

# Physik I

Mechanik der Kontinua und Wärmelehre

**Thomas Schörner-Sadenius**



Universität Hamburg

Wintersemester 2014/15

# ORGANISATORISCHES

Thomas Schörner-Sadenius: Wissenschaftler (Teilchenphysik) am Deutschen Elektronen-Synchrotron (DESY)

Kontakt: [thomas.schoerner@desy.de](mailto:thomas.schoerner@desy.de)

Telefon 8998 3429

DESY, Notkestr. 85, Gebäude 1, Zimmer O2/337

Skript und Bücher:

- Vorlesungstemplate typisch zwei Tage vor Vorlesung auf dem Netz
- Bücher: Demtröder, Tipler, Giancoli, ...
- Wichtig, in mehr als einem Buch nebenher zu lesen!

# INHALTE

## Mechanik der Kontinua

- Festkörper (deformierbare Körper)
- Flüssigkeiten (inkompressibel, hydrostatischer Druck)
- Gase (Druck, Kompressibilität, barometrische Höhenformel)

## Wärmelehre

- Temperatur
- thermische Ausdehnung
- ideales Gas
- kinetische Gastheorie
- 1. Hauptsatz der Wärmelehre
- spezifische Wärmen
- 2. Hauptsatz der Wärmelehre
- Kreisprozesse
- Entropie
- reale Gase
- Phasen und Phasenübergänge

# MECHANIK DER KONTINUA

Jetzt: Kräfte auf Substanzen, die i. A. an Bewegung gehindert sind

↳ Materie in Aggregatzuständen: fest - flüssig - gasförmig.

Beschreibung: atomares Modell  $\Rightarrow$  relevante Kräfte zwischen Atomen / Molekülen

$E_{pot}$  zwischen Atomen

$$\text{Kraft } \vec{F} = -\vec{\nabla} E_{pot}$$

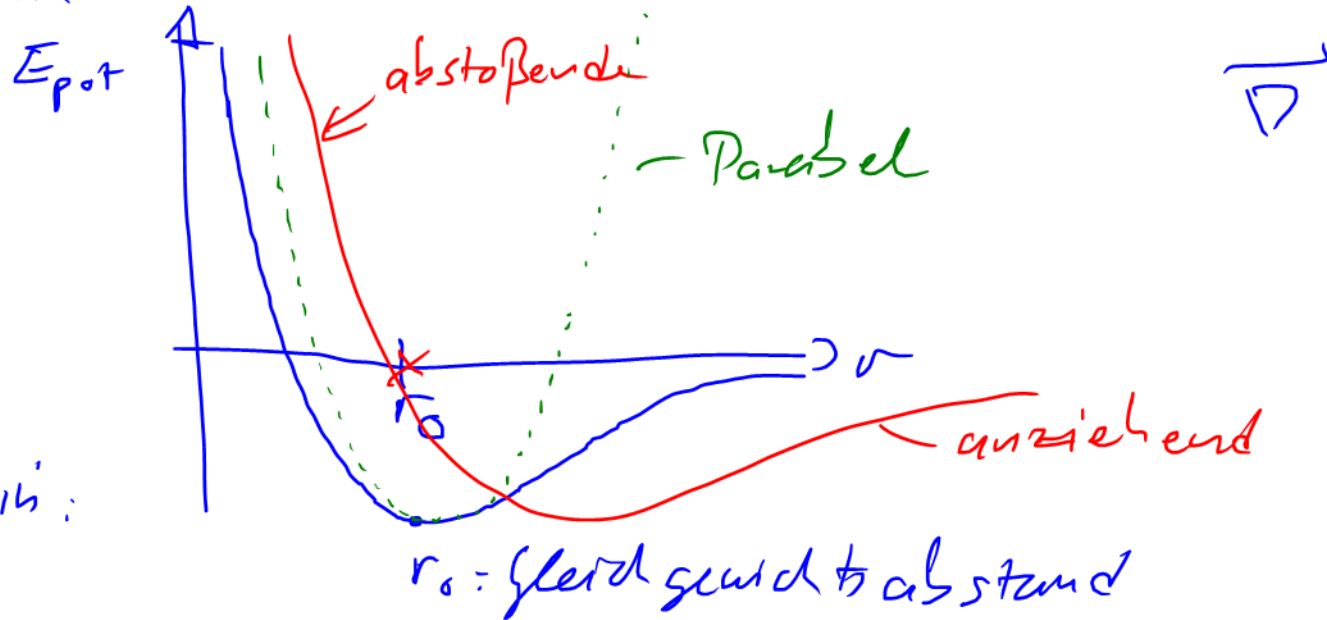
$$(F = -\frac{d}{dr} E_{pot})$$

kleine  $|r - r_0|$  klein:

$$E_{pot} \sim |r - r_0|^2$$

$$F = -k|r - r_0|$$

$\Rightarrow$  Hooke'sches Gesetz. elastisches Verhalten!

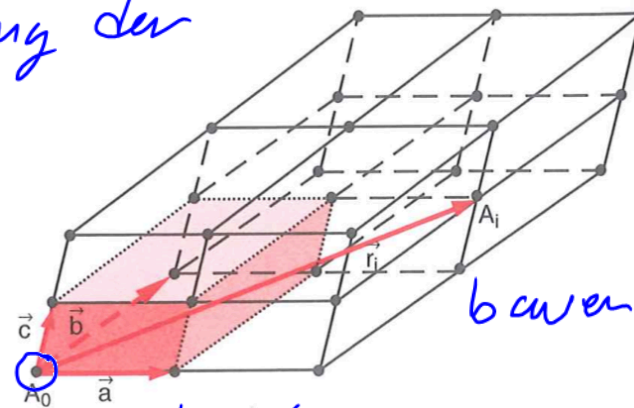


$r_0$ : Gleichgewichtsabstand

Atome haben auch  $E_{kin}$ !  
wichtig:  $E_{kin}/E_{pot}$ !

# FEST – FLÜSSIG – GASFÖRMIG

Festkörper (FK) (i.W. formstabil)  
 z.B. Kristalle: regelmäßige Anordnung der  
 Atome:  
 $\vec{r} = n_a \vec{a} + n_b \vec{b} + n_c \vec{c}$   
 Fernordnung!



$\vec{a}, \vec{b}, \vec{c}$ : Basis-  
 vektoren  
 b oder Einheit zelle  
 auf.

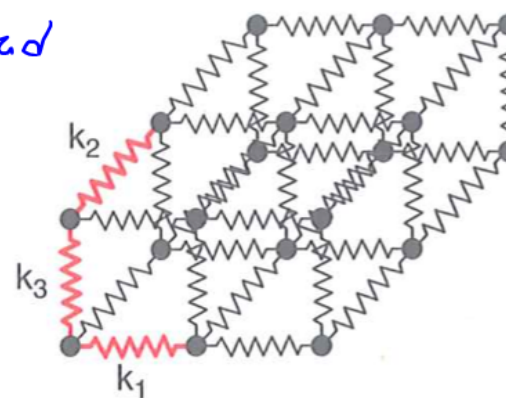
Beschreibung: Federmodell mit Federkonstanten  $k_i$

Temperatur  $T$ : Schwingungen um Ruhelage  
 mit  $\overline{E_{kin}} = \frac{1}{2} k_B T$  pro Freiheitsgrad

unterhalb d. Schmelztemperatur:

$$\overline{E_{kin}} \ll |E_{pot}| \quad (E_{pot} < 0)$$

$\Rightarrow$  gebundenes System.

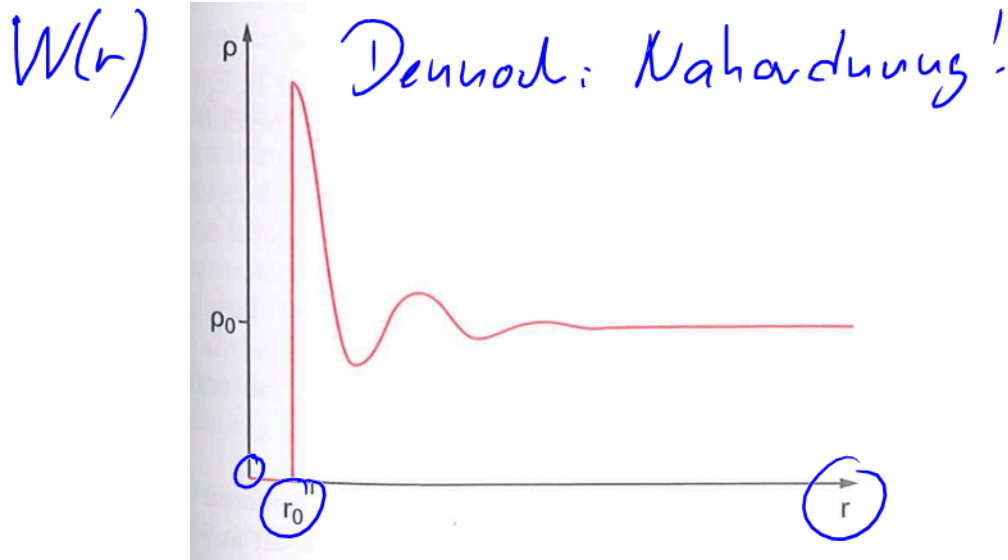


$k_B$  Boltzmann-  
 Konstante  
 $k_B = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$

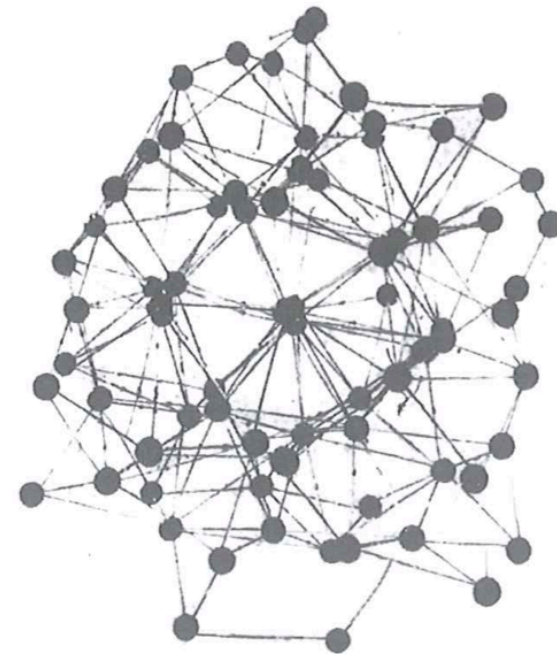
Bilder: Demtröder

# FEST – FLÜSSIG – GASFÖRMIG

Flüssigkeiten: Atome nicht mehr ortsfest, aber nah (flaches)  
Minimum in  $E_{pot}$  bei  $r_0$ .



Modell: Atome durch Fäden verbunden  
Erhöhung von  $T$ ,  $T > T_{Siede}$   
 $\Rightarrow$  Übergang in Gasphase



Bilder: Demtröder

# DICHTE

Beispiel:  $N_2$  Stickstoff  
( $p = 1 \text{ atm}$ )

$$\rho_{\text{gas}} (20^\circ\text{C}) = 1,251 \cdot 10^{-3} \text{ g/cm}^3$$

$$\rho_{\text{Fe}} (-196^\circ\text{C}) = 0,808 \text{ g/cm}^3$$

$\hookrightarrow T_{\text{Siede}}$

$$\rho_{\text{Fl}} (-252^\circ\text{C}) = 1,026 \text{ g/cm}^3$$

$$T_{\text{Schmelz}} = -210^\circ\text{C}$$

kg/m<sup>3</sup>

kein großer Unterschied!

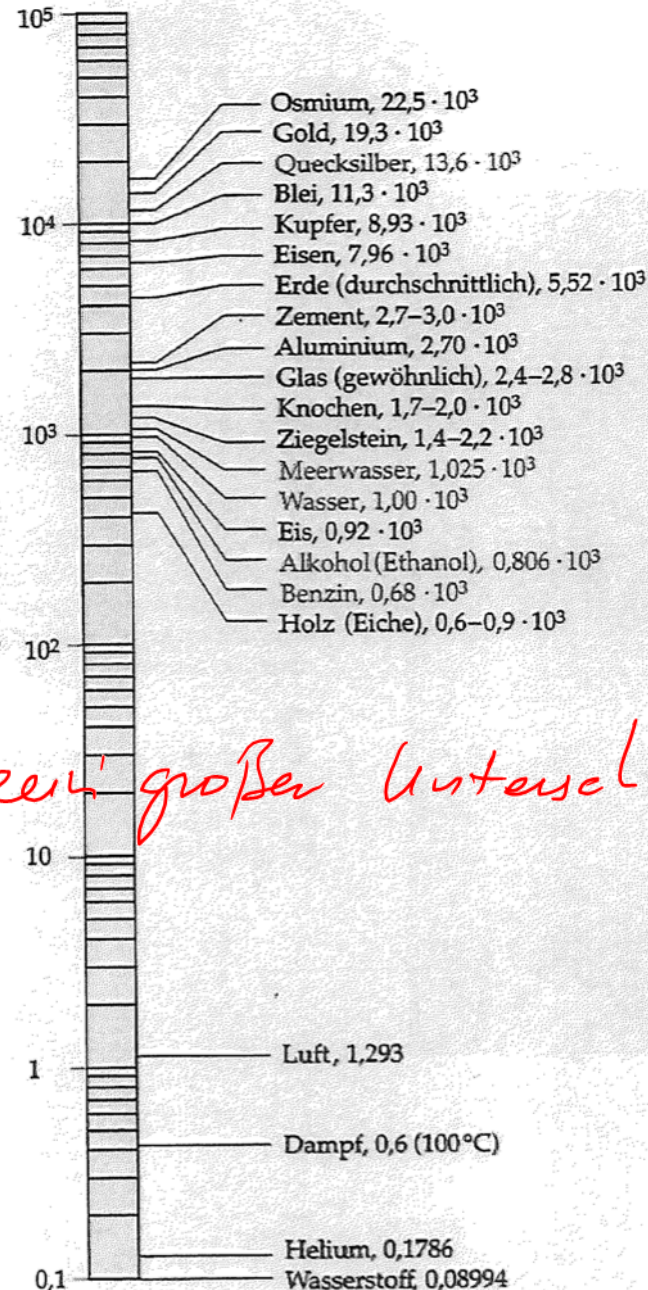
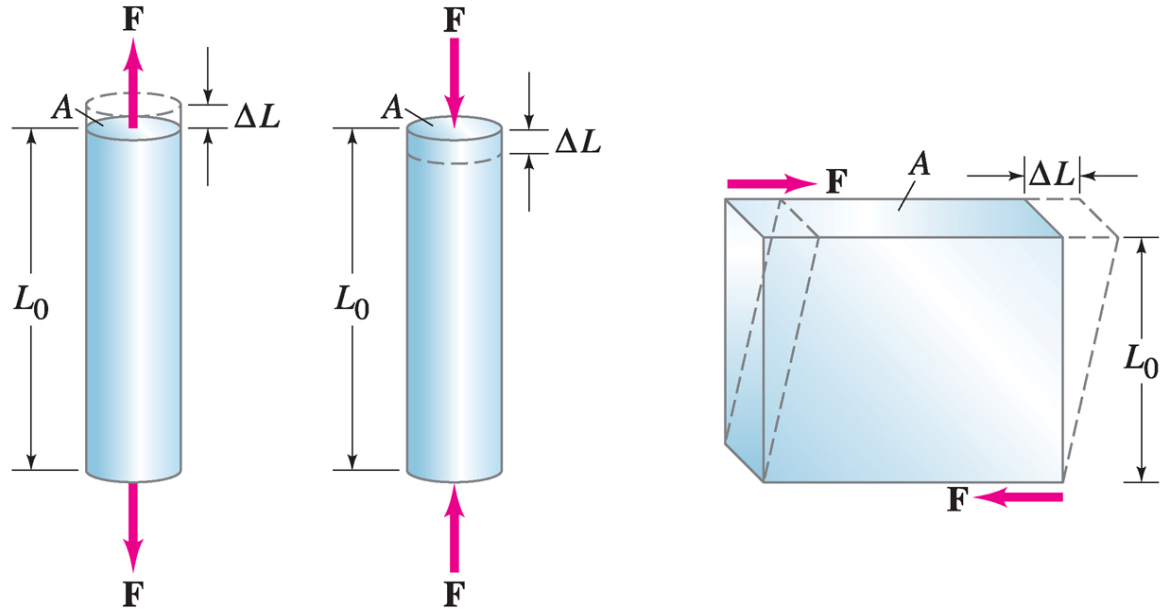


Bild: Tippler

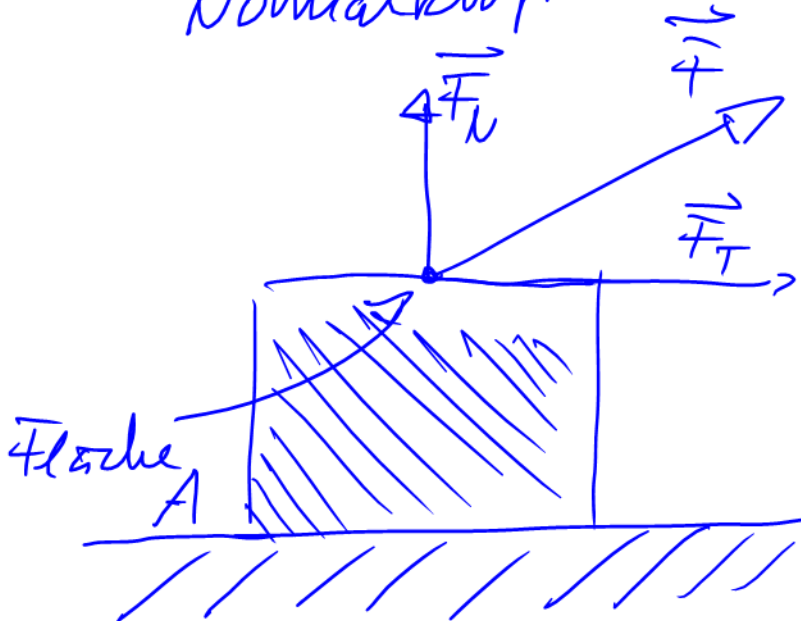


# FESTKÖRPER – ZUG, SPANNUNG, SCHERUNG

Kraft auf Körper: Zug oder Spannung  
 ⇒ Deformation!



Normalkraft



Definition:

$$\sigma = \frac{F_N}{A}$$

$$\tau = \frac{F_T}{A}$$

Normalspannung  
 Scher/Schubspannung

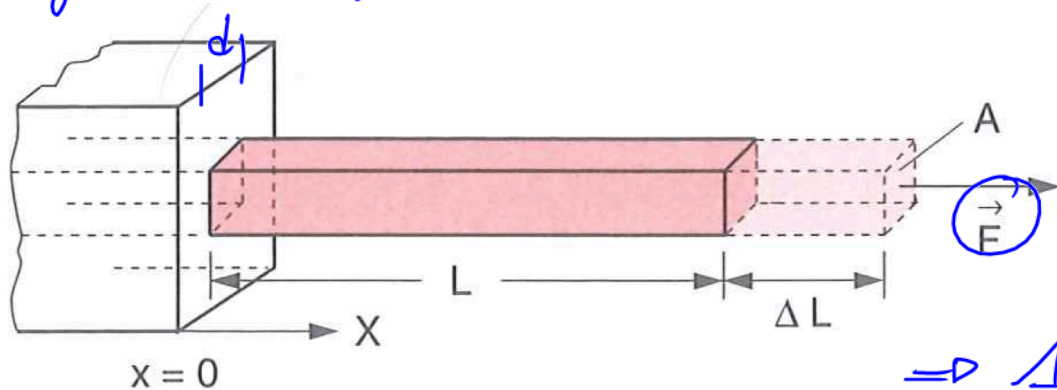
Einheiten:  $[\sigma] = [\tau] = \frac{N}{m^2} = \text{Pascal, Pa}$

Bild: Giancoli



# BEISPIELE I

Längenänderung eines Stabes durch Zug: Bedingung  $\frac{\Delta L}{L} \ll 1$



Beobachtungen:

Proportionalität:  $\Delta L \sim L$

$$\Delta L \sim \frac{F}{A} = \sigma$$

$$\Rightarrow \Delta L = \frac{1}{E} L \cdot \sigma$$

$E$ : Elastizitätsmodul

Eisen:  $100 \cdot 10^9 \text{ Pa}$

Stahl:  $150 \cdot 10^9 \text{ Pa}$

Kupfer:  $125 \cdot 10^9 \text{ Pa}$

Erz:  $10 \cdot 10^9 \text{ Pa}$

1) Verhalten nicht zwangsläufig isotrop: Tensoren

2)  $\frac{\Delta L}{L} \ll 1$ :  $\Delta L = \frac{L}{EA} F \equiv D \cdot F$   $D \approx \frac{1}{k}$

3) Querkontraktion: Poissonzahl / Querszahl  $\mu$

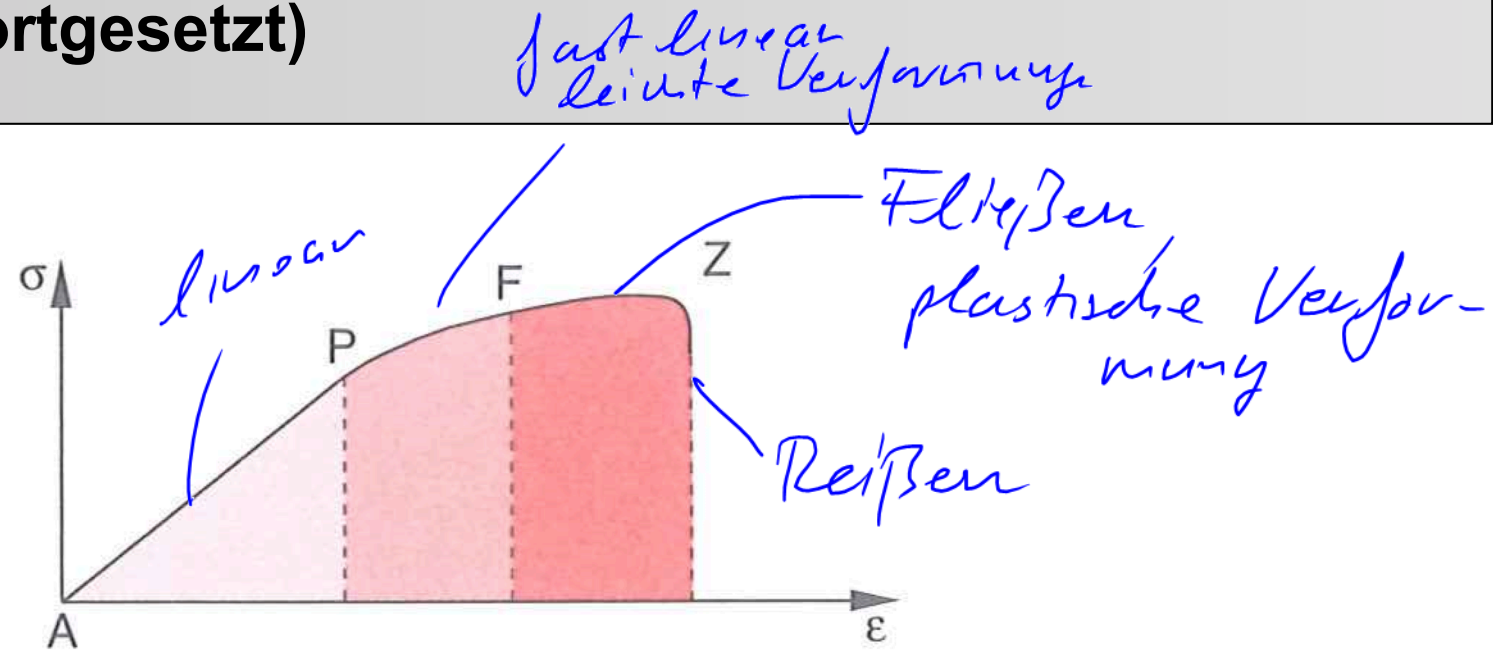
$$\frac{\Delta d}{d} = -\mu \frac{\Delta L}{L}$$

$$\mu = 0,2 - 0,5 \Rightarrow \frac{\Delta V}{V} = (1 - 2\mu) \frac{\Delta L}{L}$$

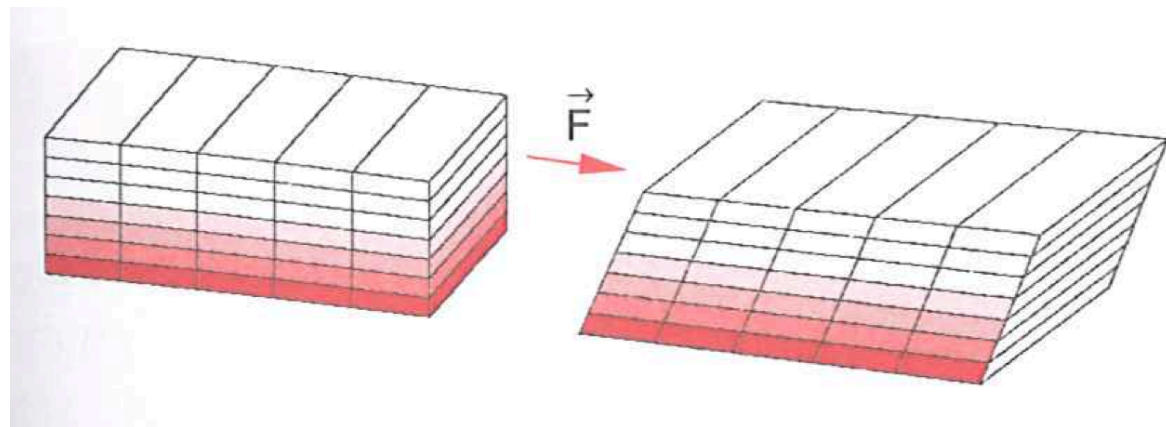
4.) elastische Änderung nur in engen Grenzen  
darauf:  $\Delta L \propto \sigma$

Bilder: Demtröder

# BEISPIELE I (fortgesetzt)



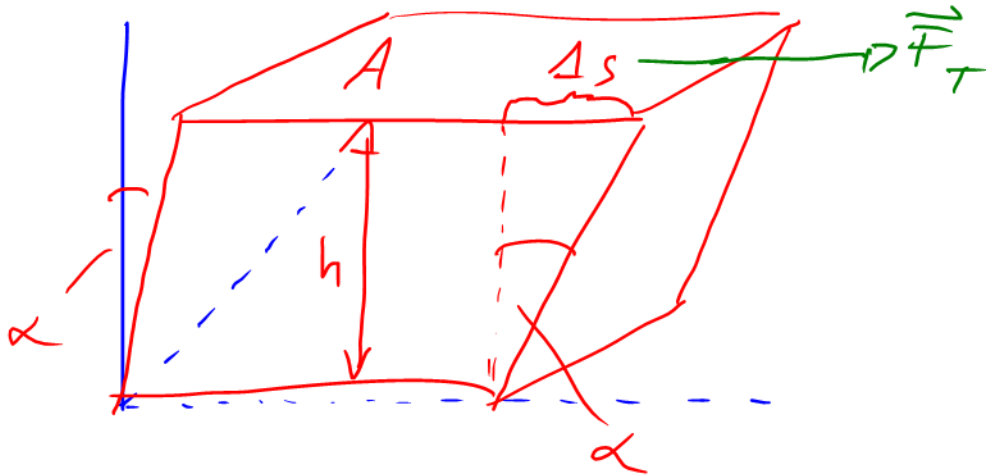
*Modell d. Fließens  
Auflösung d. Gefüges  
Verschiebung der  
Gitterebenen*



Bilder: Demtröder

# BEISPIELE II

Scherung durch Schubspannung



(a)



(b)

Falls:  $\Delta s \ll h$

$$\Delta s \sim h$$

$$\Delta s \sim \tau = \frac{F_T}{A}$$

$$\Rightarrow \Delta s = \frac{1}{G} h \cdot \tau$$

$G$ : Scher / Torsionsmodul  
 $[G] = \text{Pa}$

$$\frac{\Delta s}{h} = \tan \alpha = \frac{\tau}{G} \hat{=} \text{Scherung}$$

Bild: Giancoli

## BEISPIELE III

Museitige Normalspannung / isotroper Druck

Volumenänderung  $\Delta V$  unter Druckänderung  $\Delta p$ .

$$\left| \frac{\Delta V}{V} = - \frac{1}{K} \Delta p \right|$$

$K$ : Kompressionsmodul

$$[K] = \text{Pa}$$

$\frac{1}{K} = \kappa$  Kompressibilität

aufgrund:  $\kappa = \frac{3}{E} (1 - 2\mu)$

(leicht) \ / Herleitung!

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)}$$

(schwer)

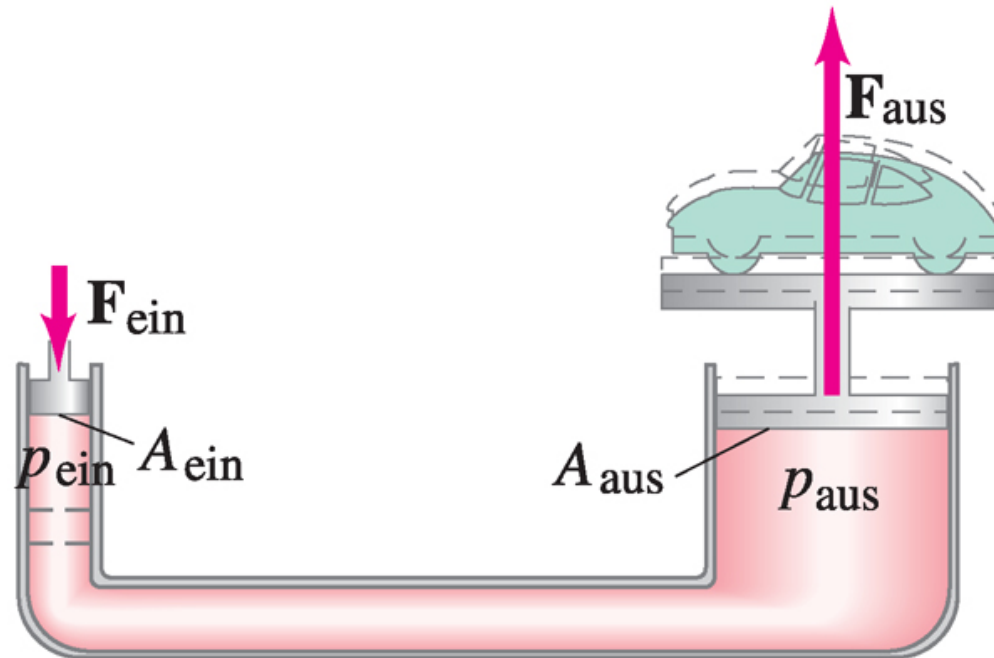
# FLÜSSIGKEITEN (inkompressibel)

Definition: Wirkt auf eine Fläche  $A$  eine Kraft  $F$ , so heißt das Verhältnis  $p = F/A$  Druck.  $\vec{F} \uparrow \vec{A}$

$$[p] = \frac{N}{m^2} = Pa = 10^{-5} \text{ bar} \quad \text{alt: phys. Atmosphäre } 1 \text{ atm} = 760 \text{ Torr} = 1,01 \cdot 10^5 \text{ Pa}$$

- 1) Nur Normalkraft sinnvoll!  $1 \text{ Torr} = 1 \text{ mm Hg-Säule bei } 0^\circ$
- 2) Druck ist Skalar. In isotropem Medium wirkt Druck in alle Richtungen in gleicher Stärke
- 3) Technologische Relevanz!

# HYDRAULISCHE PRESSE



Prinzip:

$$p_{\text{ein}} = p_{\text{aus}}$$

$$\frac{F_{\text{ein}}}{A_{\text{ein}}} = p_{\text{ein}} = p_{\text{aus}} = \frac{F_{\text{aus}}}{A_{\text{aus}}} \Rightarrow F_{\text{aus}} = \left( \frac{A_{\text{aus}}}{A_{\text{ein}}} \times F_{\text{ein}} \right) \gg F_{\text{ein}}$$

Verstärkung!

Bild: Giancoli

# HYDROSTATISCHER SCHWEREDRUCK

tiefenabhängige Druck  
in Flüssigkeiten.

Druck  $p$  im Fluid im Schwerfeld der Erde hängt ab vom  
Abstand zur Wasseroberfläche  $\Rightarrow$  Gewicht d. Flüssigkeitssäule

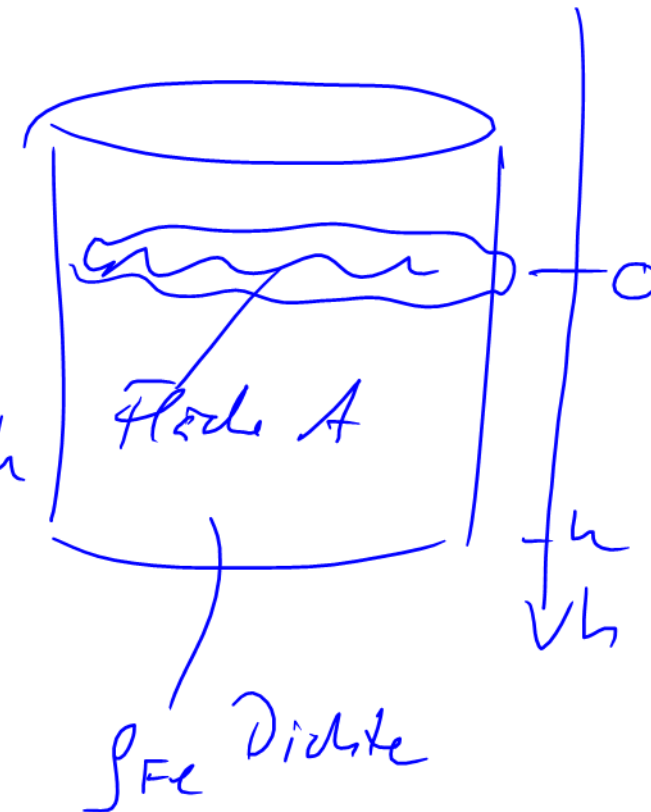
Beobachtung: - Druck isotrop  
- Druck  $\sim$  Höhe  $h$



Kraft auf Boden  $F_g = \rho_{Fe} \cdot g \cdot V = \rho_{Fe} \cdot g \cdot A \cdot h$

$\Rightarrow$  Druck

$$p = \frac{F_g}{A} = \rho_{Fe} \cdot g \cdot h$$





# KOMMUNIZIERENDE RÖHREN

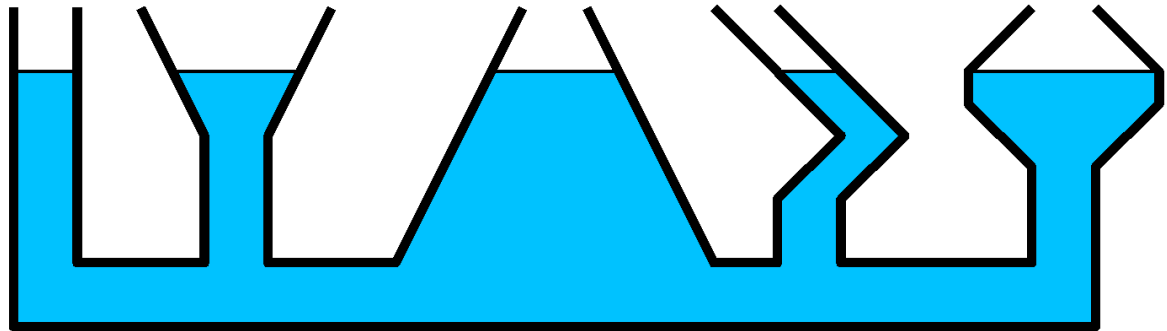


Bild: Wikipedia

# AUFTRIEB

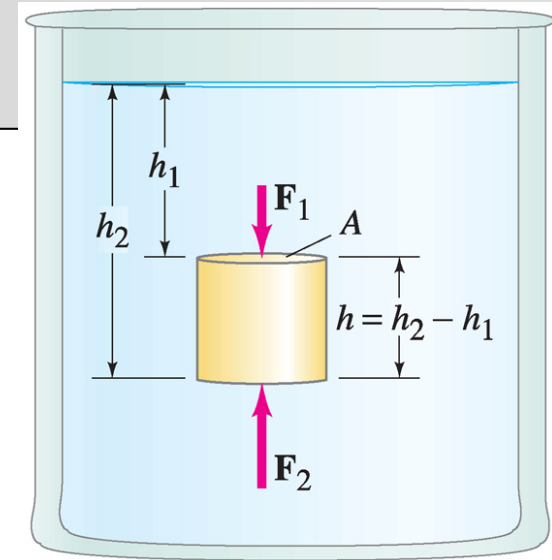


Bild: Giancoli

# ARCHIMEDES UND KONSORTEN

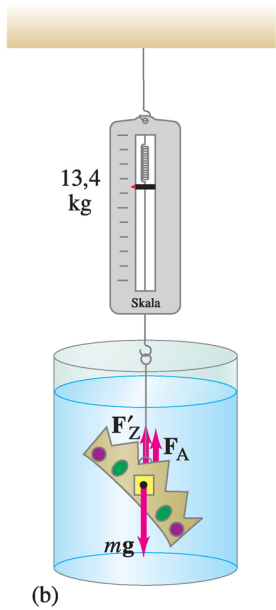
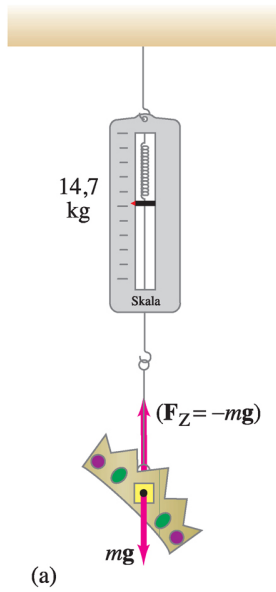


Bild: Giancoli