

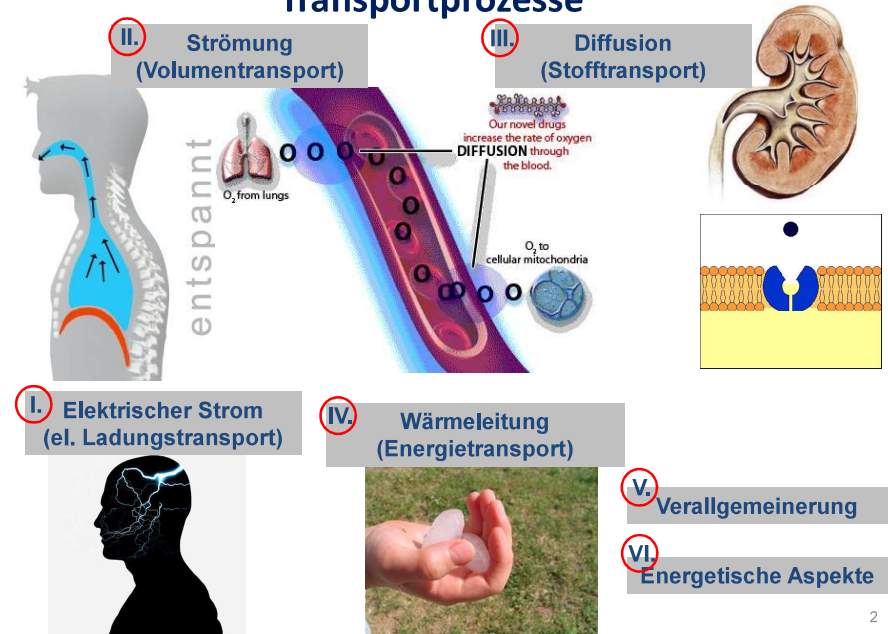
## Transportprozesse

Elektrischer Strom  
Strömungen



1

## Transportprozesse



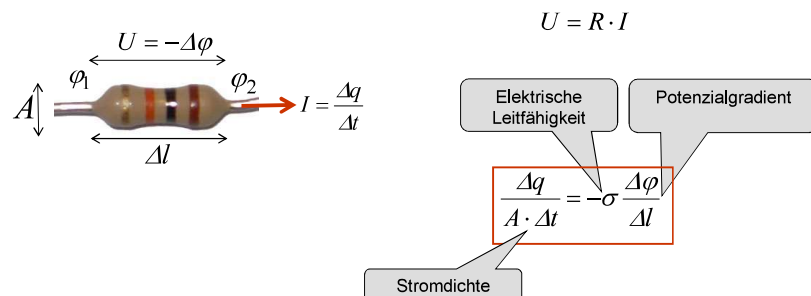
2

## I. Elektrischer Ladungstransport (el. Strom)

### 1. Grundbegriffe

- Elektrische Stromstärke ( $I$ ):  $I = \frac{\Delta q}{\Delta t}$  (A)
- Elektrische Stromdichte ( $J$ ):  $J = \frac{\Delta q}{A \cdot \Delta t}$   $\left( \frac{A}{m^2} \right)$
- stationärer Strom: zeitlich konstant

### 2. Transportgesetz (ohmsches Gesetz)



3

## 2. Anwendungen ■ Diagnostik

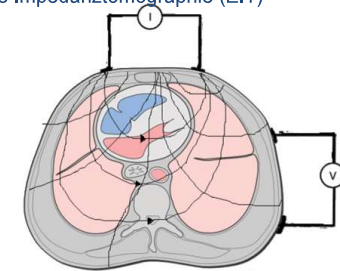
- Messung von Biopotenzialen (EKG, EEG, ...)



- Messung der elektrischen Leitfähigkeit von Geweben

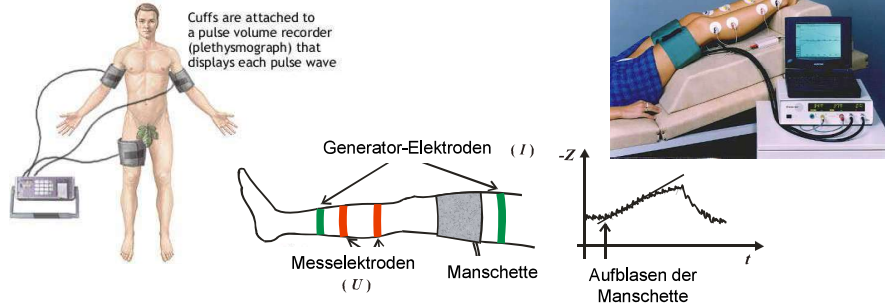
Elektrische Impedanztomographie (EIT)

Gewebe	$\sigma$ (mS/m)
Blut	700
graue Hirnmasse	300
weiße Hirnmasse	150
Haut	100
Fett	40
Knochen	10

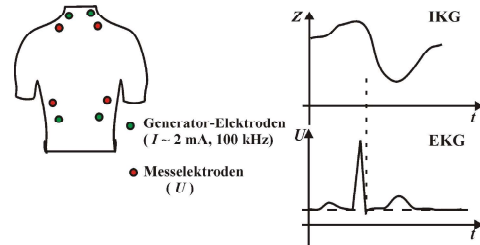


4

## Impedanzplethysmographie (IPG)



## Impedanzkardiographie (IKG)



5

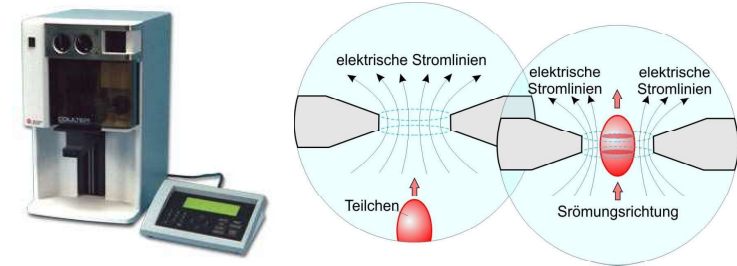
## Apex-Locator



## Lügendetektor



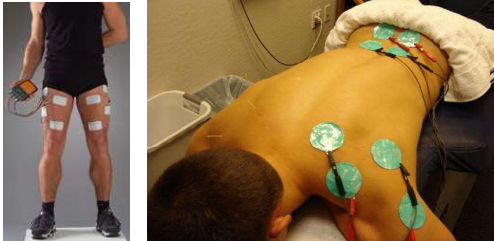
## Coulter-Zähler



6

## Therapie

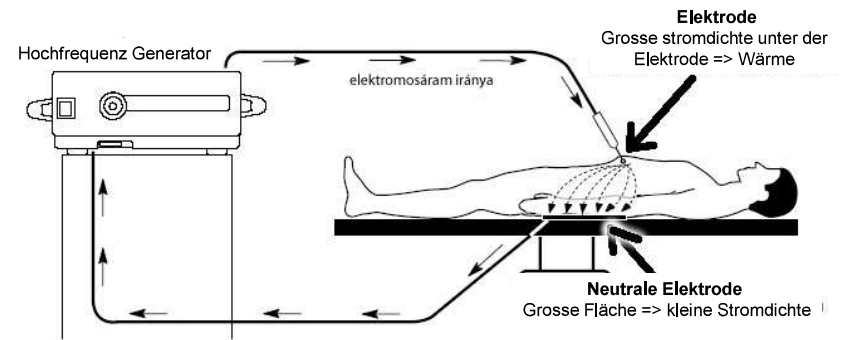
### Elektrostimulation



### Herzschrittmacher



### Defibrillator



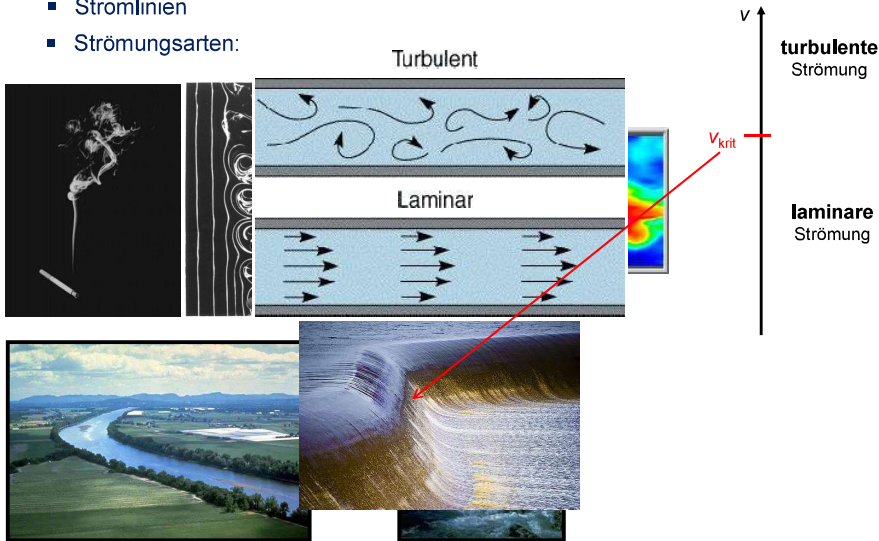
7

8

## II. Volumentransport (Strömungen)

### 1. Grundbegriffe

- Stromlinien
- Strömungsarten:



9

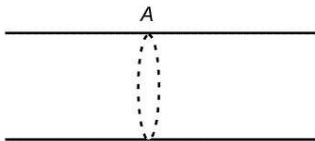
## Beispiele für laminare Strömung



10

- stationärer Strom: zeitlich konstant

- Volumenstromstärke ( $I$ ):  $I = \frac{\Delta V}{\Delta t} \left( \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right)$
- Volumenstromdichte ( $J$ ):  $J = \frac{\Delta V}{A \cdot \Delta t} \left( \frac{\text{m}}{\text{s}} \right)$



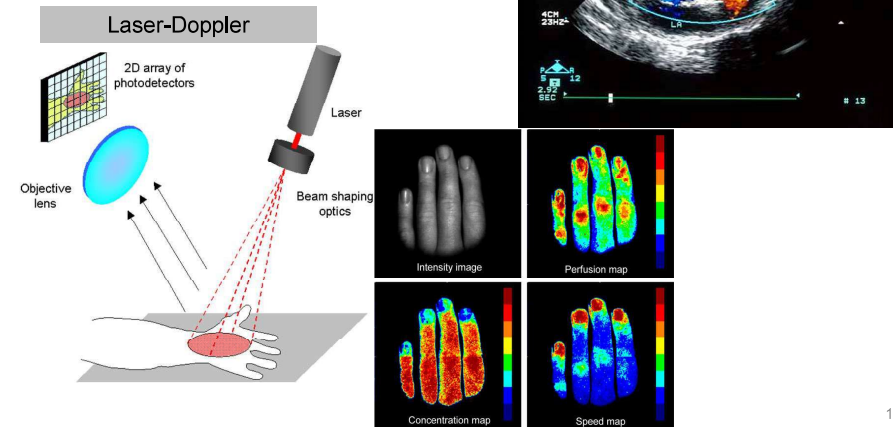
$$I = A \cdot \bar{v}$$

$$J = \bar{v}$$

11

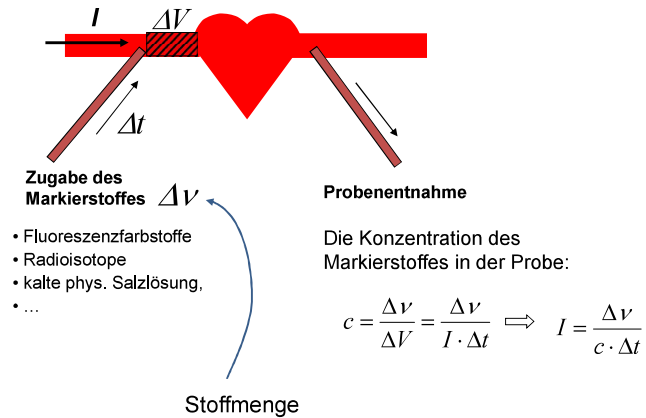
## Blutströmung

- Volumenstromstärke:  $I = \text{ca. } 5-6 \text{ Liter/Minute}$
- Messmethoden der Volumenstromstärke:



12



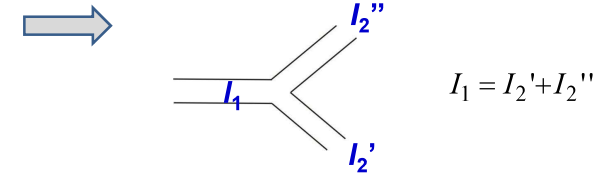
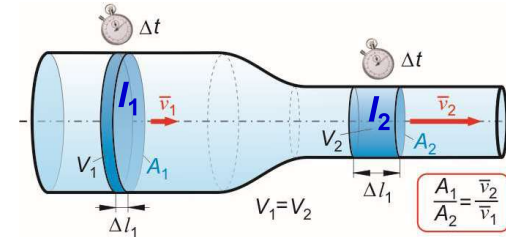


## Kontinuitätsgleichung im Blutkreislauf



Gefäß	Aorta	Arterien	Arteriolen	Kapillaren	Venolen	Venen	Hohlvenen
A (cm <sup>2</sup> )	4,5	20	400	4500	4000	40	18
v (cm/s)	23	5	0,25	0,022	0,025	2,5	6

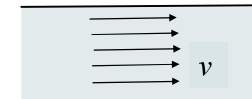
## 2. Kontinuitätsgleichung



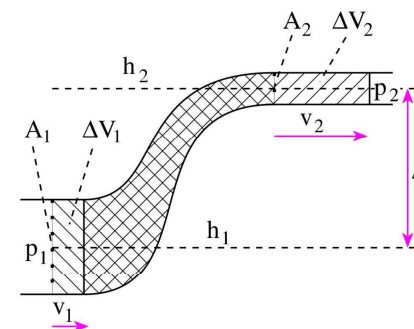
## 3. Strömung von idealen Flüssigkeiten

- Ideale Flüssigkeit: ohne innere Reibung

- Geschwindigkeitsprofil:

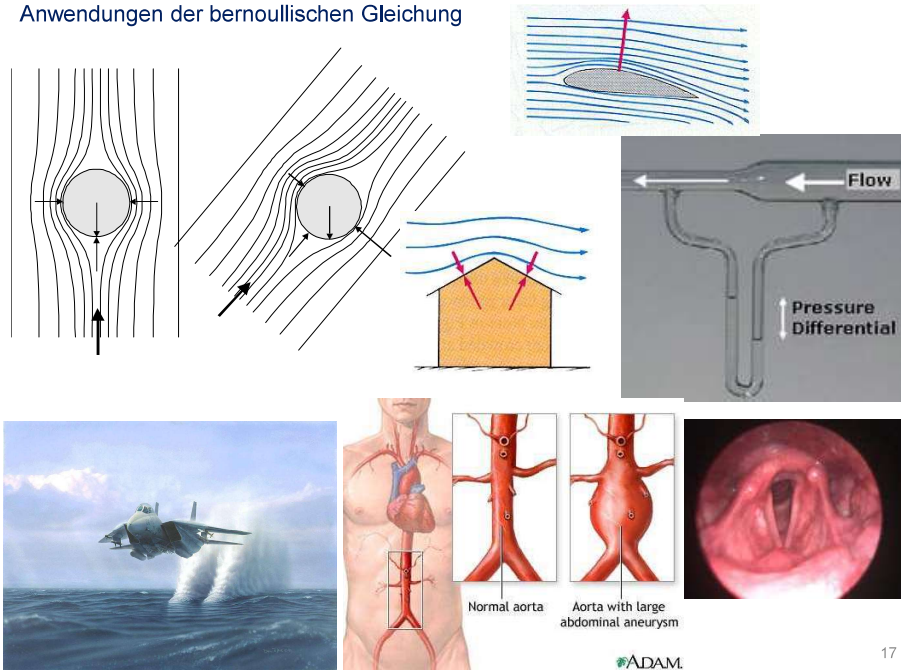


- Bernoullische Gleichung:



Daniel Bernoulli  
1700-1782  
Mathematiker  
Physiker  
Anatom

## Anwendungen der bernoullischen Gleichung



17

## 4. Strömung von reellen Flüssigkeiten

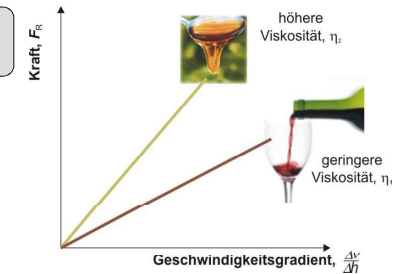
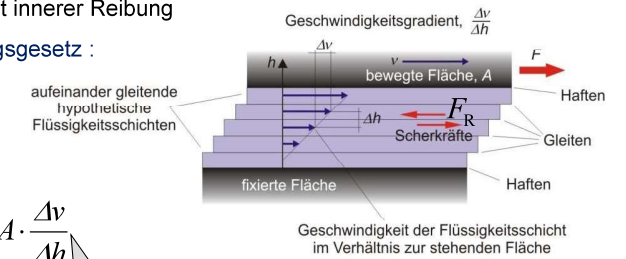
- Reelle Flüssigkeit: mit innerer Reibung
- Newtonsches Reibungsgesetz :

Bei gleichmäßiger Bewegung:

$$F = F_R = \eta \cdot A \cdot \frac{\Delta v}{\Delta h}$$

Viskosität (innerer Reibungskoeffizient)  $[\eta] = \text{Pa} \cdot \text{s}$

Geschwindigkeitsgradient



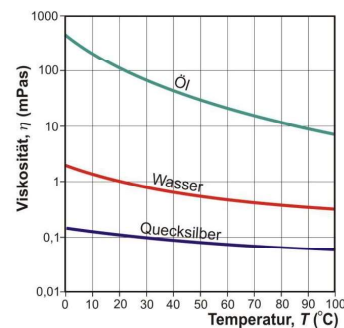
18

### ■ Viskosität:

- stoffspezifisch
- temperaturabhängig



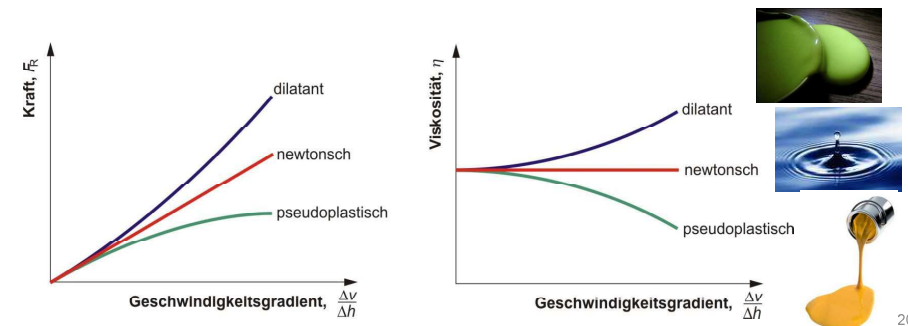
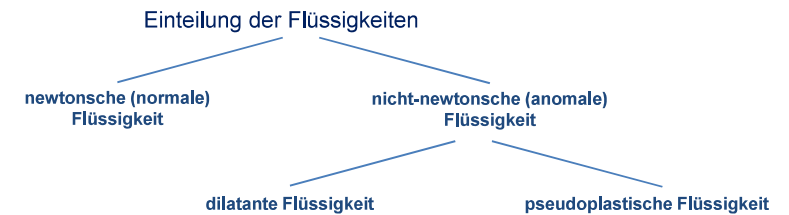
Stoff	$\eta$ (mPa·s) 20 °C
Luft	(101 kPa) 0,019
Wasser	1
Äthanol	1,2
Blut (37 °C)	2–8
Glyzerin	1490
Honig	2000–14000



$$\eta \sim T \cdot e^{\frac{\Delta E}{RT}}$$

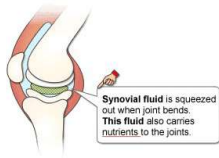
19

### ➢ geschwindigkeitsgradientabhängig

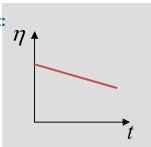


20

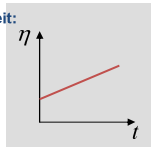
zeitabhängig



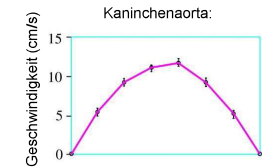
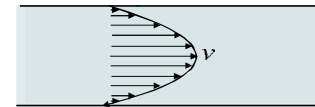
Thixotrope Flüssigkeit:



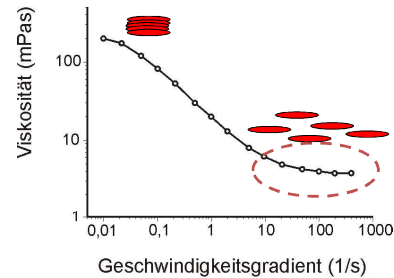
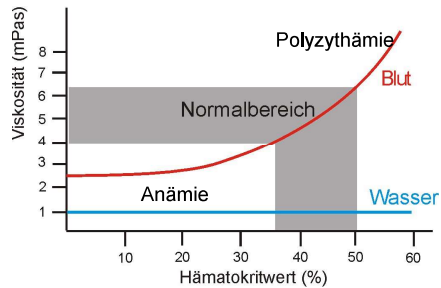
Rheopexe Flüssigkeit:



■ Geschwindigkeitsprofil:

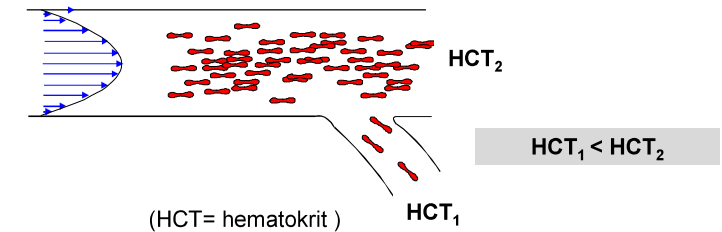


## Viskosität des Blutes



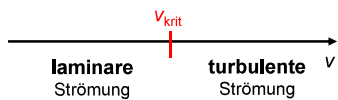
21

Eine physiologische Folgerung: Plasma-Skimming



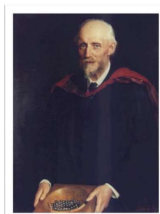
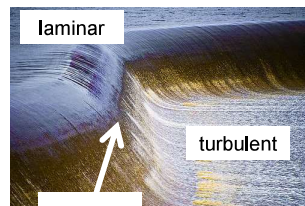
22

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



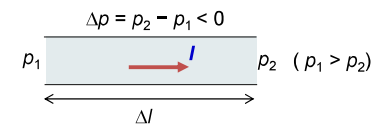
$$v_{krit} = Re \cdot \frac{\eta}{\rho \cdot r}$$

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



Osborne Reynolds  
1842-1912  
Wasseringenieur

■ Transportgesetz (Hagen-Poiseuille-Gesetz):



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

Bedingungen:

- inkompressible Fl.
- laminare Str.
- stationäre Str.
- newtonsche Fl.

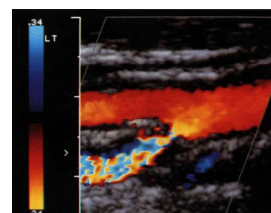
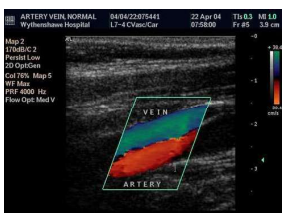


G. H. L. Hagen  
1797-1884  
Wasseringenieur



J. L. M. Poiseuille  
1799-1869  
Physiologe

Ist die Blutströmung laminar oder turbulent?



23

Alternativform:

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

Volumenstromdichte

„Strömungsleitfähigkeit“

24