

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

5. Bewegung von Teilchen in reellen Flüssigkeiten

Turbulent

Laminar

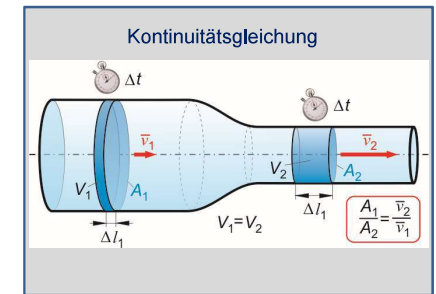
Volumenstromstärke (I): $I = \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad \left(\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right)$

$I = A \cdot \bar{v}$

Ideale Flüssigkeit (ohne innere Reibung)

Bernoullische Gleichung

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



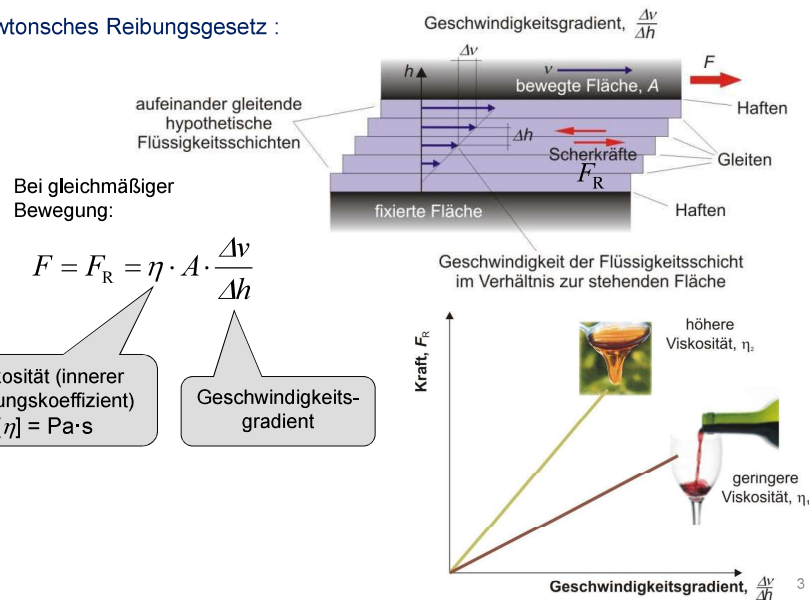
- Wie kann die innere Reibung bei der Strömung einer reellen Flüssigkeit beschrieben werden?
- Ist eine gewisse Strömung laminar oder turbulent?
- Was treibt die Strömung?
- Wovon hängt die Stromstärke der Strömung ab?

1

2

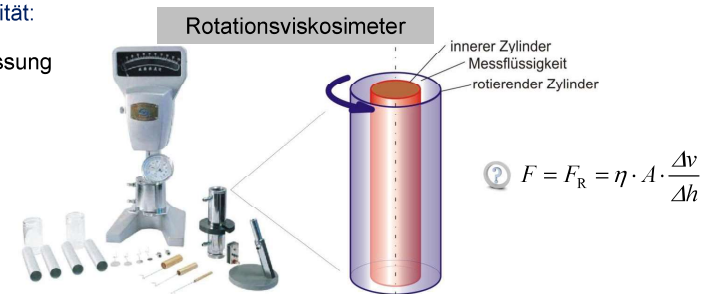
4. Strömung von reellen Flüssigkeiten

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



Viskosität:

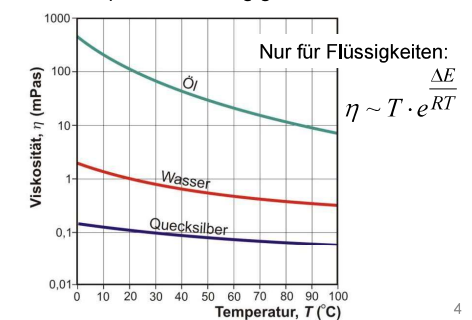
➤ Messung



➤ stoffspezifisch

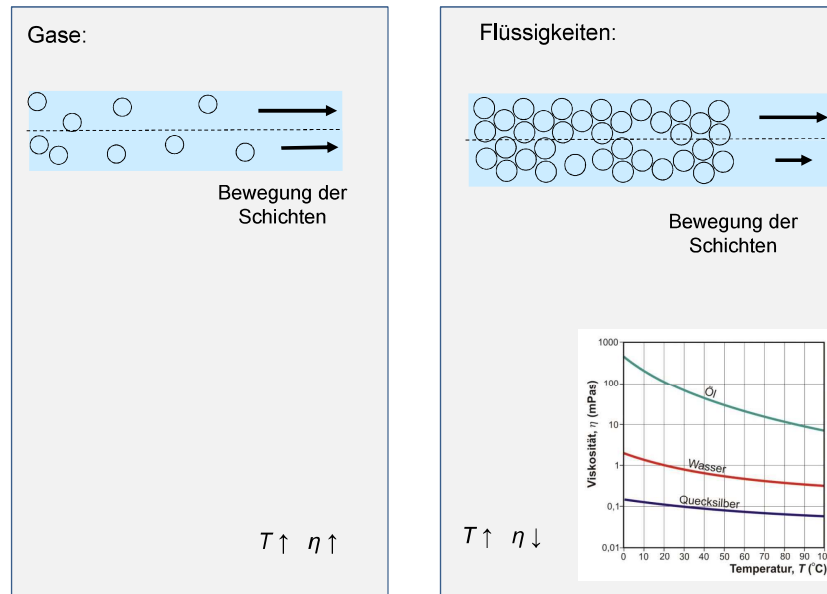
Stoff	η (mPa·s) 20 °C
Luft	(101 kPa) 0,019
Wasser	1
Äthanol	1,2
Blut (37 °C)	2–8
Glycerin	1490
Honig	2000–14000

➤ temperaturabhängig



4

Ausführlicher über den Mechanismus der inneren Reibung :



5

■ Viskosität: ➤ geschwindigkeitsgradientabhängig

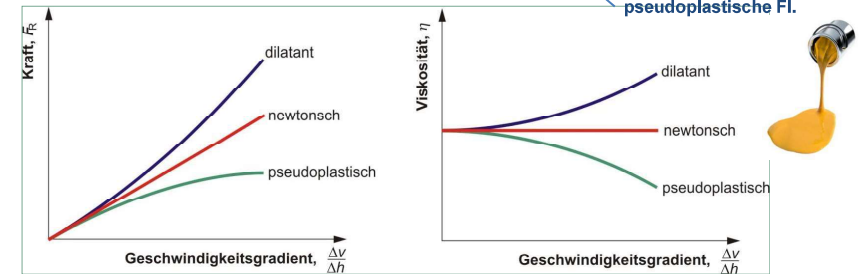
Einteilung der Flüssigkeiten

newtonsche (normale) Flüssigkeit

nicht-newtonsche (anomale) Flüssigkeit

dilatante Fl.

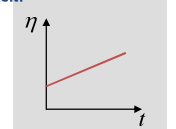
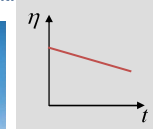
pseudoplastische Fl.



➤ zeitabhängig

Thixotrope Flüssigkeit:

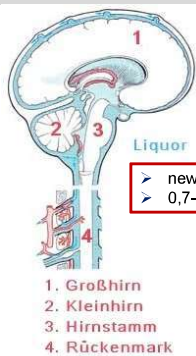
Rheopexie Flüssigkeit:



6

Viskosität der Körperflüssigkeiten

Liquor (Gehirn-Rückenmarks-Flüssigkeit, Cerebrospinalflüssigkeit)

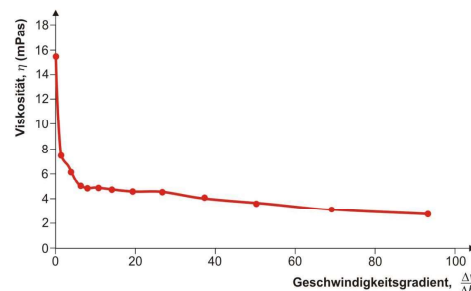


➤ newtonsche Flüssigkeit
➤ 0,7-1 mPas (37°C)

Speichel



➤ Mucin
➤ pseudoplastische Flüssigkeit



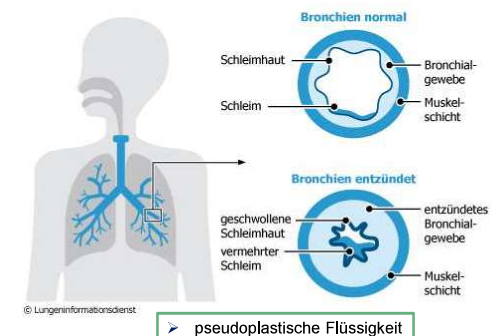
7

Gelenkflüssigkeit



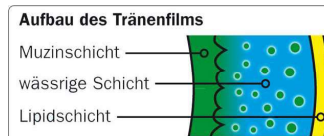
➤ Hyaluronsäure
➤ stark pseudoplastische Flüssigkeit

Bronchialschleim



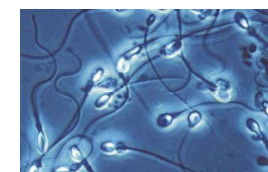
➤ pseudoplastische Flüssigkeit

Träne



➤ pseudoplastische Flüssigkeit
1-10 mPas

Sperma

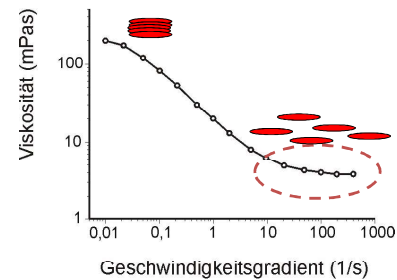
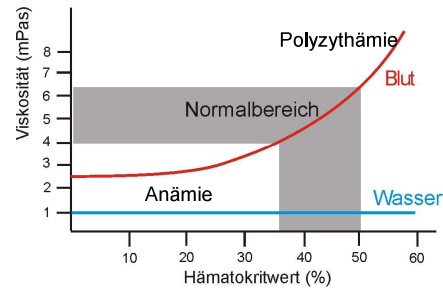


➤ pseudoplastische Flüssigkeit

8

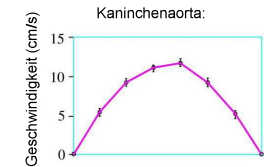
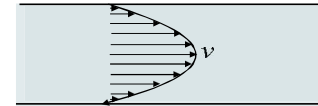
Viskosität des Blutes

- 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)



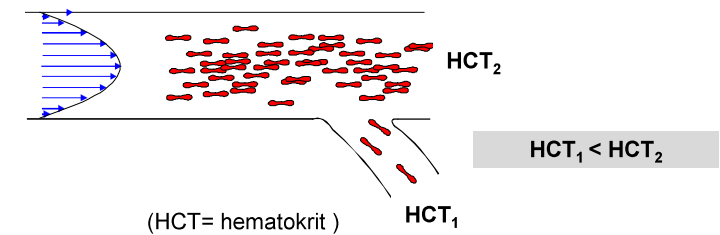
9

Geschwindigkeitsprofil von reellen Flüssigkeiten:



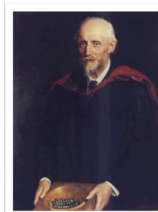
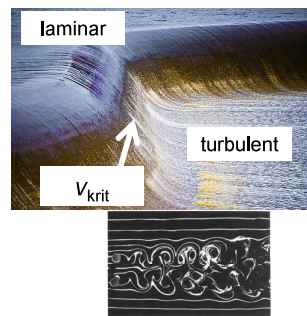
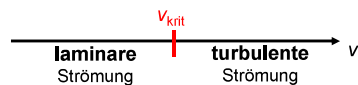
Eine physiologische Folgerung: Plasma-Skimming

Parabolisches Geschwindigkeitsprofil + bernoullische Gleichung →



10

Kritische Geschwindigkeit (v_{krit}):



Osborne Reynolds
1842-1912
Physiker und
Wasseringenieur

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

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

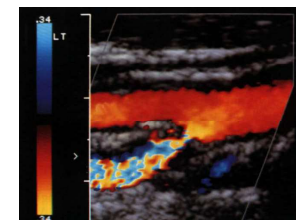
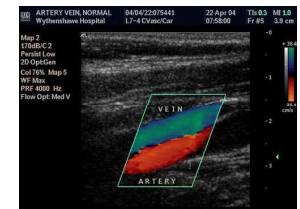
Viskosität

Dichte

Radius des Rohres

11

Ist die Blutströmung laminar oder turbulent?

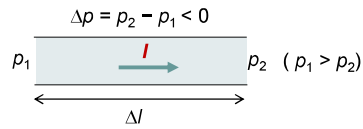


Ist die Strömung der Luft bei Atmung laminar oder turbulent?

12

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

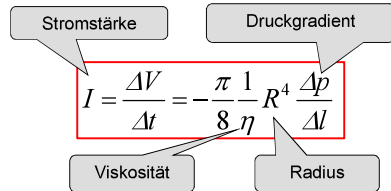
Transportgesetz (Hagen–Poiseuille-Gesetz):



G. H. L. Hagen
1797-1884
Wasseringenieur



J. L. M. Poiseuille
1799-1869
Physiologe



Allgemeine Gültigkeitsvoraussetzungen:

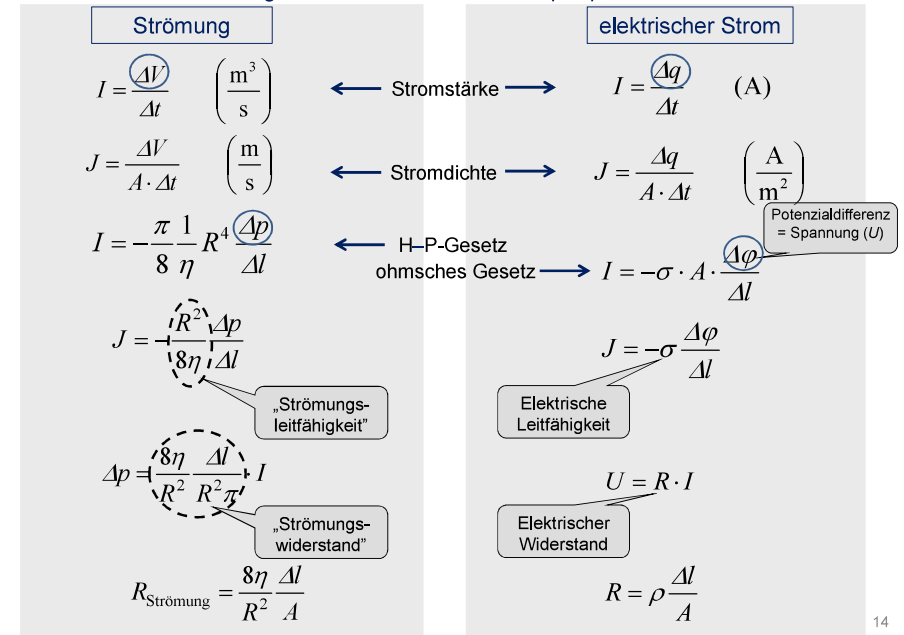
- inkompressible Flüssigkeit/Gas
- laminare Strömung

Weitere Gültigkeitsvoraussetzungen:

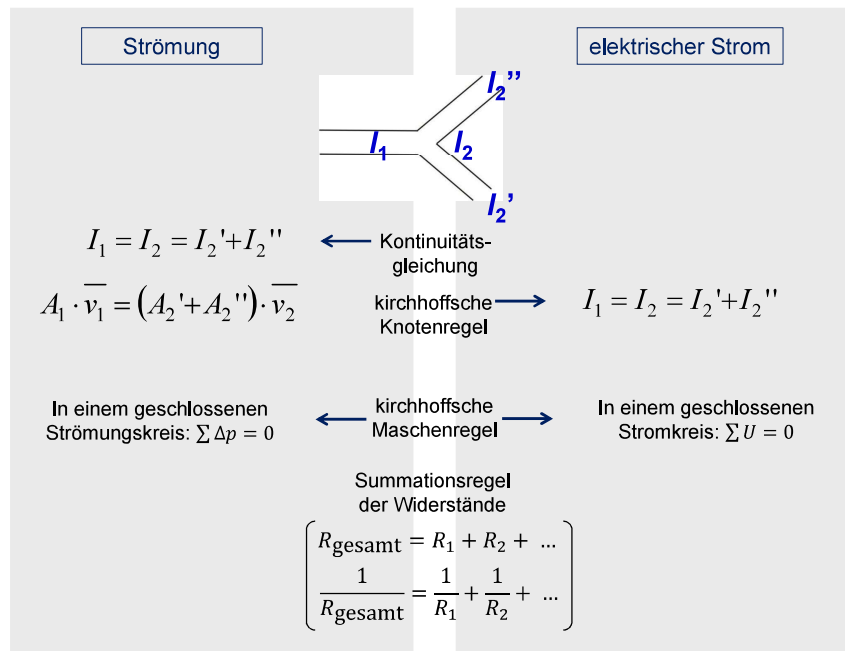
- stationäre Strömung
- newtonsche Flüssigkeit/Gas

13

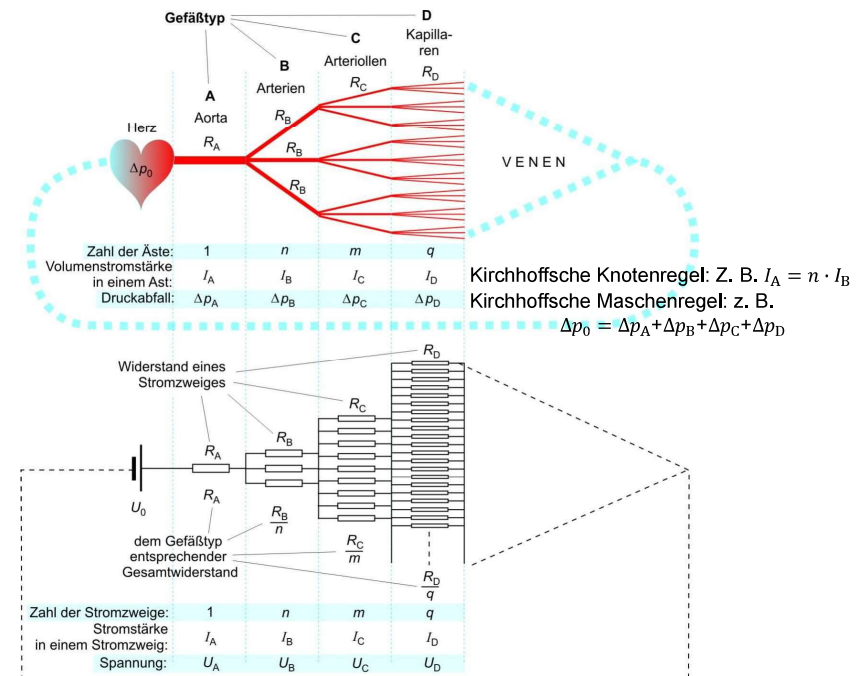
Analogie zwischen den zwei Transportprozessen:



14



15

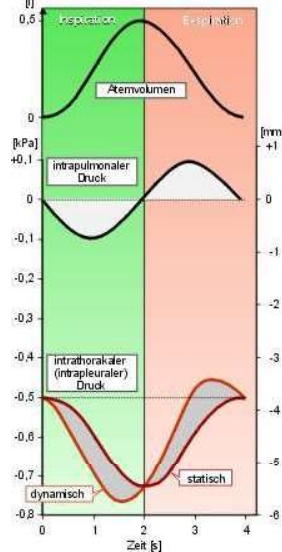


16

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

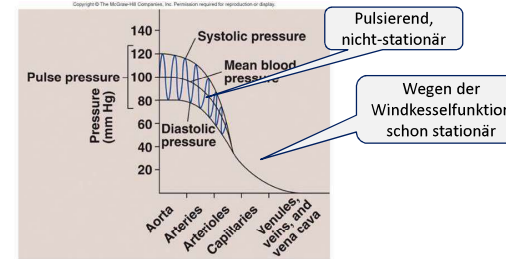
➤ Radius (R^4)



17

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!

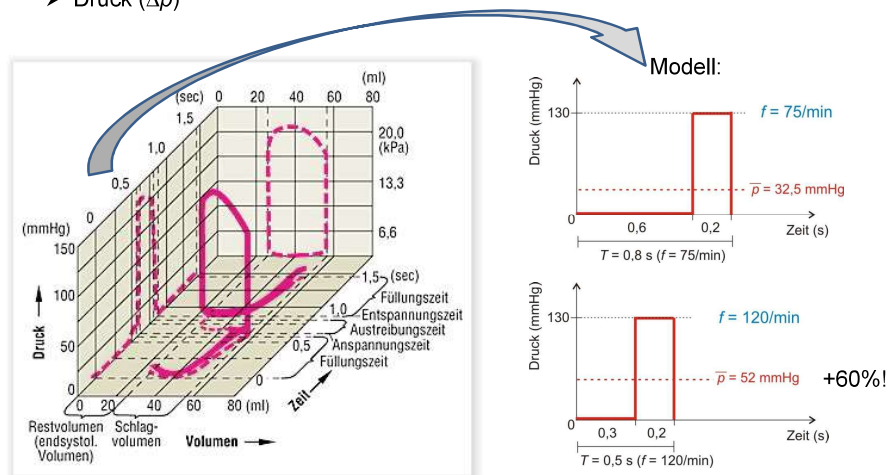
Doch zeigt das Gesetz richtig, wie die Blutströmung reguliert werden kann.

18

Anwendung: Blutkreislauf

Regulation der Volumenstromstärke laut Hagen-Poiseuille-Gesetzes:

➤ Druck (Δp)



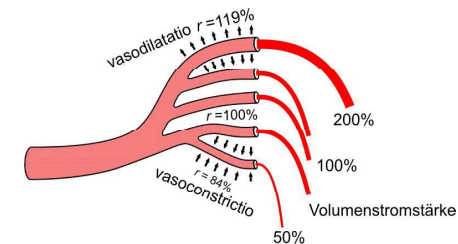
Der Durchschnittswert ($\bar{\Delta p}$) kann durch die Pulszahl geändert werden!

19

Anwendung: Blutkreislauf

Regulation der Volumenstromstärke laut Hagen-Poiseuille-Gesetzes:

➤ Radius (R^4 !)



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

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

„Strömungs-widerstand“

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

Durch Gefäßverengung (Vasokonstriktion) wird der Strömungs-widerstand 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](#)

20

Zusammenfassend über Blut und Blutströmung

Blut

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

Die Viskosität hängt

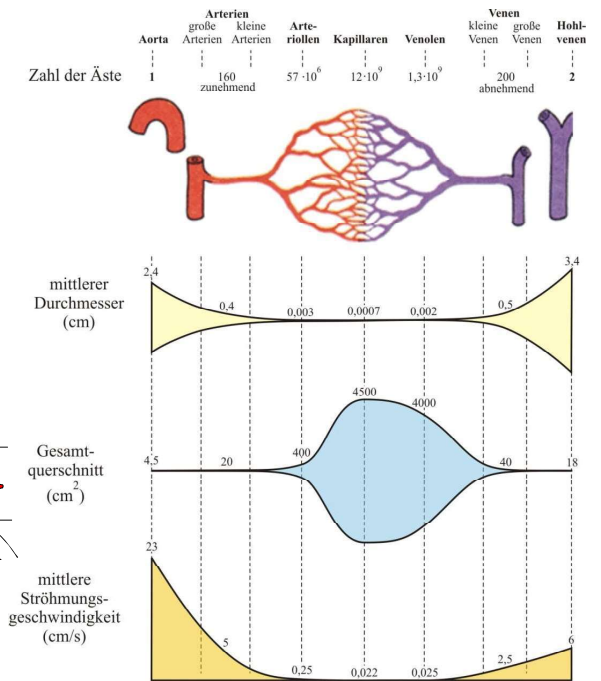
- vom Hämatokritwert,
- vom Geschwindigkeitsgradienten (pseudoplastische Flüssigkeit),
- vom Blutgefäßdurchmesser,
- und von der Temperaturab.

Blutströmung

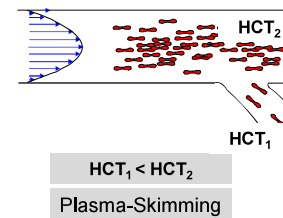
Die Blutströmung ist

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

Es gilt die
Kontinuitätsgleichung:



Annähernd gilt die
Bernoulli-Gleichung:



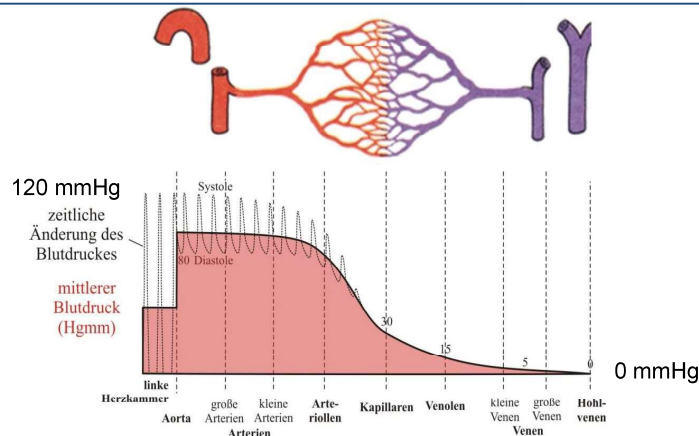
21

22

Die Blutströmung wird durch die Herzarbeit aufrecht erhalten:

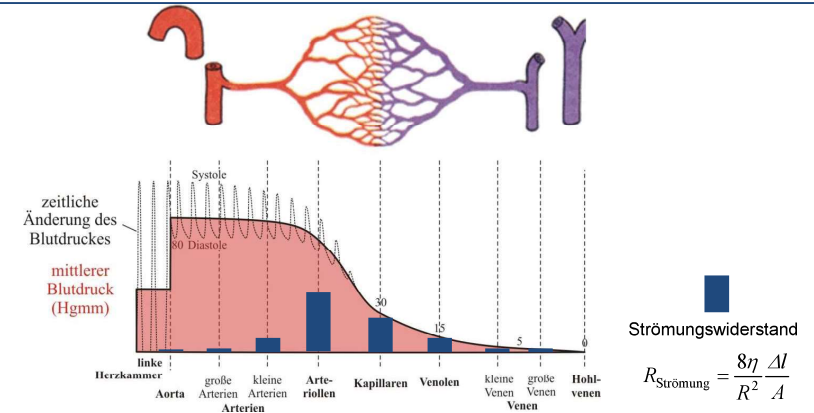
Durch Muskelkontraktion wird in dem linken Ventrikel (über dem atmosphärischen Druck (cca. 760 mmHg)) ein Überdruck erzeugt.

- 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.



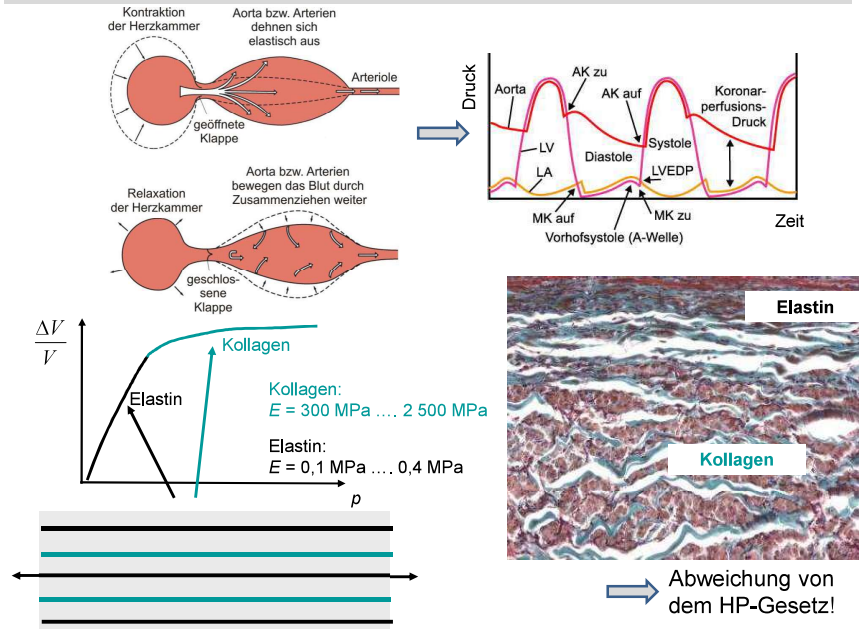
Der Strömungswiderstand ist im Bereich der Arteriolen am größten (=Widerstandgefäße).

Der periphere Gesamtwiderstand (Δp) ist die Summe aller Widerständen. Er kann am effektivsten im Bereich der Arteriolen reguliert werden. ➡ Druckregulierung!

23

24

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

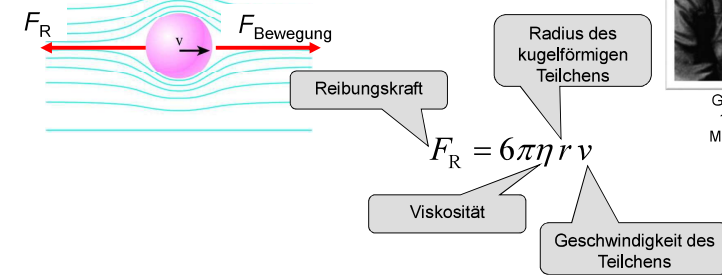


25

5. Bewegung von Teilchen in reellen Flüssigkeiten

Bei kleineren Geschwindigkeiten:

stokessches Reibungsgesetz:



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

26