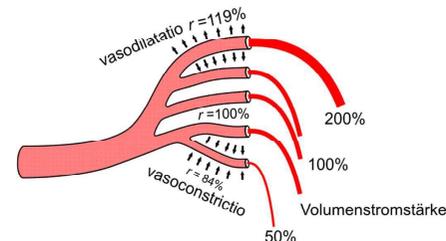


Der Durchschnittswert ($\bar{\Delta p}$) kann durch die Pulszahl geändert werden!

17

Anwendung: Blutkreislauf

- Regulation der Volumenstromstärke laut Hagen-Poiseuille-Gesetzes:
 - Radius (R^4 !)



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

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

„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](#)

18

Zusammenfassend über Blut und Blutströmung

Blut

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

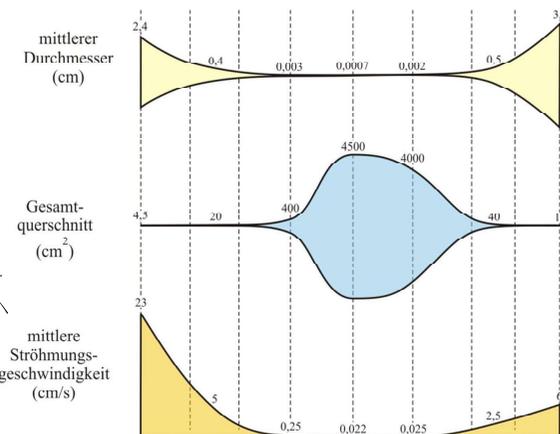
- Die Viskosität hängt
- vom Hämatokritwert,
 - vom Geschwindigkeitsgradienten (pseudoplastische Flüssigkeit),
 - vom Blutgefäßdurchmesser,
 - und von der Temperatur ab.

Blutströmung

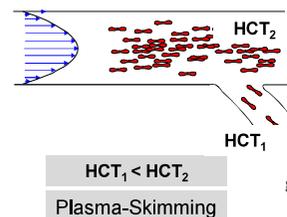
- Die Blutströmung ist
- überwiegend **laminar** ($v < v_{\text{krit}}$),
 - in dem ersten Abschnitt des Blutkreislaufs **nicht-stationär** (pulsierend), später schon **stationär**.

Es gilt die Kontinuitätsgleichung:

	Arterien		Arteriolen	Kapillaren	Venolen	Venen		Hohlvenen
	große	kleine				kleine	große	
Aorta								
Zahl der Äste	1	160 zunehmend	$57 \cdot 10^6$	$12 \cdot 10^9$	$1,3 \cdot 10^9$	200 abnehmend		2



Annähernd gilt die Bernoulli-Gleichung:

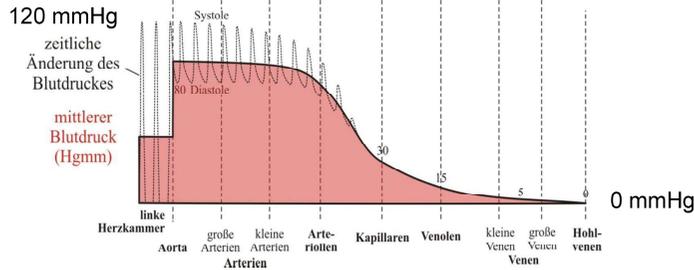
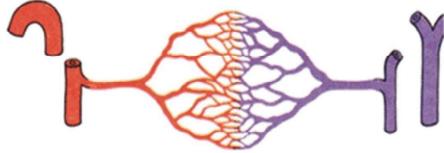


19

20

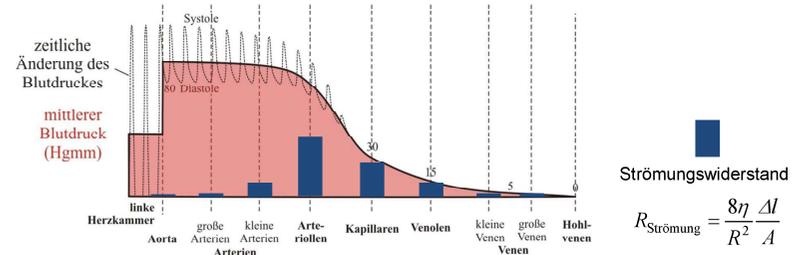
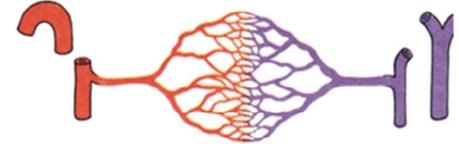
Die Blutströmung wird durch die Herzarbeit aufrecht erhalten:
 Durch Muskelkontraktion wird in dem linken Ventrikel (über dem atmosphärischen Druck (cca. 760 mmHg)) ein Überdruck erzeugt.

- 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

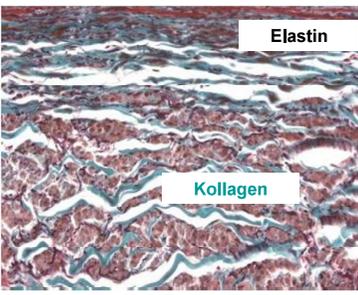
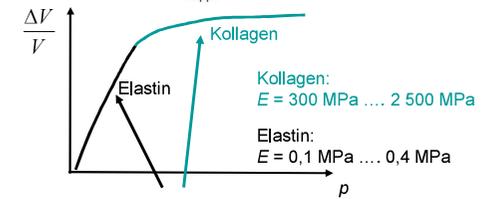
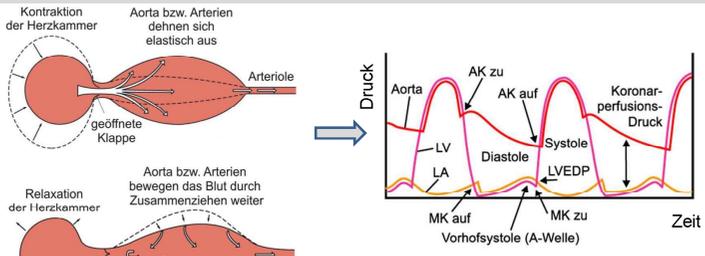
- $\overline{\Delta p}$ (durch Herzfrequenz!)
- und r (Gefäßweiterung bzw. Gefäßverengung; R^4) reguliert.



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

Der periphere Gesamtwiderstand ($\overline{\Delta p}$) ist die Summe aller Widerständen. Er kann am effektivsten im Bereich der Arteriolen reguliert werden.

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

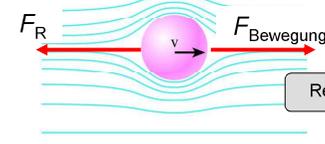


Abweichung von dem HP-Gesetz!

5. Bewegung von Teilchen in realen Flüssigkeiten

Bei kleineren Geschwindigkeiten:

stokessches Reibungsgesetz:



Reibungskraft

Radius des kugelförmigen Teilchens

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

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