

# Medizinische Biophysik

19.04.2021

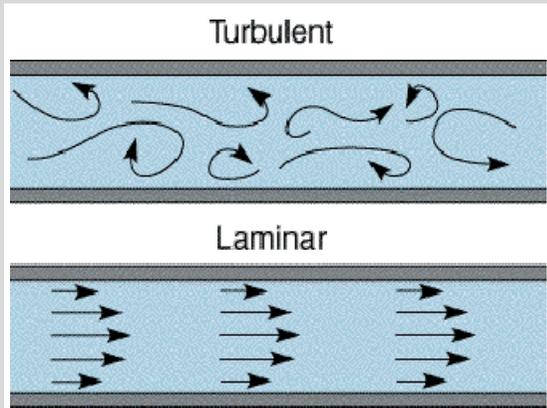
## Transportprozesse

### I. Strömungen (Volumentransport ) *Fortsetzung*

#### 4. Strömung von reellen Flüssigkeiten

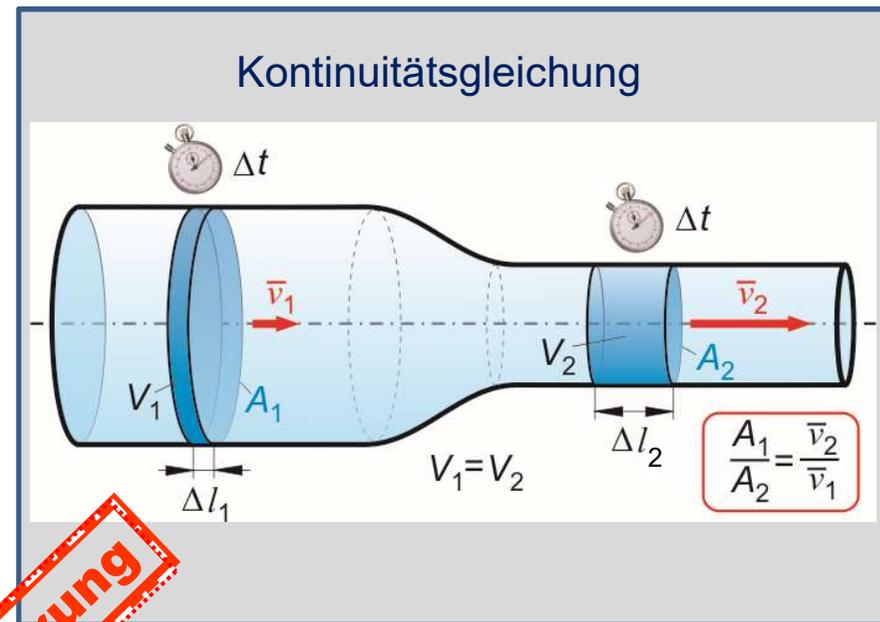
- Viskosität  Anwendung: Viskosität von Körperflüssigkeiten
- Kritische Geschwindigkeit  Anwendung: **Atmung/Blutströmung**
- **Transportgesetz** (Hagen-Poiseuille-Gesetz)  
Anwendung: **Atmung/Blutströmung**
- **Zusammenfassung über das Blut und den Blutkreislauf**

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

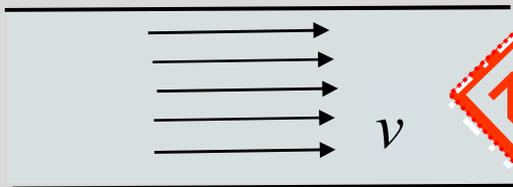


Volumenstromstärke ( $I$ ):  $I = \frac{\Delta V}{\Delta t} \left( \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right)$

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



Ideale Flüssigkeit (ohne innere Reibung)



Bernoullische Gleichung

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

Zur Erinnerung

- 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?

## 4. Strömung von reellen Flüssigkeiten

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

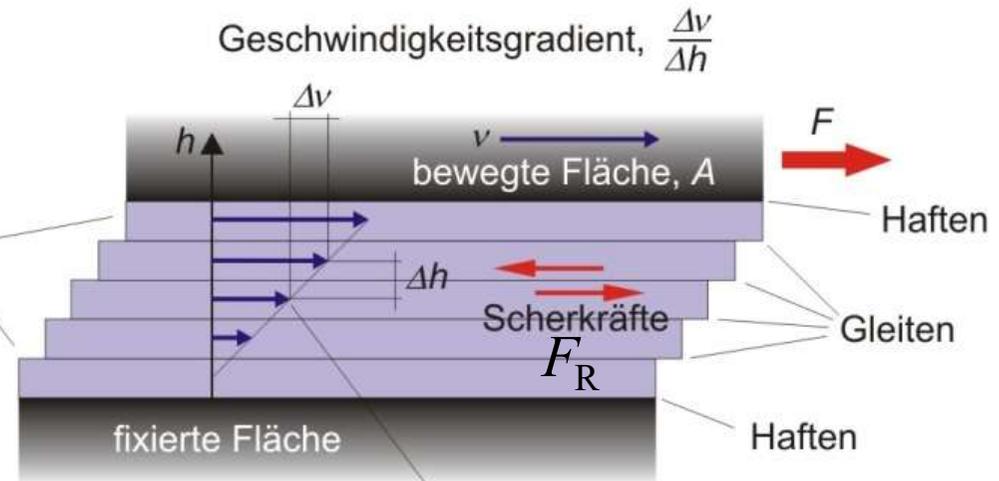
**Zur Erinnerung**

Bei gleichmäßiger Bewegung:

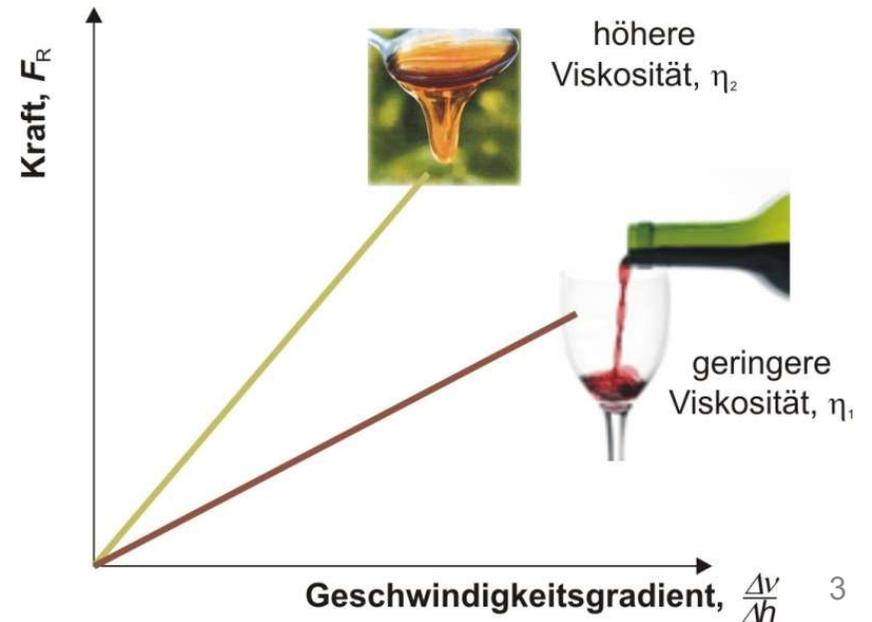
$$F = F_R = \eta \cdot A \cdot \frac{\Delta v}{\Delta h}$$

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

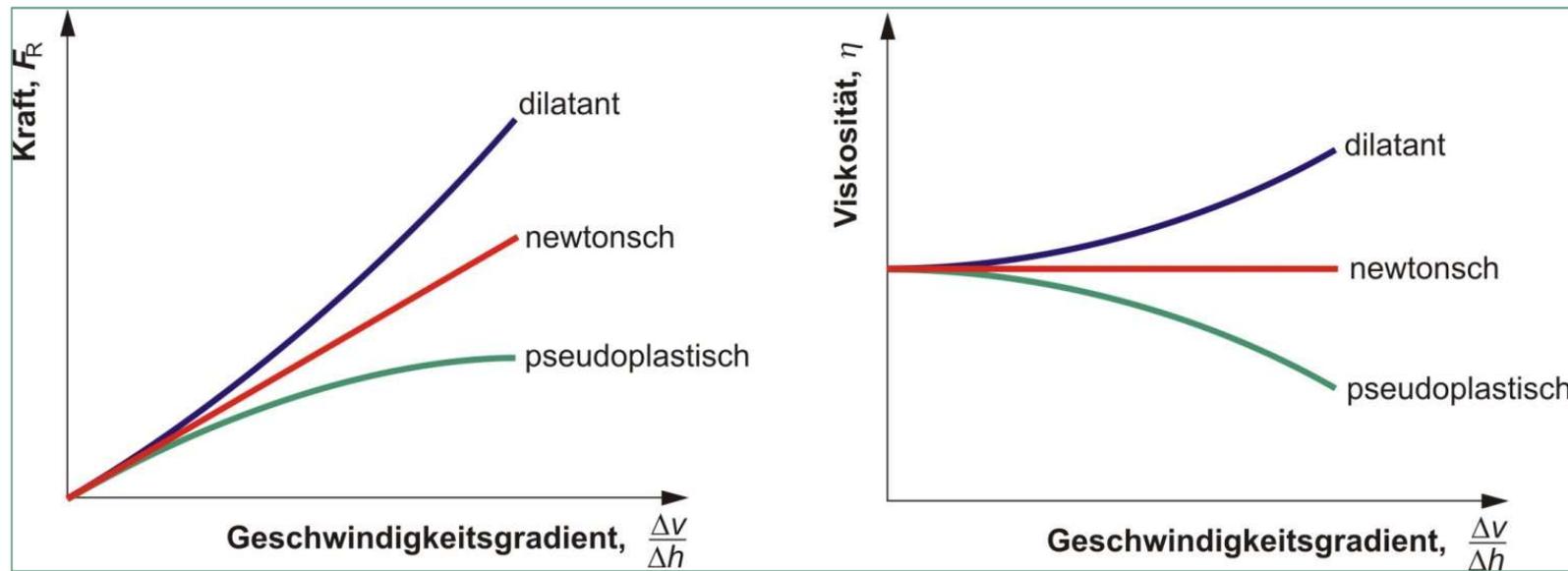
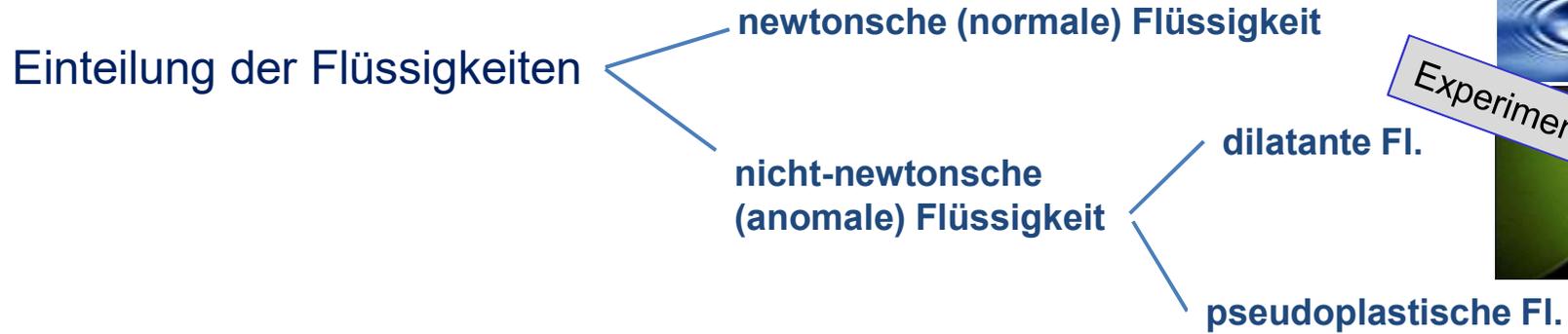
Geschwindigkeitsgradient



Geschwindigkeit der Flüssigkeitsschicht im Verhältnis zur stehenden Fläche

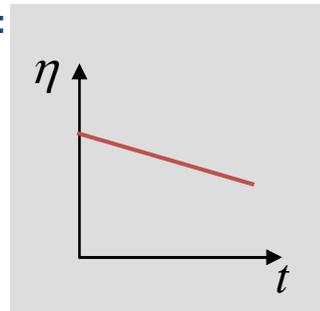
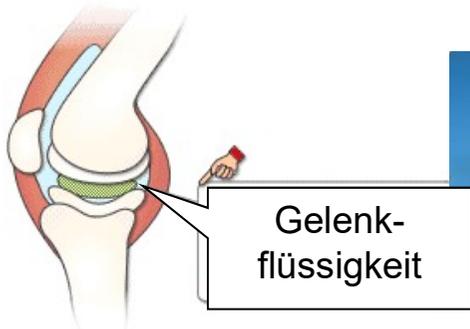


- Viskosität: ➤ geschwindigkeitsgradientabhängig

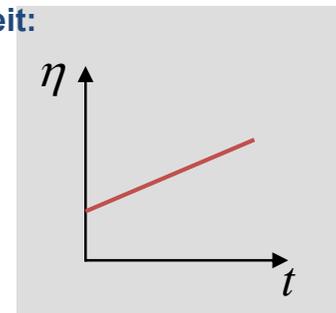


- zeitabhängig

Thixotrope Flüssigkeit:



Rheopexe Flüssigkeit:



# Viskosität der Körperflüssigkeiten

Liquor (Gehirn-Rückenmarks-Flüssigkeit, Cerebrospinalflüssigkeit)



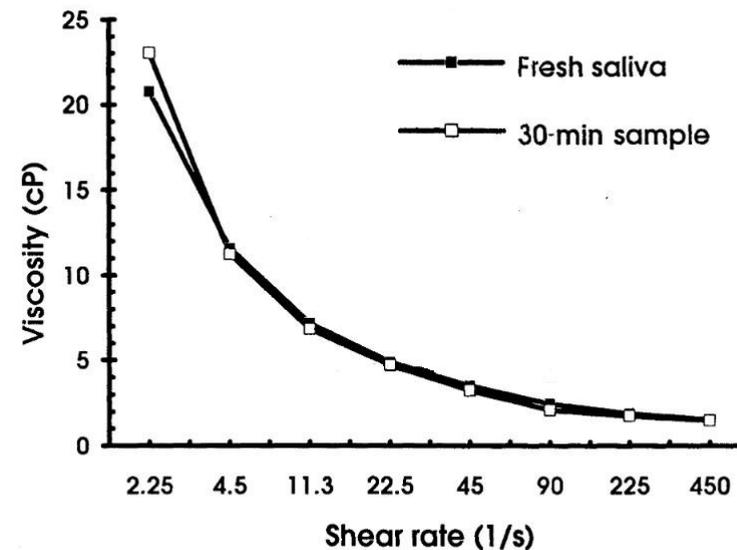
- newtonsche Flüssigkeit
- 0,7-1 mPas (37°C)

1. Großhirn
2. Kleinhirn
3. Hirnstamm
4. Rückenmark

Speichel

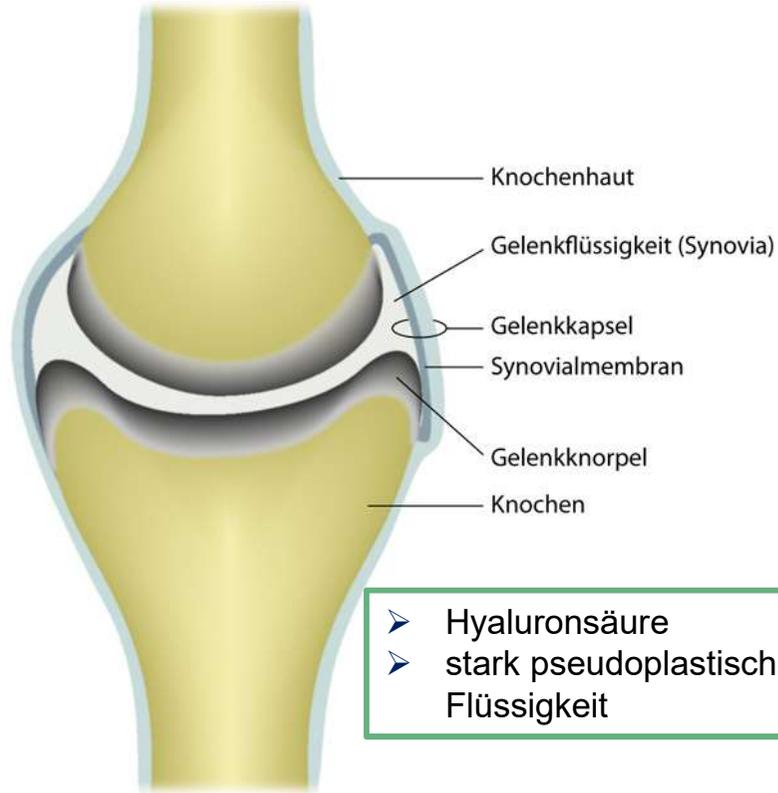


- Mucin
- pseudoplastische Flüssigkeit



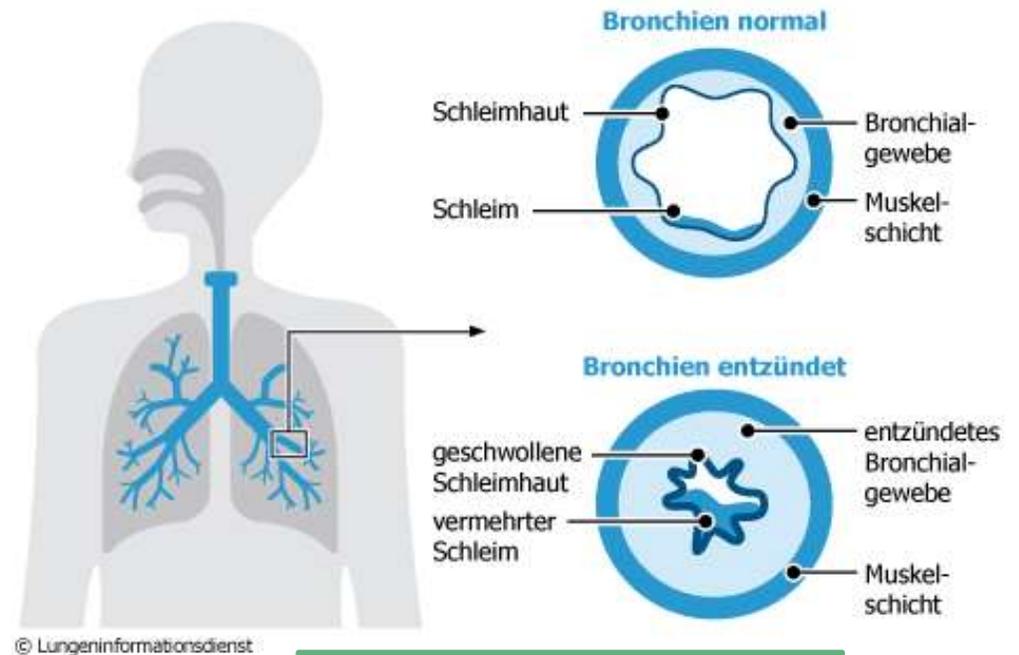
Nach Panu J. F. Rantonen & Jukka H. Meurman (1998) Viscosity of whole saliva, Acta Odontologica Scandinavica, 56:4, 210-214

## Gelenkflüssigkeit



- Hyaluronsäure
- stark pseudoplastische Flüssigkeit

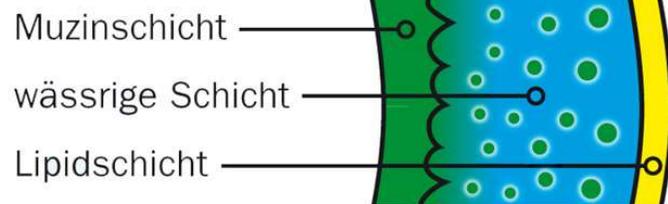
## Bronchialschleim



- pseudoplastische Flüssigkeit

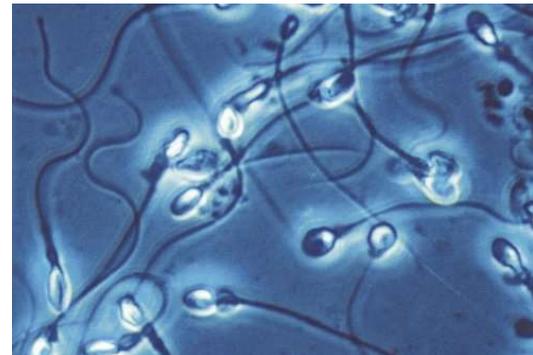
## Träne

### Aufbau des Tränenfilms



- pseudoplastische Flüssigkeit
- 1-10 mPas

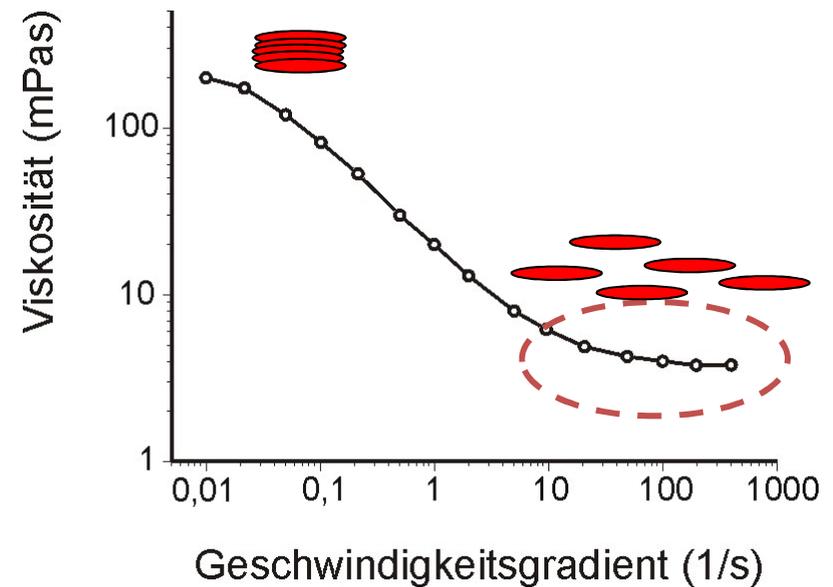
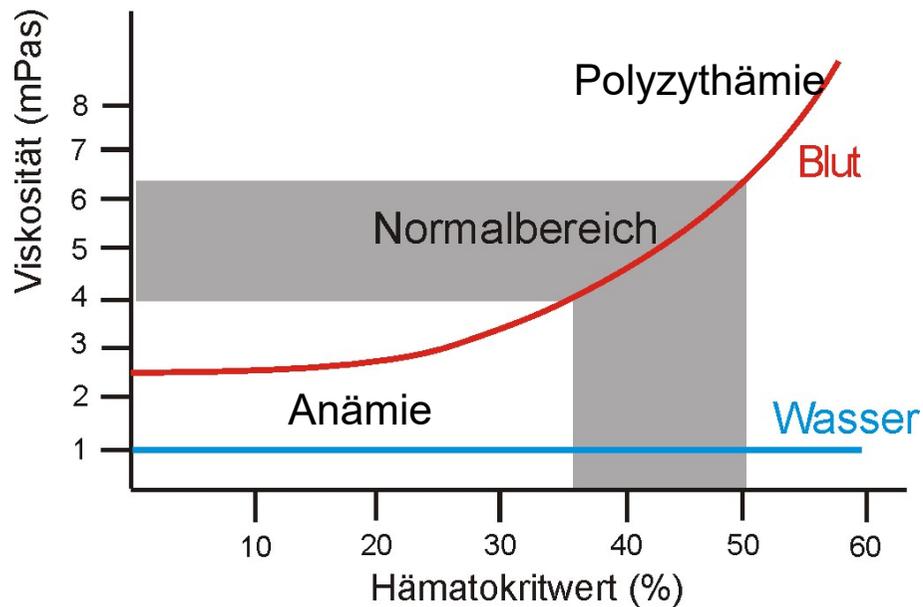
## Sperma



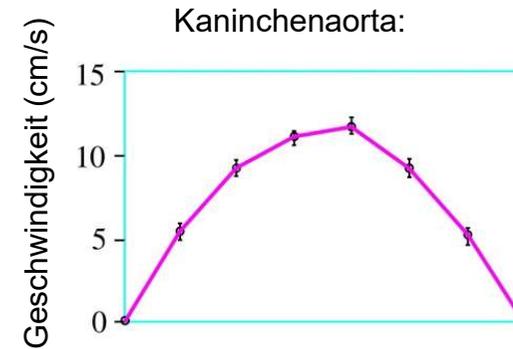
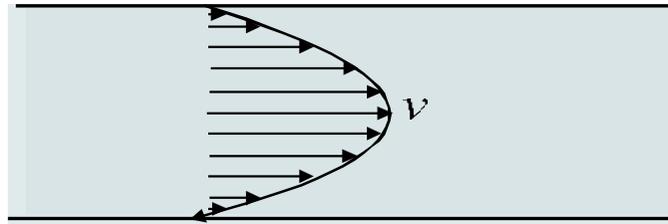
- pseudoplastische Flüssigkeit

# 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)

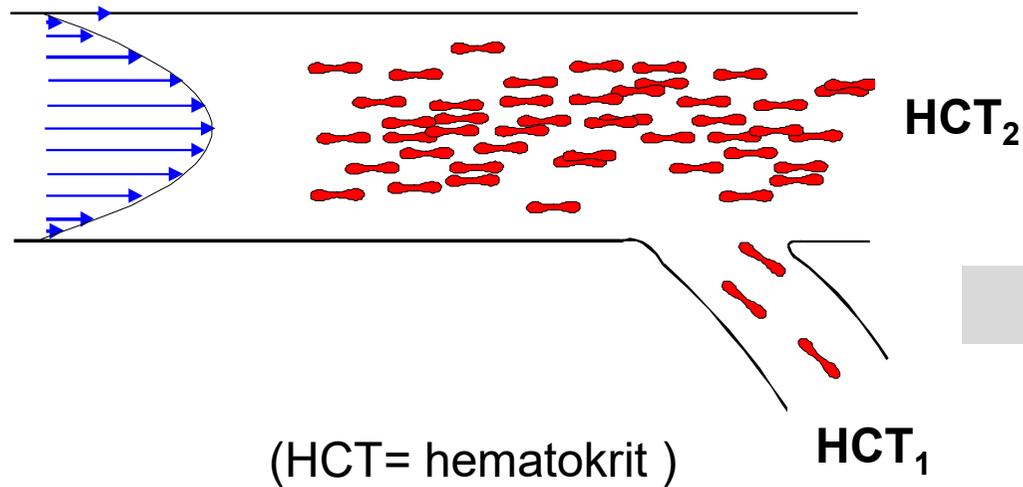


- Geschwindigkeitsprofil von reellen Flüssigkeiten:

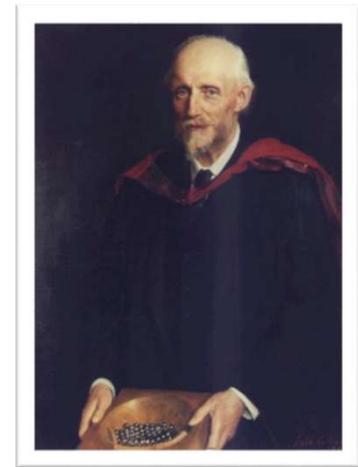
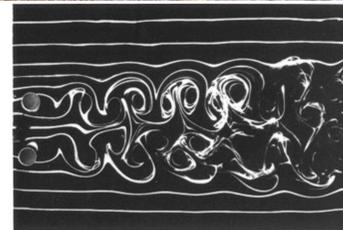
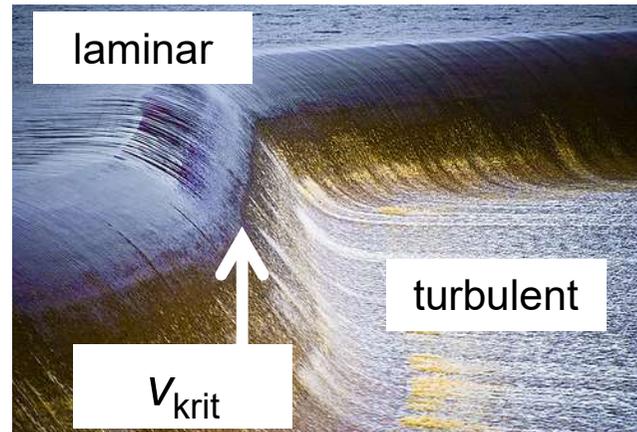
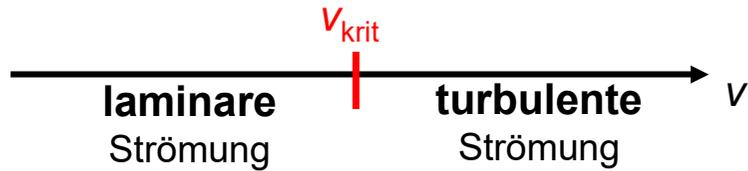


Eine physiologische Folgerung: Plasma-Skimming

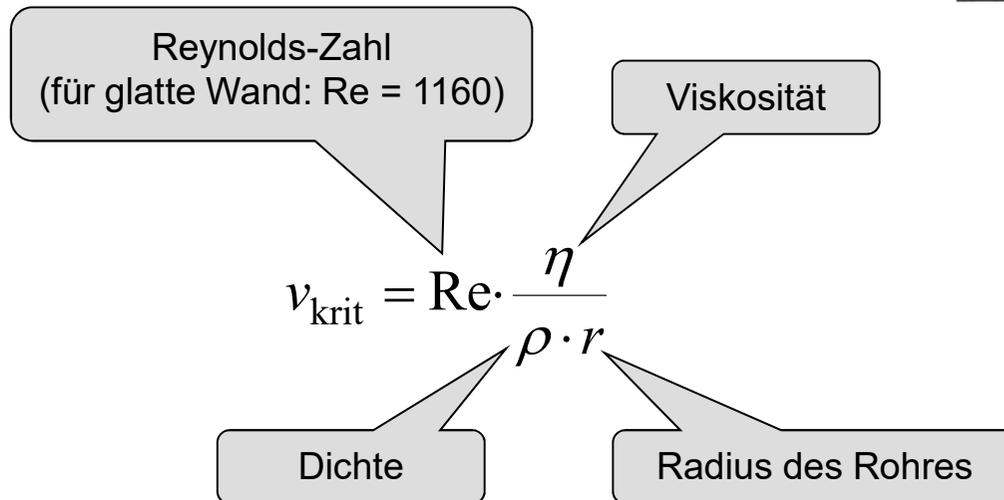
Parabolisches Geschwindigkeitsprofil + bernoullische Gleichung →



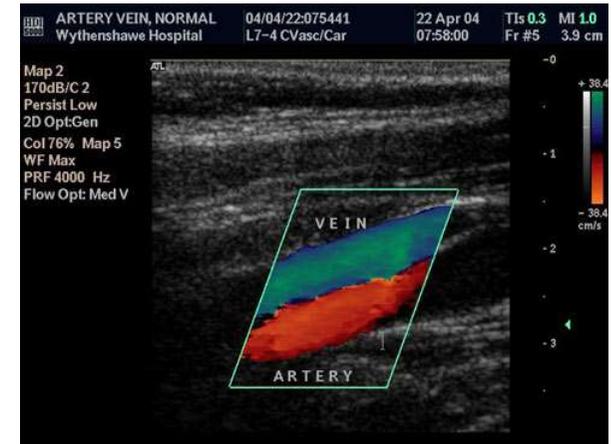
▪ Kritische Geschwindigkeit ( $v_{krit}$ ):



Osborne Reynolds  
1842-1912  
Physiker und  
Wasseringenieur



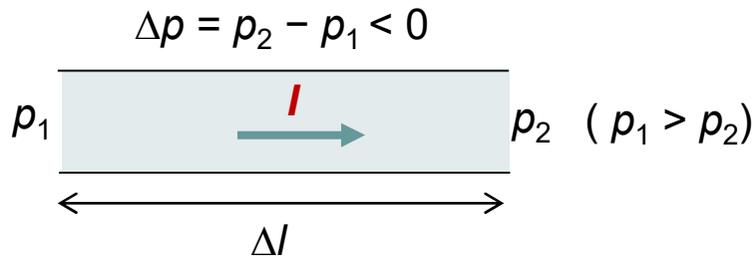
Ist die Blutströmung laminar oder turbulent?



Ist die Strömung der Luft bei Atmung laminar oder turbulent?



- 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

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

Strömung

Elektrischer Strom

Hagen–Poiseuille-Gesetz

Ohmsches Gesetz

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

$\frac{1}{R_{str}}$

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

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



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

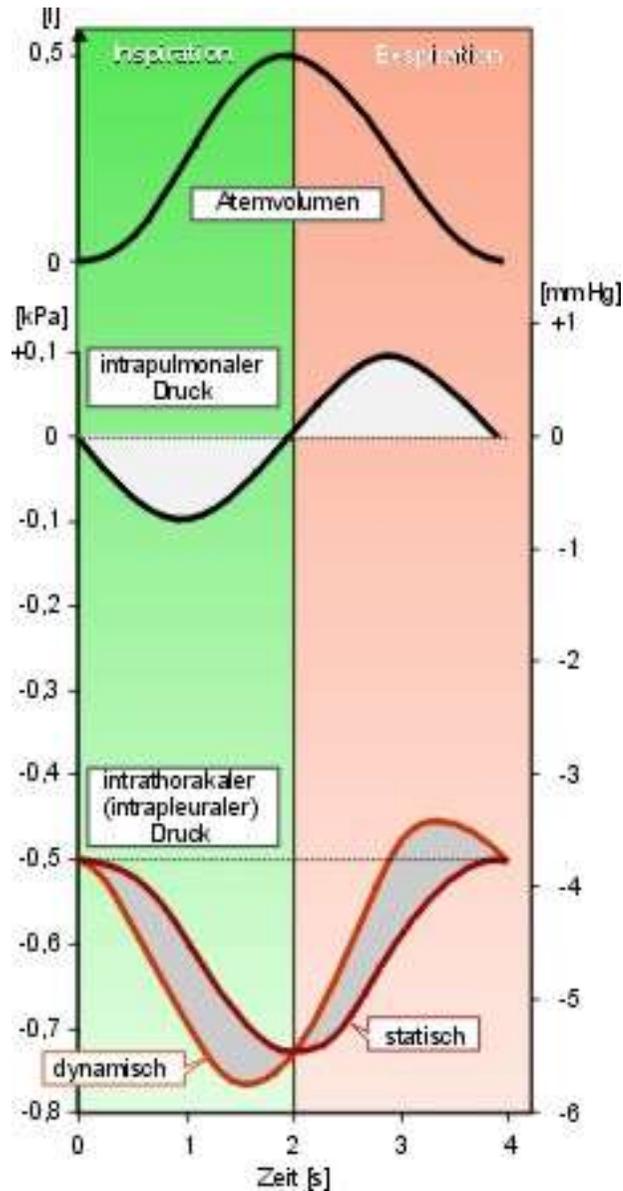
$$R_{str} = \frac{8}{\pi} \eta \frac{\Delta l}{R^4} = 8\pi\eta \frac{\Delta l}{(\pi R^2)^2} = 8\pi\eta \frac{\Delta l}{A^2}$$

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

# 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:

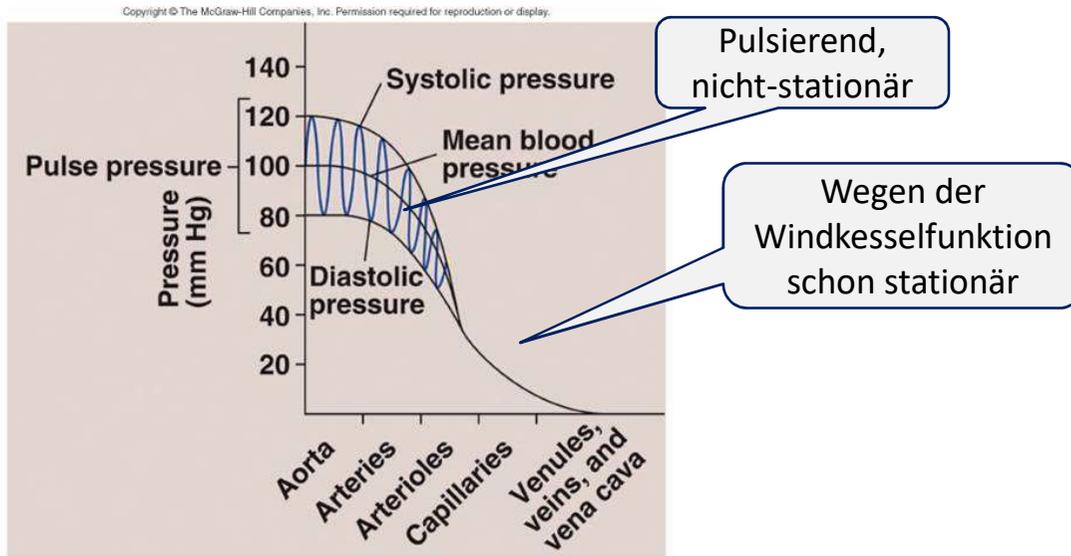
### ➤ Druck ( $\Delta p$ )

- Intrapulmonaler **Druck** ( $\Delta p$ ) 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?



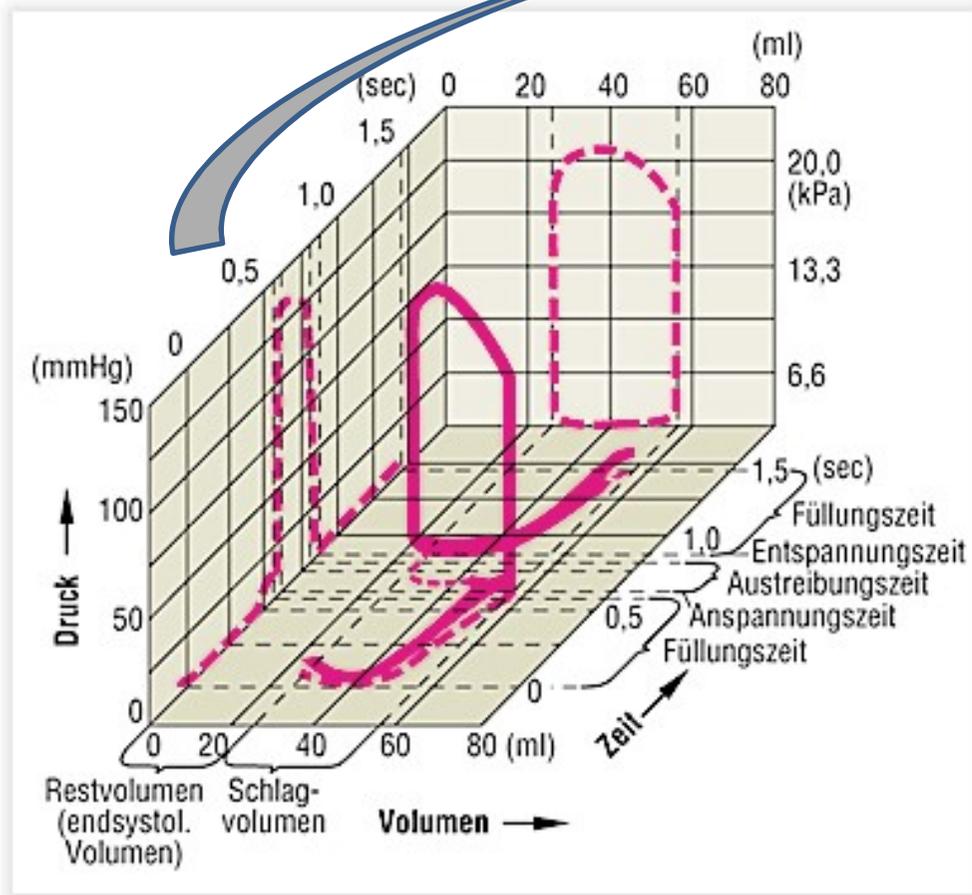
- inkompressible Fl.? 😐
- laminare Strömung? 😐
- stationäre Strömung? 😐
- newtonsche Fl.? 😞

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

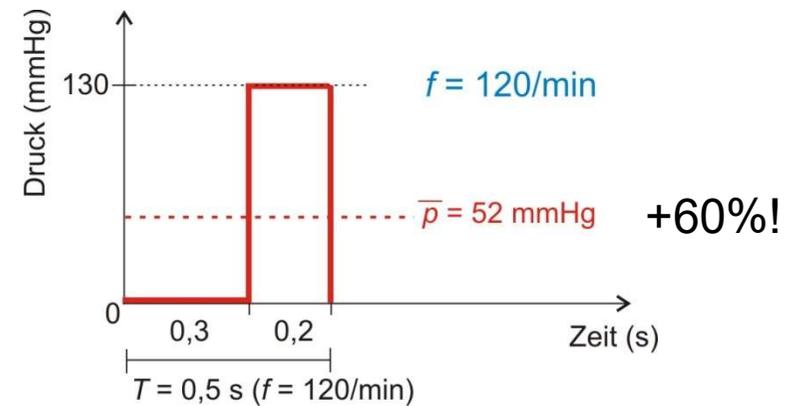
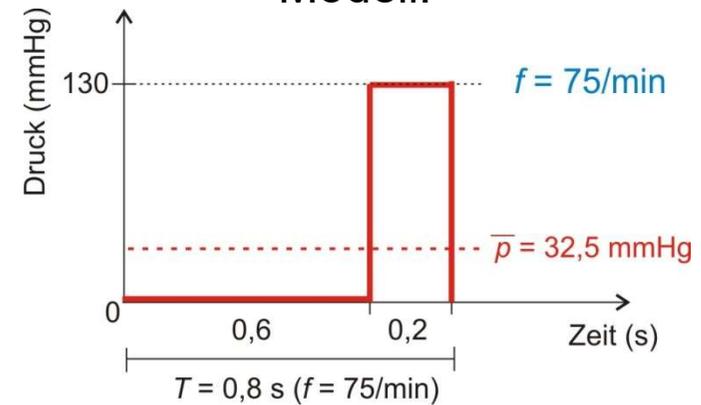
**Doch zeigt das Gesetz richtig, wie die Blutströmung reguliert werden kann.**

# Anwendung: Blutkreislauf

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



Modell:

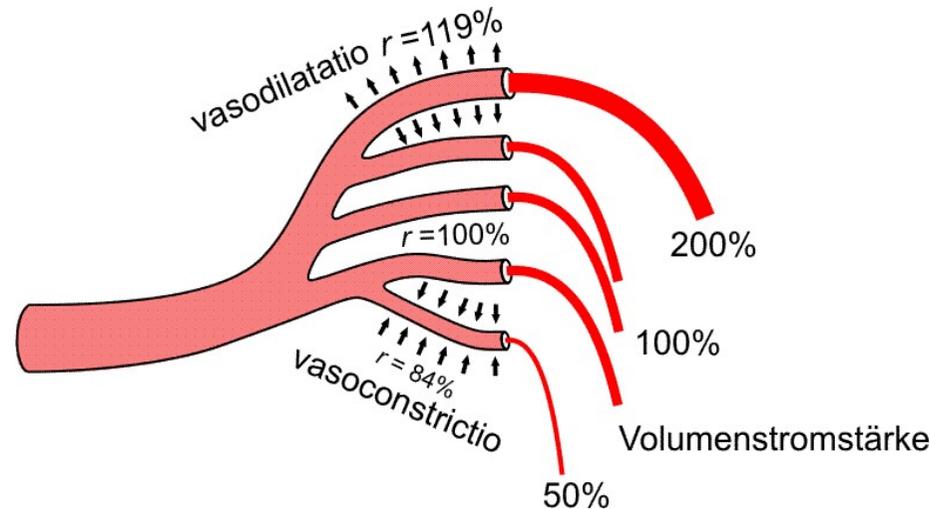


Der Durchschnittswert ( $\bar{\Delta p}$ ) kann durch die Pulszahl geändert werden!

# Anwendung: Blutkreislauf

- Regulation der Volumenstromstärke laut Hagen-Poiseuille-Gesetzes:

➤ Radius ( $R^4$  !)



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

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

„Strömungs-  
widerstand“

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

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*

# 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.

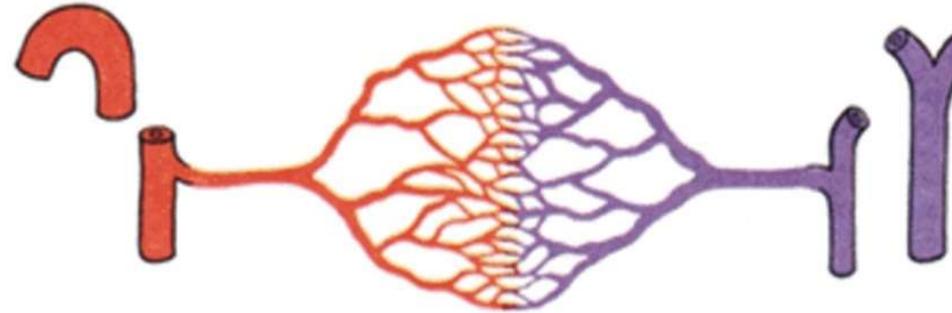
## Blutströmung

Die Blutströmung ist

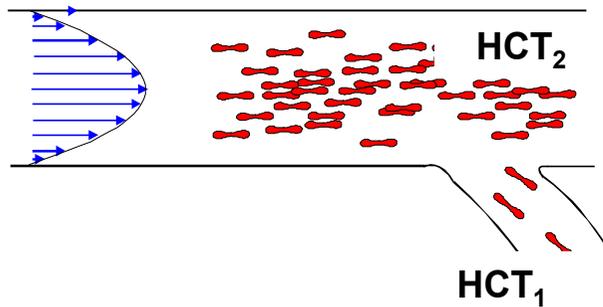
- überwiegend **laminar** ( $v < v_{\text{krit}}$ ),
- in dem ersten Abschnitt des Blutkreislaufs **nicht-stationär** (pulsierend), später schon **stationär**.

Es gilt die Kontinuitätsgleichung:

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

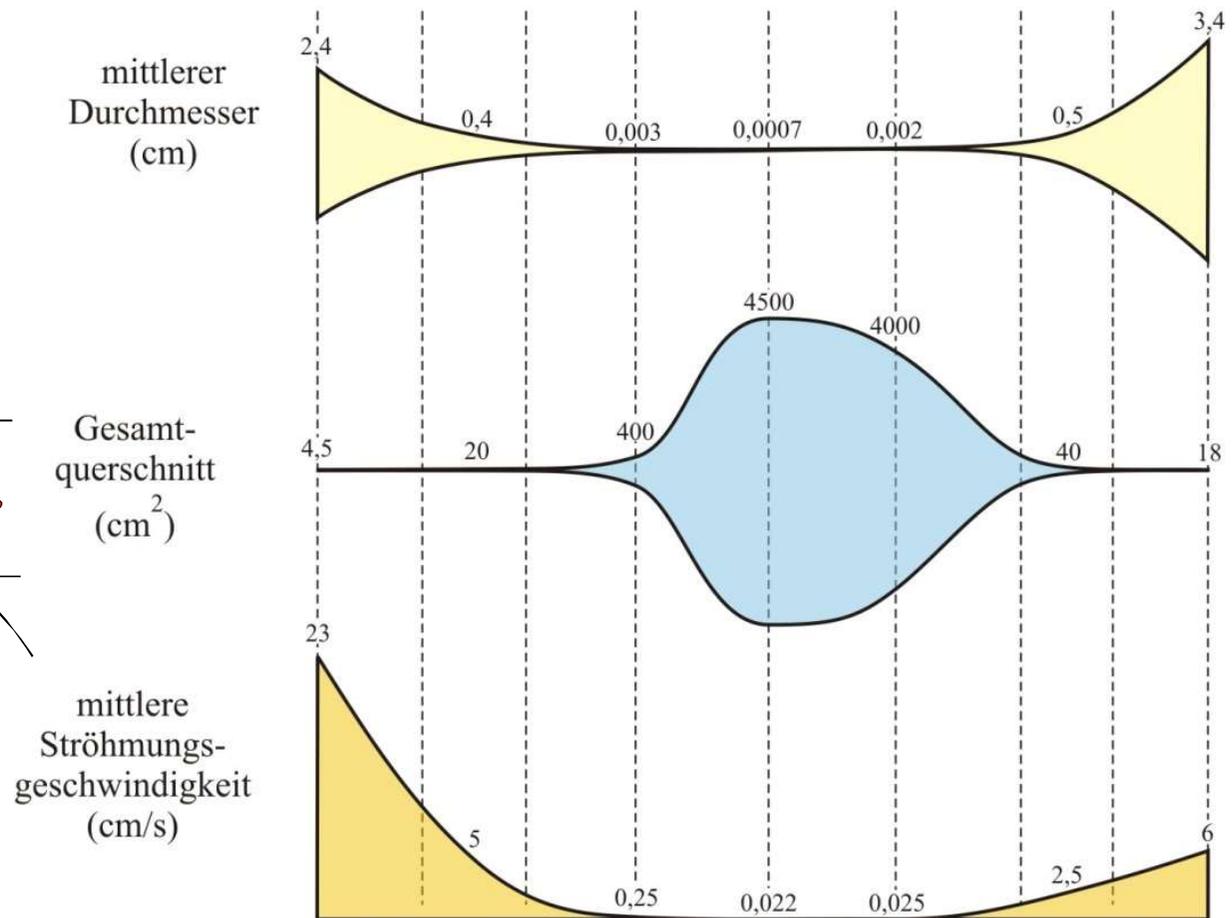


Annähernd gilt die Bernoulli-Gleichung:



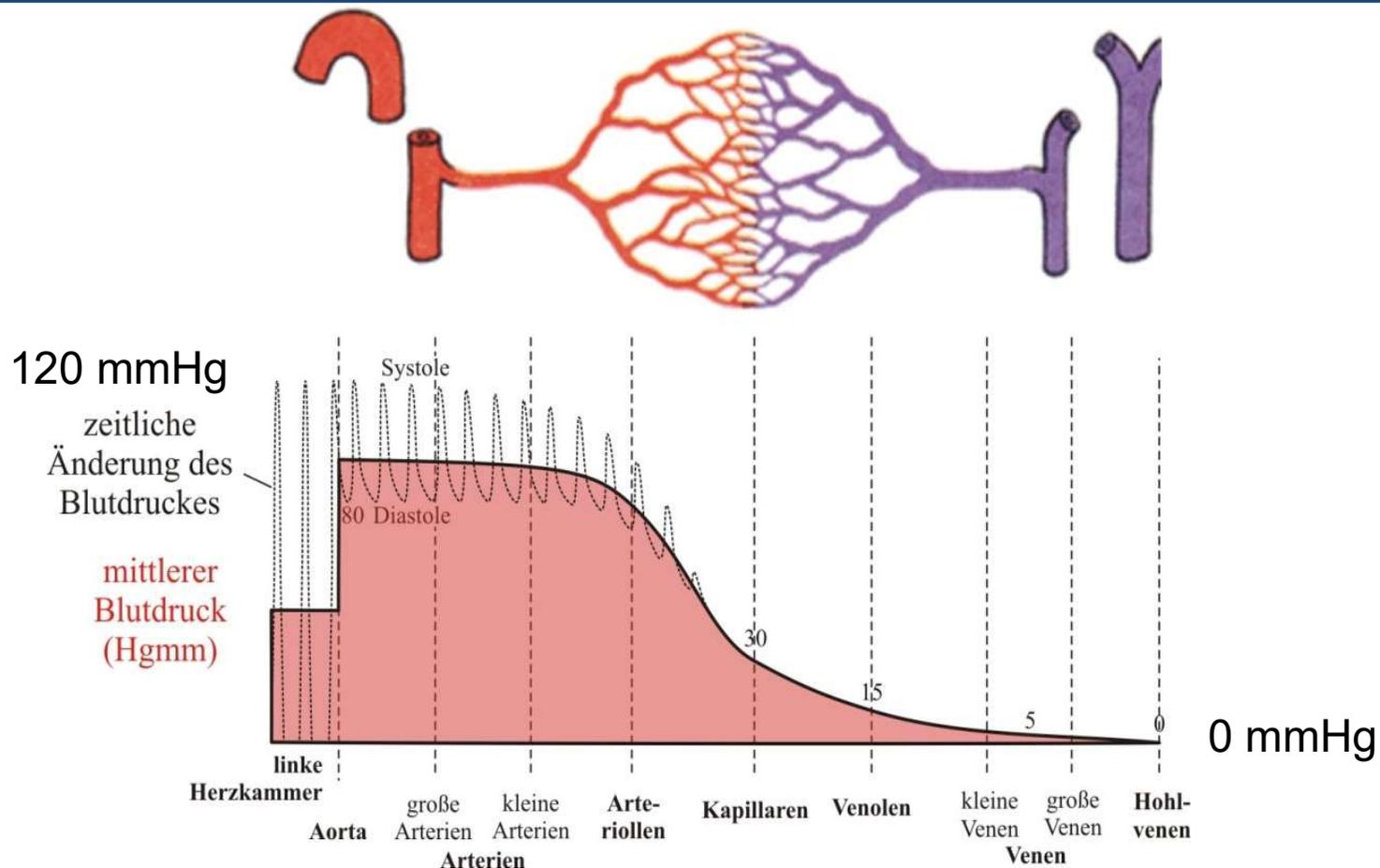
$$HCT_1 < HCT_2$$

Plasma-Skimming



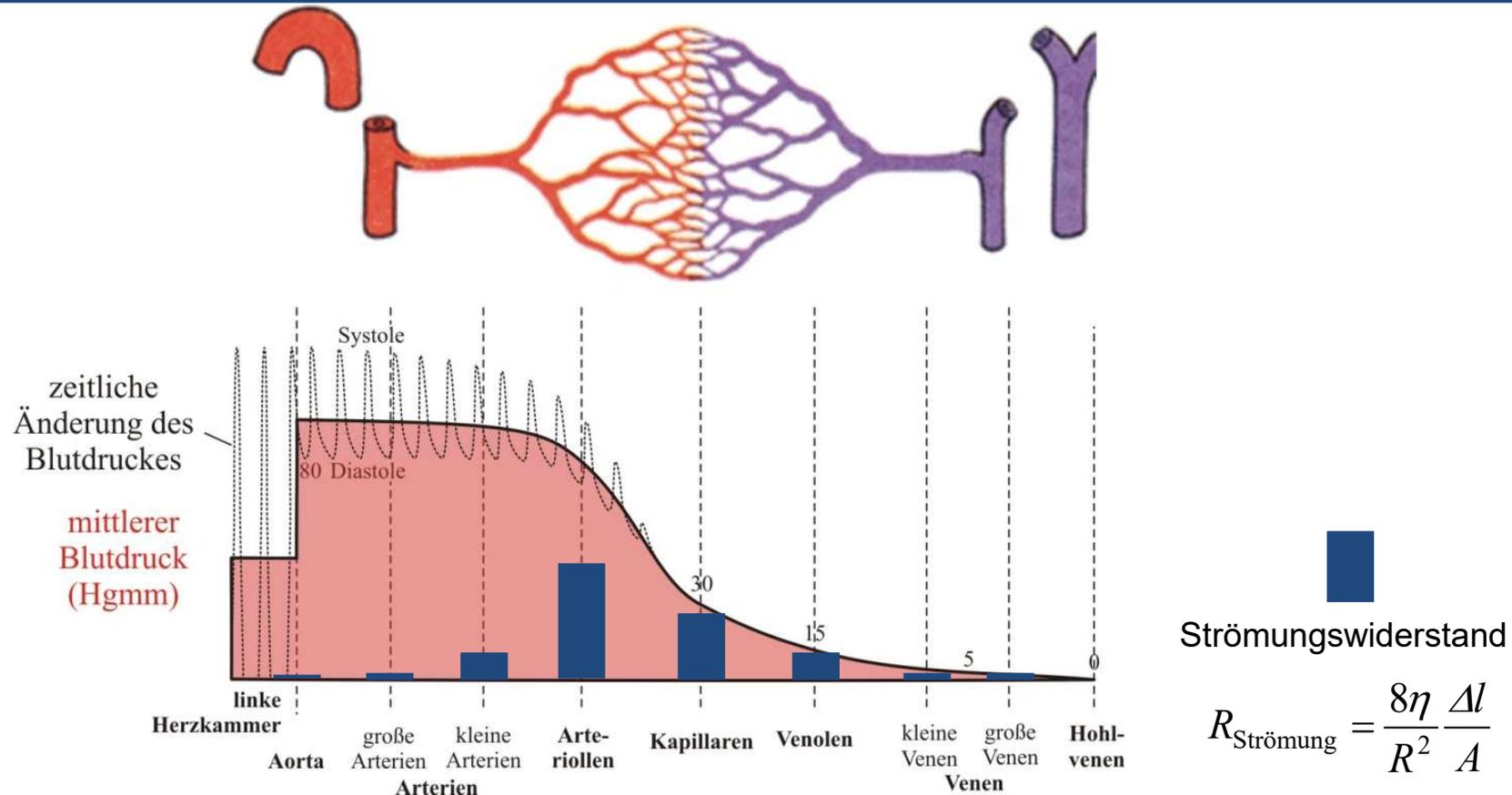
Die Blutströmung wird durch die Herzarbeit aufrecht erhalten:  
Durch Muskelkontraktion wird in dem linken Ventrikel (über dem atmosphärischen Druck (cca. 760 mmHg)) ein Überdruck erzeugt.

- 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

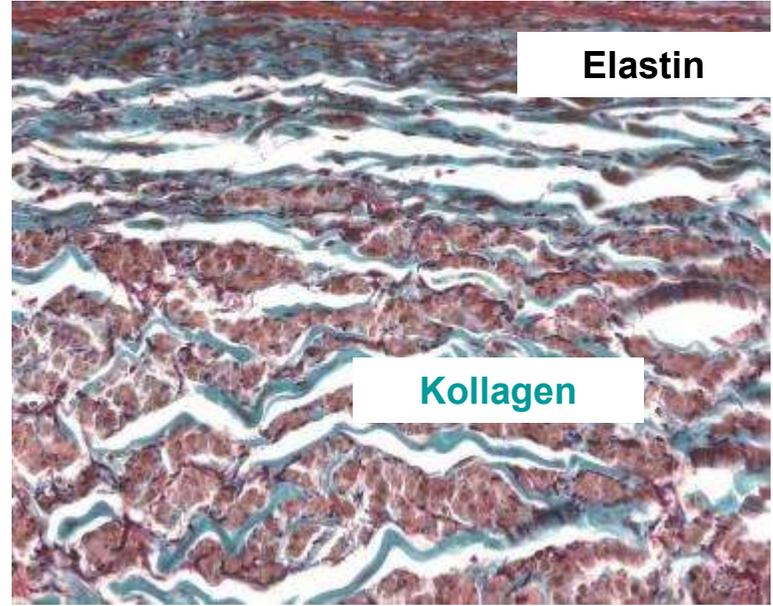
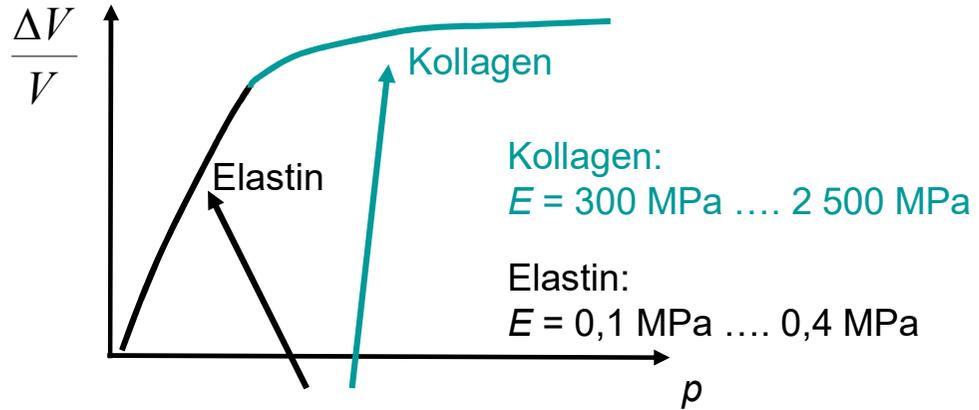
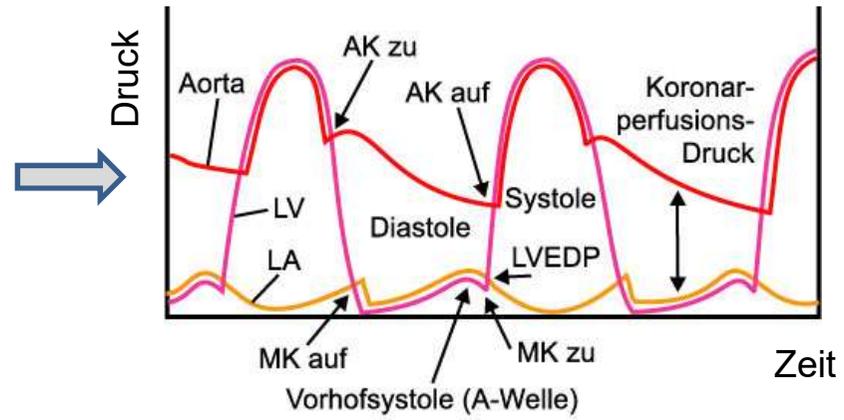
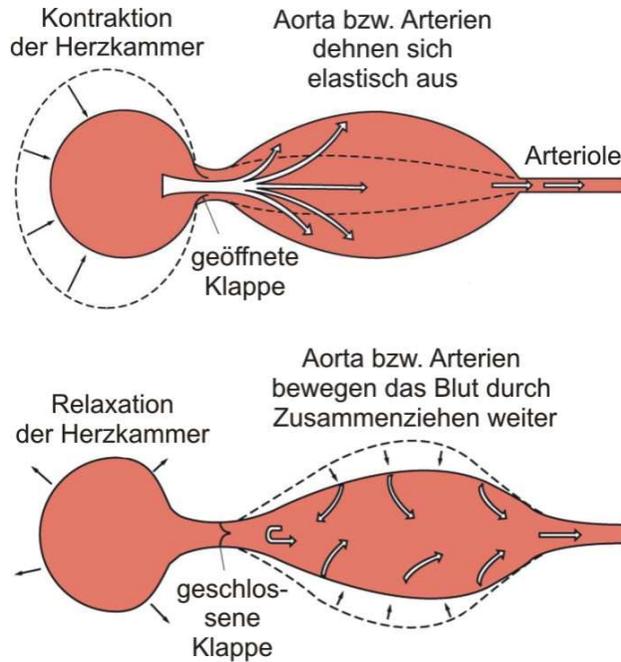
- $\overline{\Delta p}$  (durch Herzfrequenz!)
- und  $r$  (Gefäßerweiterung bzw. Gefäßverengung;  $R^4$ !) reguliert.



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

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

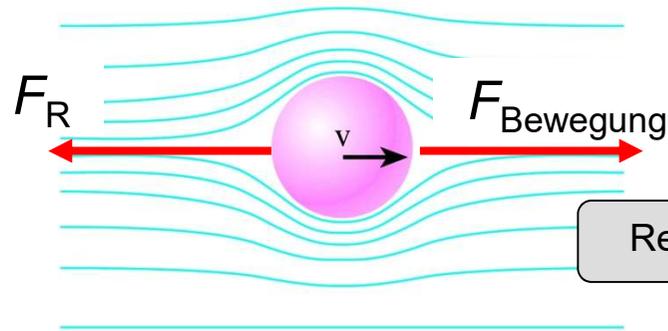
# Ergänzung: Rolle der Elastizität der Aorta und der Arterien (Windkesselfunktion)



➔ Abweichung von dem HP-Gesetz!

## 5. Bewegung von Teilchen in realen Flüssigkeiten

Bei kleineren  
Geschwindigkeiten:



**stokessches  
Reibungsgesetz:**

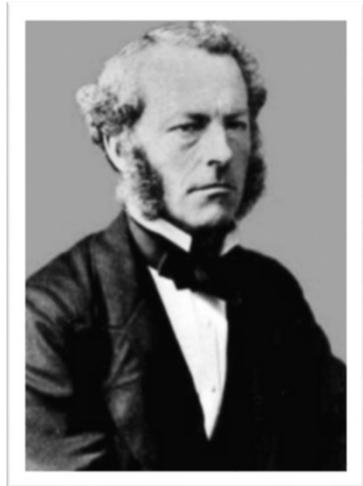
Reibungskraft

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