

# Medizinische Biophysik

## Transportprozesse

06.04.2020

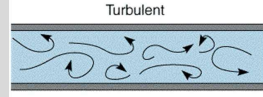
### I. Strömungen (Volumentransport) Fortsetzung

#### 4. Strömung von reellen Flüssigkeiten

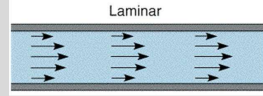
- Newtonsches Reibungsgesetz
- Viskosität → Anwendung: Viskosität von Körperflüssigkeiten
- Kritische Geschwindigkeit → Anwendung: **Atmung/Blutströmung**
- **Transportgesetz** (Hagen-Poiseuille-Gesetz)  
Anwendung: **Atmung/Blutströmung**
- **Zusammenfassung über das Blut und den Blutkreislauf**

#### 5. Bewegung von Teilchen in reellen Flüssigkeiten

Turbulent



Laminar

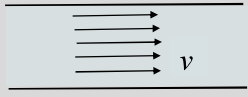


Volumenstromstärke ( $I$ ):  $I = \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad \left( \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right)$

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

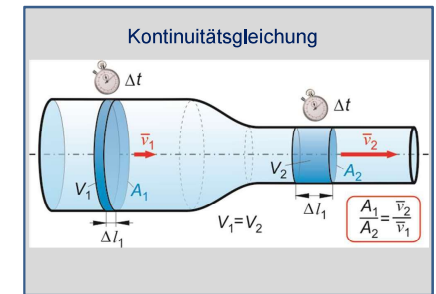
---

Ideale Flüssigkeit (ohne innere Reibung)



Bernoullische Gleichung

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



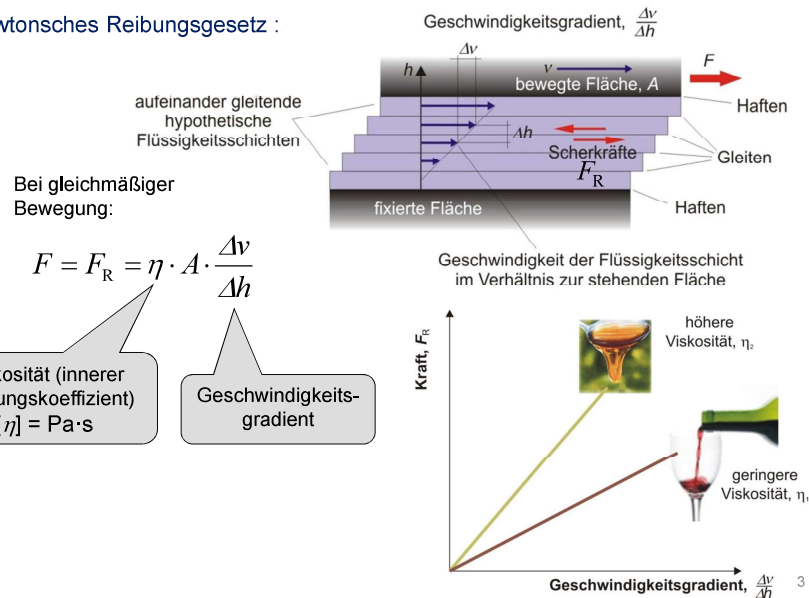
- Wie kann die innere Reibung bei der Strömung einer reellen Flüssigkeit beschrieben werden?
- Ist eine gewisse Strömung laminar oder turbulent?
- Was treibt die Strömung?
- Wovon hängt die Stromstärke der Strömung ab?

1

2

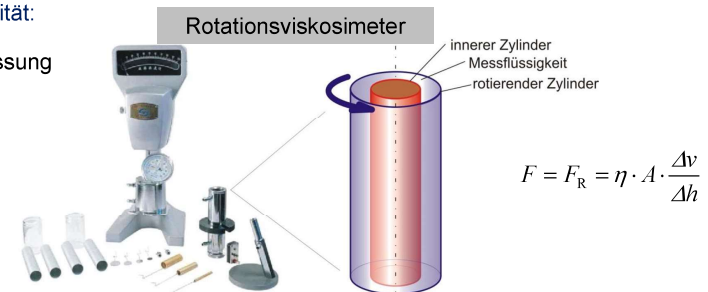
### 4. Strömung von reellen Flüssigkeiten

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



#### Viskosität:

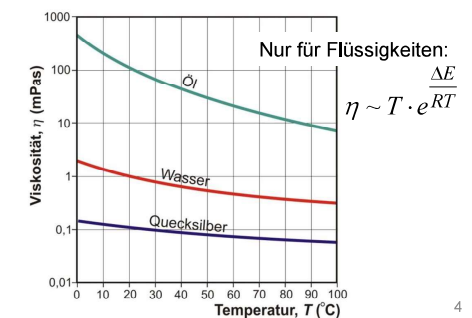
##### ➤ Messung



##### ➤ stoffspezifisch

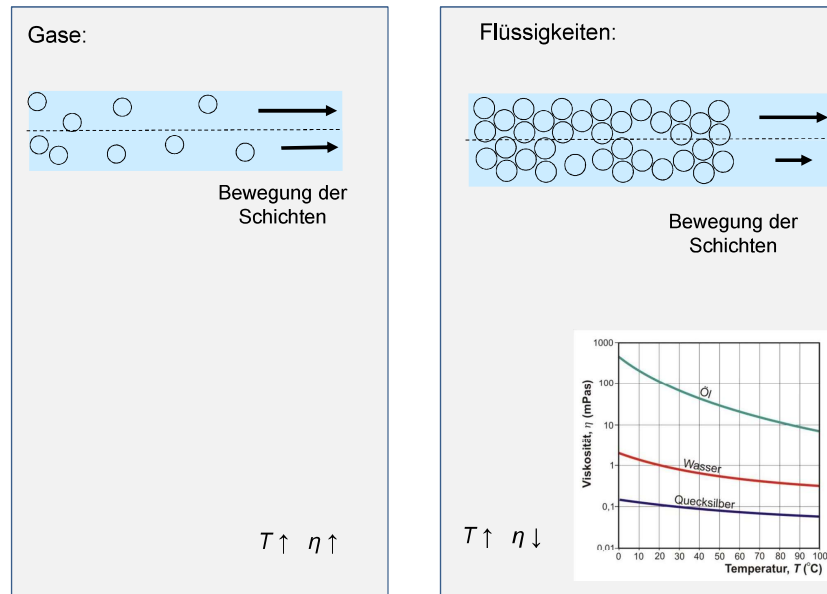
Stoff	$\eta$ (mPa·s) 20 °C
Luft	(101 kPa) 0,019
Wasser	1
Äthanol	1,2
Blut (37 °C)	2–8
Glycerin	1490
Honig	2000–14000

##### ➤ temperaturabhängig



4

## Ausführlicher über den Mechanismus der inneren Reibung :



5

## ■ Viskosität: ➤ geschwindigkeitsgradientabhängig

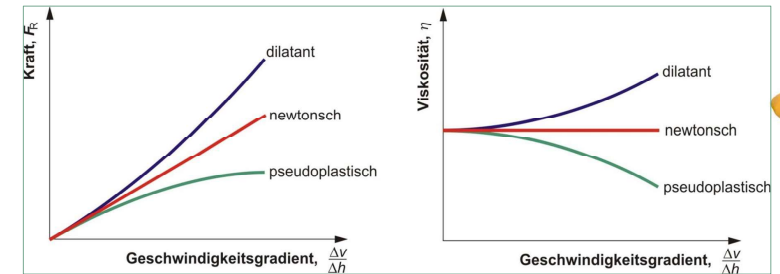
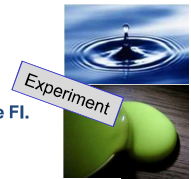
### Einteilung der Flüssigkeiten

newtonsche (normale) Flüssigkeit

nicht-newtonsche (anomale) Flüssigkeit

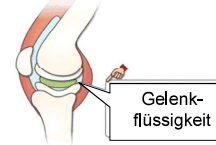
dilatante Fl.

pseudoplastische Fl.

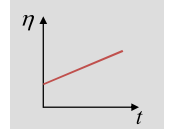
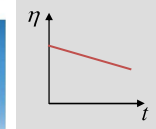


### ➤ zeitabhängig

Thixotrope Flüssigkeit:



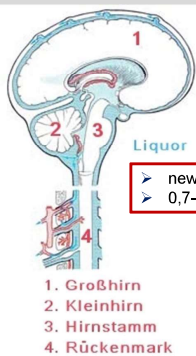
Rheopexie Flüssigkeit:



6

## Viskosität der Körperflüssigkeiten

Liquor (Gehirn-Rückenmarks-Flüssigkeit, Cerebrospinalflüssigkeit)

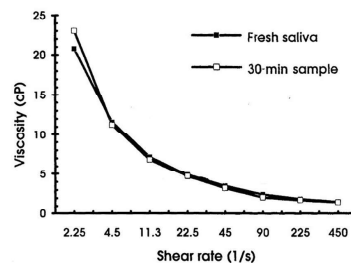


➤ newtonsche Flüssigkeit  
➤ 0,7-1 mPas (37°C)

Speichel



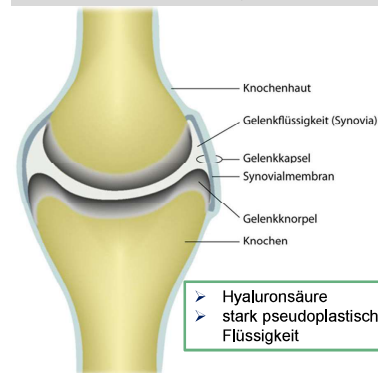
➤ Mucin  
➤ pseudoplastische Flüssigkeit



Nach Fenn J. P., Rantanen J., Jukka H. Heiskanen (1998) Viscosity of whole saliva, Acta Odontologica Scandinavica, 56:4, 220-224

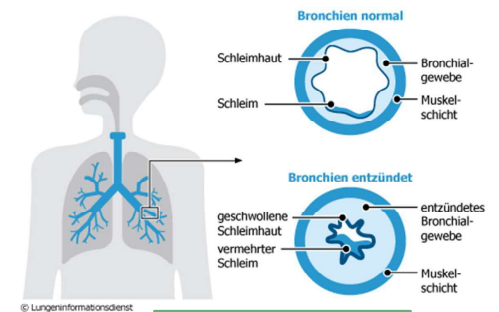
7

Gelenkflüssigkeit



➤ Hyaluronsäure  
➤ stark pseudoplastische Flüssigkeit

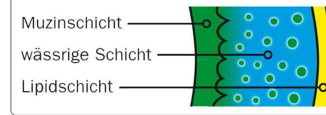
Bronchialschleim



➤ pseudoplastische Flüssigkeit

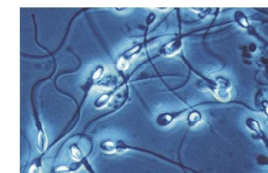
Träne

Aufbau des Tränenfilms



➤ pseudoplastische Flüssigkeit  
➤ 1-10 mPas

Sperma

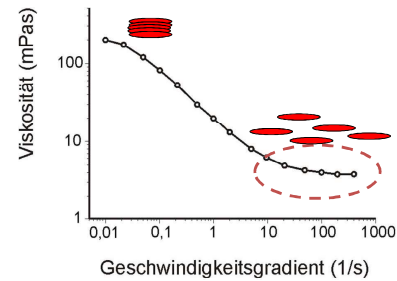
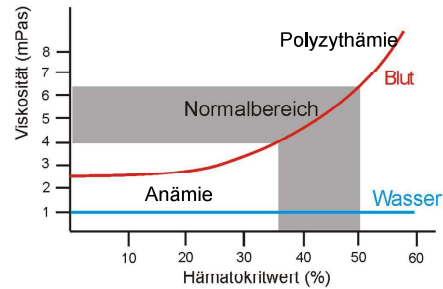


➤ pseudoplastische Flüssigkeit

8

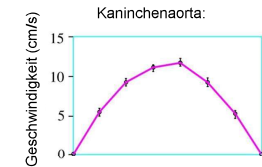
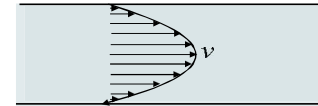
## Viskosität des Blutes

- 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)



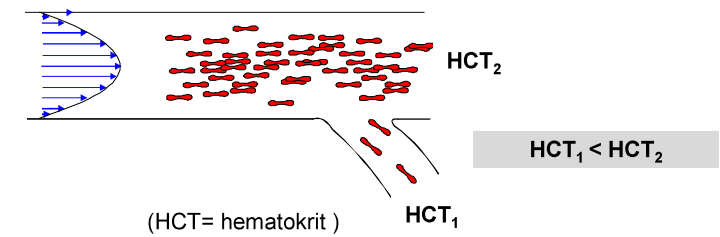
9

## Geschwindigkeitsprofil von reellen Flüssigkeiten:



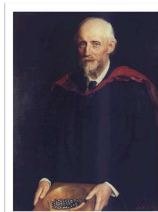
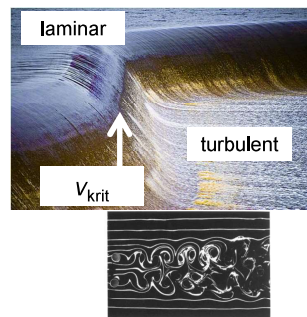
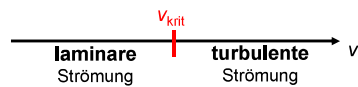
## Eine physiologische Folgerung: Plasma-Skimming

Parabolisches Geschwindigkeitsprofil + bernoullische Gleichung →



10

## Kritische Geschwindigkeit ( $v_{krit}$ ):



Osborne Reynolds  
1842-1912  
Physiker und  
Wasseringenieur

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

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

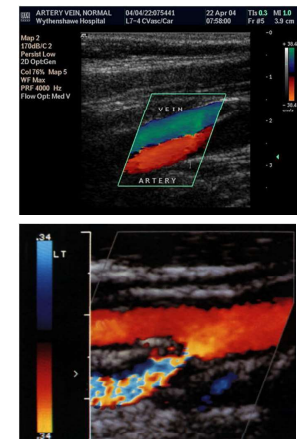
Viskosität

Dichte

Radius des Rohres

11

## Ist die Blutströmung laminar oder turbulent?

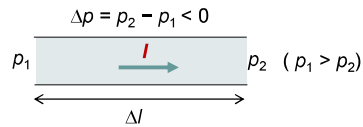


## Ist die Strömung der Luft bei Atmung laminar oder turbulent?

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

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

13

### Strömungswiderstand (Analogie mit dem elektrischen Strom):

Strömung

Elektrischer Strom

Hagen–Poiseuille-Gesetz

Ohmsches Gesetz

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

$$I_{el} = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = \frac{U}{R_{el}} = -\frac{\Delta \varphi}{R_{el}}$$

$$I_{str} = \frac{\Delta V}{\Delta t} = -\frac{\Delta p}{R_{str}}$$

Analogie

$$I_{el} = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = -\frac{\Delta \varphi}{R_{el}}$$

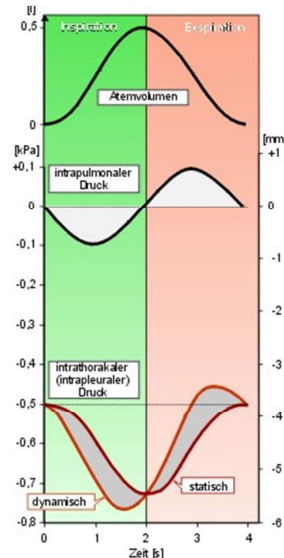
$$R_{str} = \frac{8}{\pi} \eta \frac{\Delta l}{R^4} = 8\pi \eta \frac{\Delta l}{(\pi R^2)^2} = 8\pi \eta \frac{\Delta l}{A^2}$$

$$R_{el} = \rho \frac{l}{A}$$

14

### 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 ( $\Delta p$ )

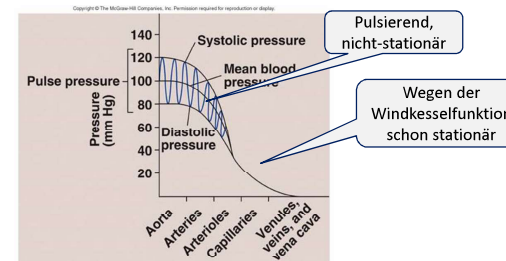
- Intrapulmonaler **Druck** ( $\Delta p$ ) kann in einem Atemzyklus stark geändert werden: 0,1 kPa – 0,5 kPa
- Der Durchschnittswert des intrapulmonalen Druckes ( $\bar{\Delta p}$ ) für die Einatmung kann durch die **Atemfrequenz** geändert werden: 12 1/min – 40 1/min

##### ➤ Radius ( $R^4$ )

15

### Anwendung: Blutkreislauf

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



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

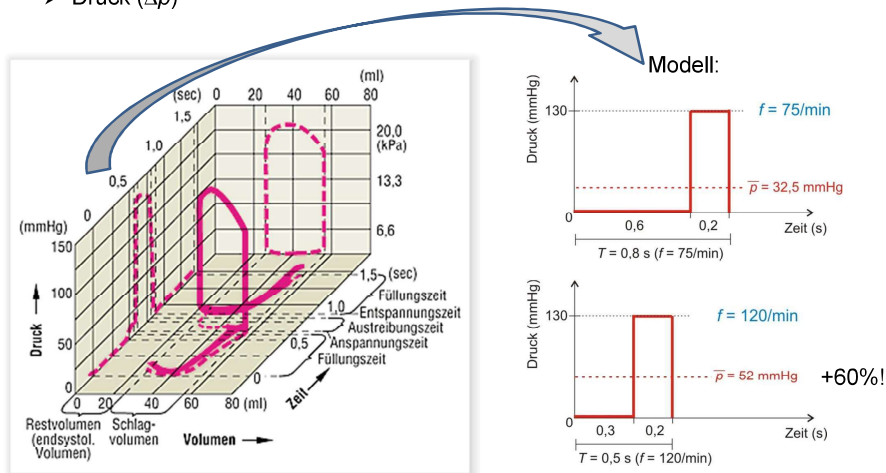
Folgerung: Das H-P-Gesetz ist nur annähernd anwendbar!

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

16

## Anwendung: Blutkreislauf

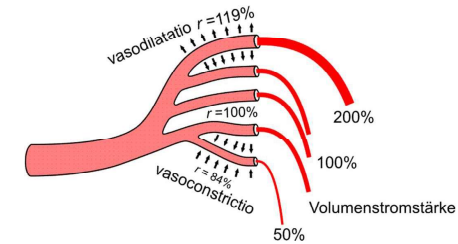
- Regulation der Volumenstromstärke laut Hagen-Poiseuille-Gesetzes:
  - Druck ( $\Delta p$ )



17

## Anwendung: Blutkreislauf

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



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

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

„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*

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

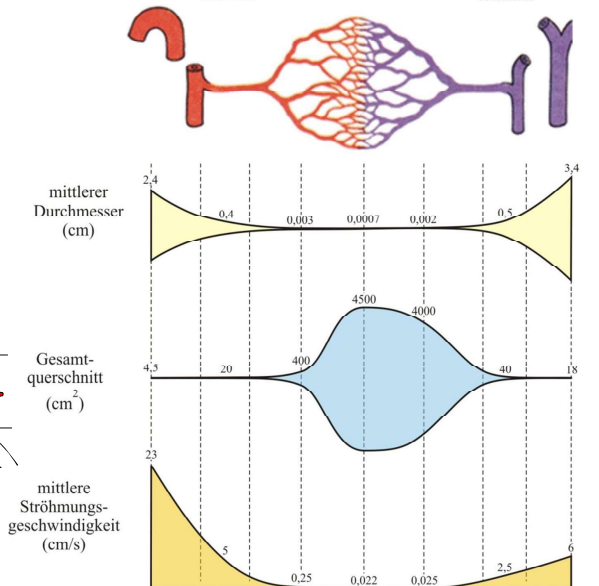
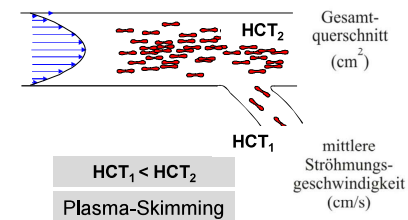
Die Blutströmung ist

- 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	1	160	57 · 10 <sup>6</sup>	12 · 10 <sup>9</sup>	1,3 · 10 <sup>9</sup>	200	abnehmend	2
Zahl der Äste		zunehmend						

Annähernd gilt die  
Bernoulli-Gleichung:



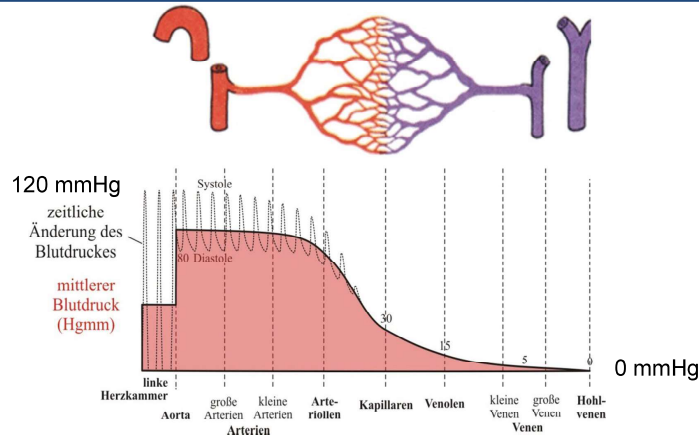
19

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.

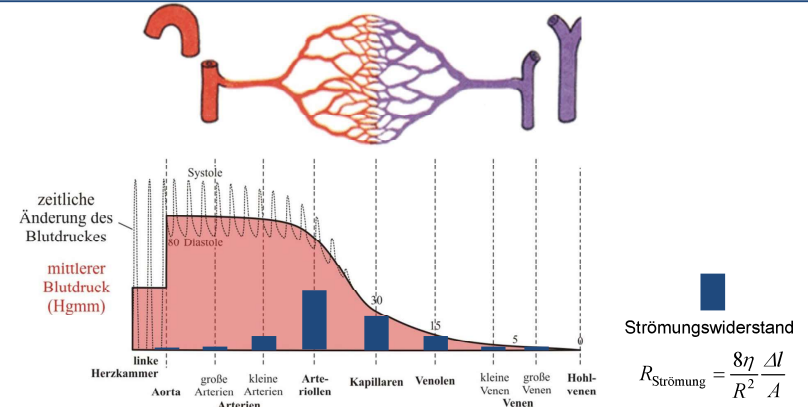
- Der Überdruck schwankt zwischen 0 und etwa 120 mmHg.
- Der Höchstdruckwert sinkt vom linken Ventrikel bis zum rechten Vorhof (0 mmHg).
- Der mittlere Blutdruck steigt vom linken Ventrikel bis zur Aorta (Klappen!), danach sinkt er bis zum rechten Vorhof.



21

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

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

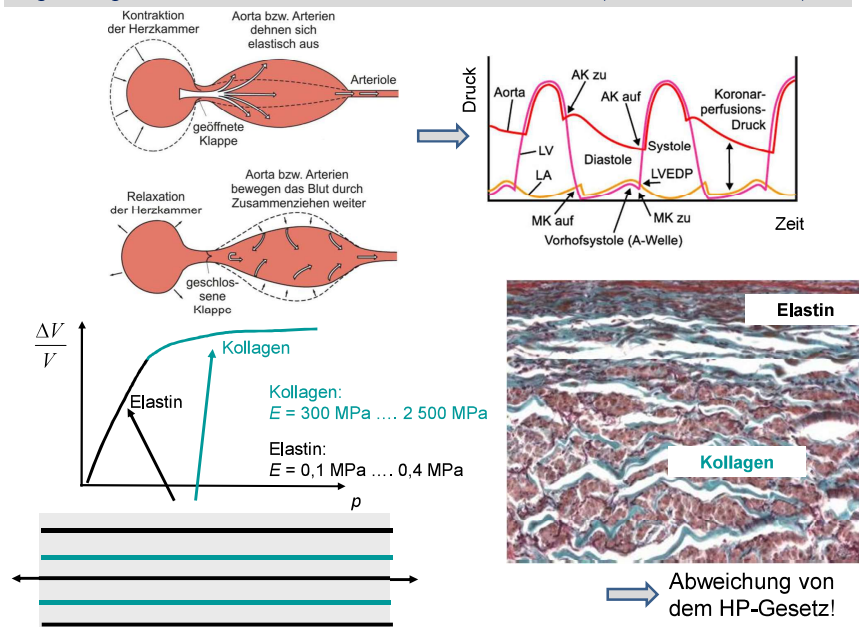


Der Strömungswiderstand ist im Bereich der Arteriolen am größten (=Widerstandgefäße).

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

22

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

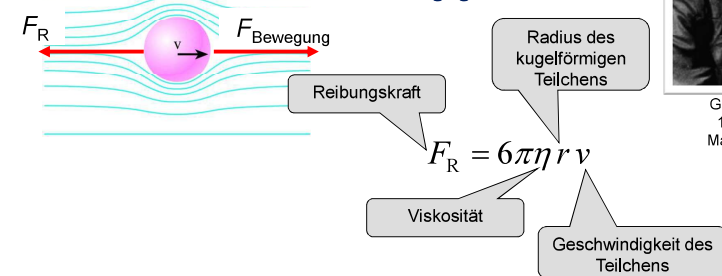


23

### 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

24