

# Experimentelle Physik I

## WS 16/17

Veranstaltung 4010011

<https://campus.studium.kit.edu/event/H7Ke2neVDU6OCiWVculqYw>

PD Dr. Andreas B. Meyer (KIT und DESY)

**24. Vorlesung:**

- 5.3. Mechanik fester Körper und Flüssigkeiten (3): Themische Eigenschaften**
- 6.1 Schwingungen und Wellen (1): Schwingungen**

# Zusammenfassung

## 5.2. Hydrostatik und -dynamik

Druck:  $P := \frac{F_{\perp}}{A}$

$$[P] = \frac{N}{m^2} = Pa$$

$$1013 \text{ mbar} = 1013 \text{ hPa}$$

$$\hat{=} 760 \text{ mm Hg}$$

### 5.2.2 Hydrostatik

Pascals Gesetz:

$$P(y) = \rho \cdot g \cdot y + P_0$$

Anwendungen:

- Barometer: Druck durch Quecksilbersäule = Atmosphärendruck
- Antrieb
- Dichtbestimmung
- Hydraulische Presse

### 5.2.3. Hydrodynamik

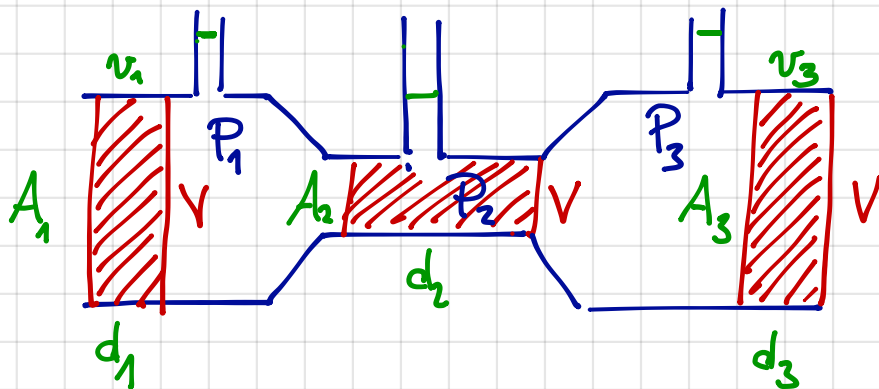
Ideale Flüssigkeit: inkompressibel,  
nicht viskos,  
nur laminare Strömung

Konstantes Volumen pro Zeit:

$$\Phi \equiv A \cdot v = \text{const.}$$

Kontinuitätsgleichung

vgl. Wasserhahn



Energiebetrachtung: Druck leistet Arbeit  $\Rightarrow E_{\text{kin}}$

$$P + \rho \cdot gh + \frac{1}{2} \rho v^2 = \text{const}$$

Bernoullis Gesetz

dynamischer Druck

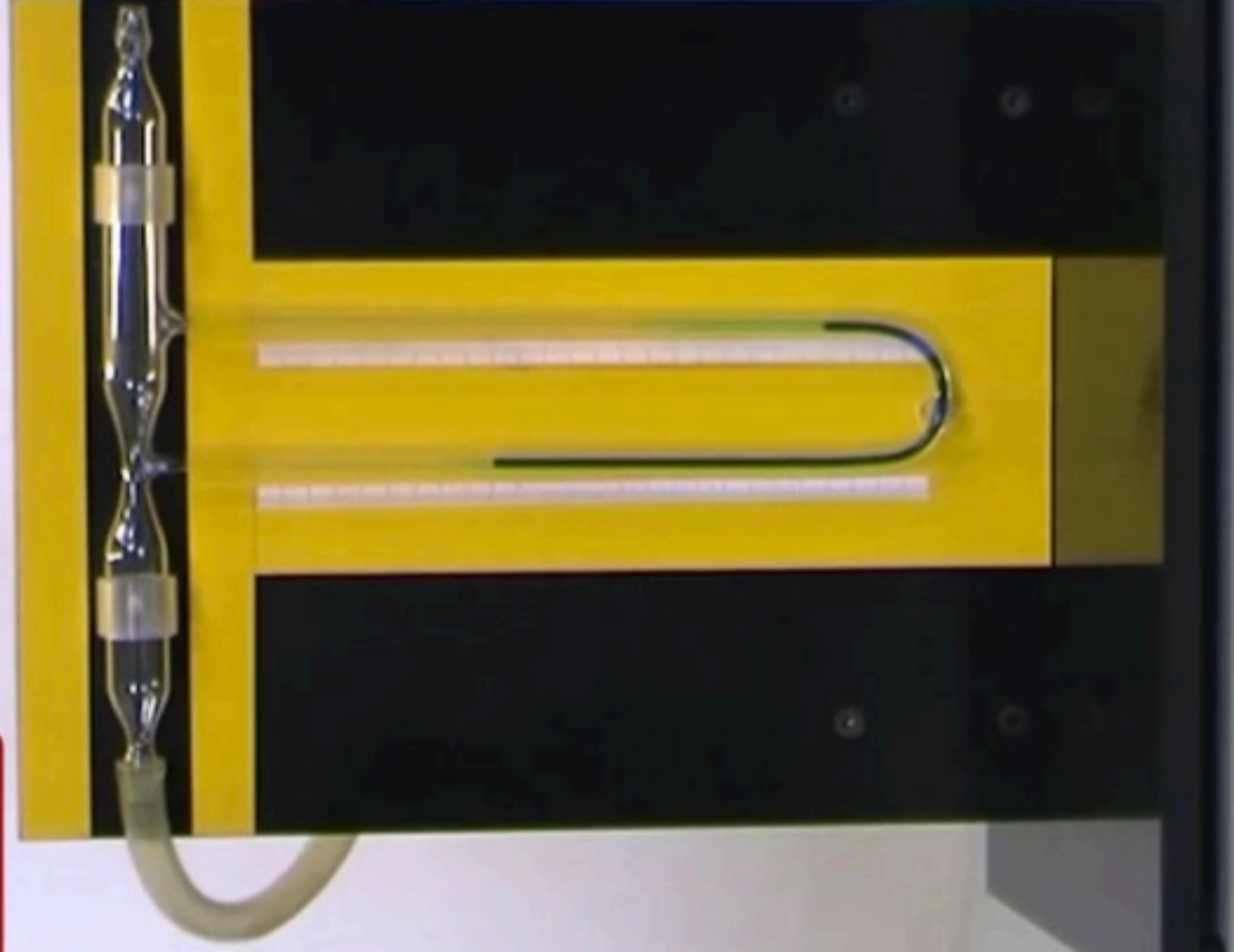
$\Rightarrow$  Aerodynamische Versuche

- Prandtl'sches Staurohr
- Unterdruck über Kegel
- Tragflügel Flugzeug
- Ball auf Luftstrom

(Gase sind nicht inkompressibel, Modelle können dennoch nützlich sein.)

$\Rightarrow$  Versuch: 2 Scheiben in Luftstrom

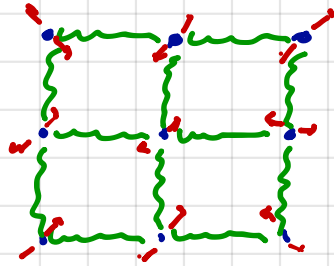
# Venturi - Rohr



[https://de.wikipedia.org/wiki/Strömung\\_nach\\_Bernoulli\\_und\\_Venturi](https://de.wikipedia.org/wiki/Strömung_nach_Bernoulli_und_Venturi)

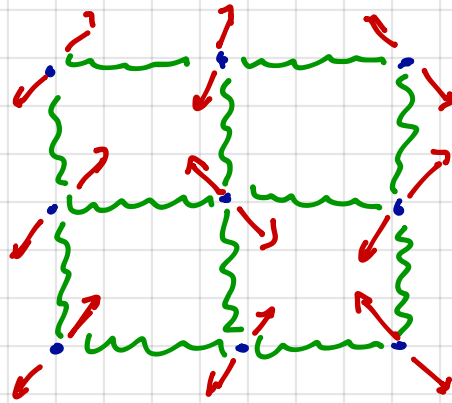
## 5.3. Thermische Eigenschaften von Festkörpern u. Flüssigkeiten

### a) Thermische Expansion



kalt

Wärme: Schwingungen der Atome



heiß

Amplitude vergrößert sich: Atome brauchen mehr Platz

⇒ Längenänderung  $\frac{\Delta L}{L} = \alpha \cdot \Delta T$

lineares Ausdehnungs-Koeffizient

Spezialfall Wasser:

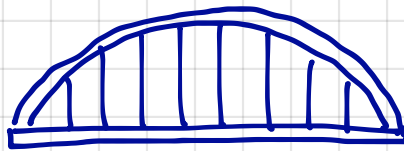
Dichtenanomalie  $999,975 \text{ kgm}^{-3}$  bei  $3,98^\circ$

Bei niedrigerer Temperatur: Kristallstruktur  
Wasserstoffbrückenbindungen

# Ausdehnungskoeffizienten

Al:	$\alpha = 24 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
Stahl:	$10 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
Glas:	$9 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
Quarz:	$0.4 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$

Beispiel 600 m lange Stahlbrücke



$L = 600 \text{ m}$

$$T_{\text{Winter}} = -40^\circ$$

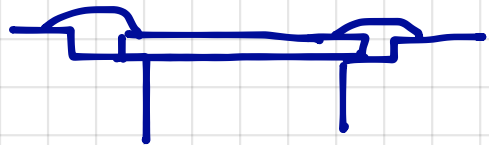
$$T_{\text{Sommer}} = 40^\circ$$

$$\Delta L = L \cdot \alpha \cdot \Delta T$$

$$= 600 \text{ m} \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1} \cdot 80 \text{ K}$$

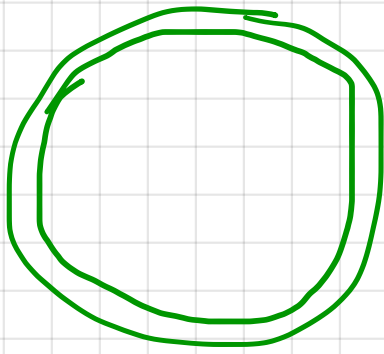
$$= 48 \text{ cm (!)}$$

Technische Lösung: Schwelle



→ Versuch Bolzensprengung

# Beispiel LHC



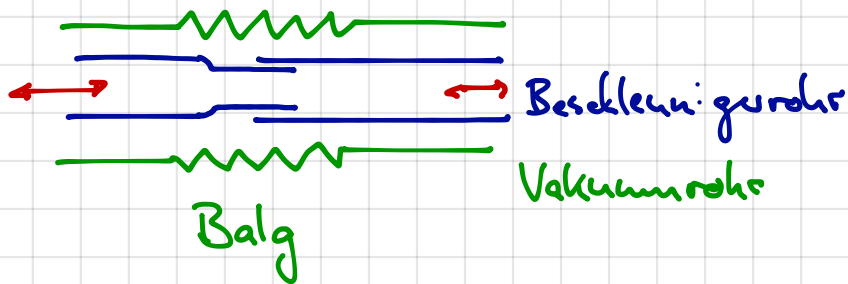
27 km Vakuumrohr aus Stahl

$$T_{\text{Betrieb}} = 1,5 \text{ K}$$

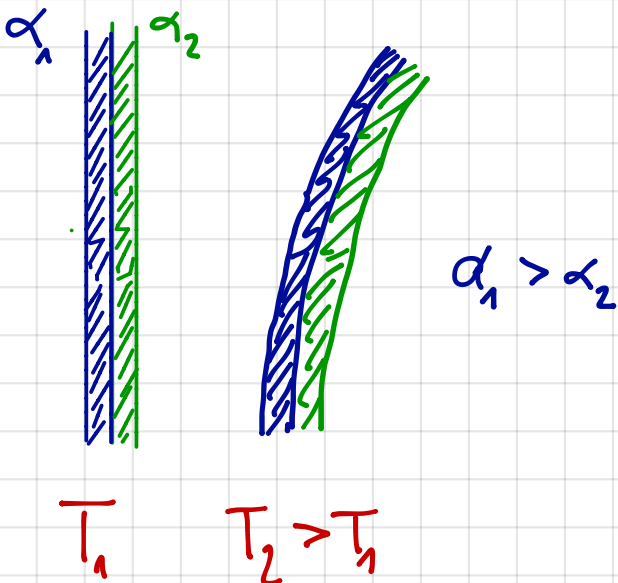
$$T_{\text{Raum}} = 290 \text{ K}$$

$$\Delta L = L \cdot \alpha \cdot \Delta T = 27 \text{ km} \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1} \cdot 288,5 \text{ K} \\ = 80 \text{ m}$$

Lösung



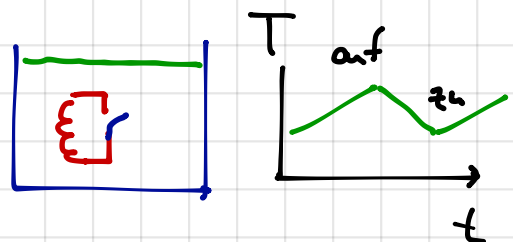
# Anwendung Bimetallstreifen



Temperaturmessung

Thermostat:

- Heizkörper
- Heizspule



Versuch  $\rightarrow$  Bimetallstreifen



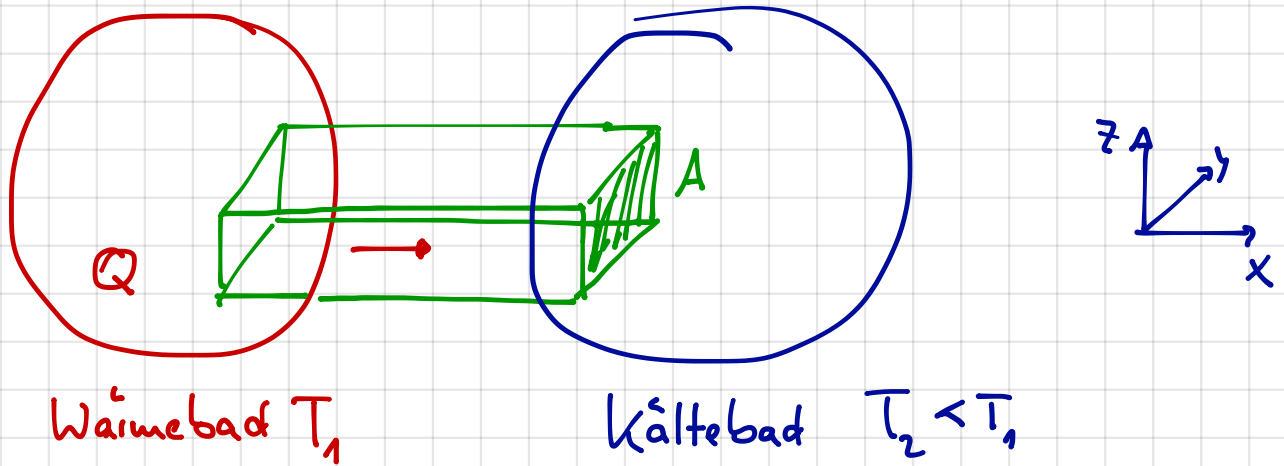
# Bälge (engl. bellows) im LHC

zur Aufnahme der Längenänderung bei Kühlung/Erwärmung



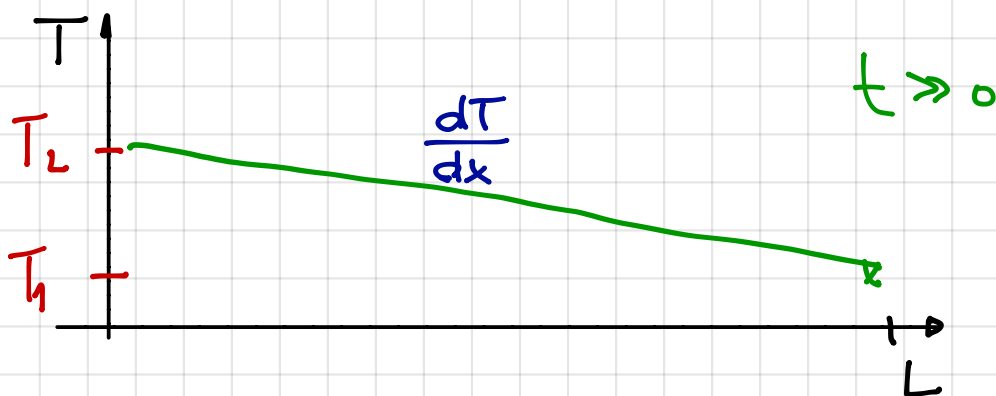
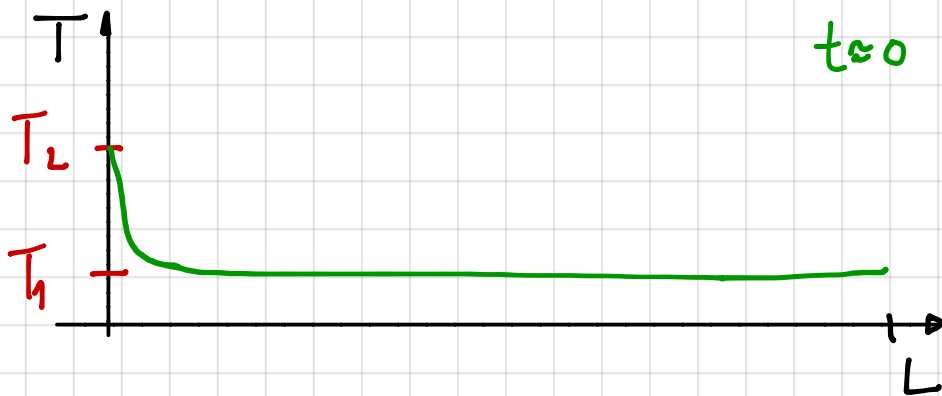


## b) Wärmeleitung



$$\frac{dQ}{dt} = -\lambda \cdot A \cdot \frac{dT}{dx}$$

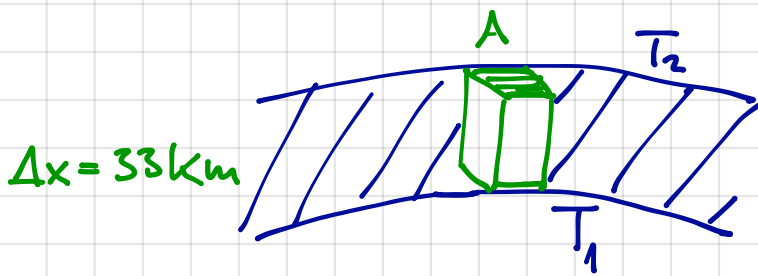
transportierte Wärme      Thermische Leitfähigkeit (Materialkonst.)      Temperaturgefälle



## Beispiele

Material	$\lambda \left[ \frac{\text{W}}{\text{mK}} \right]$
Silber	420
Aluminium	220
Gestein	2,5
Wasser	0,6
Luft	0,026

Anwendung: Wärmefluss durch Erdkruste



Woher weiß man  $\Delta x$  ?  
- Seismographie und Modellierung  
- Tiefste Bohrung: 12 km

$$T_1 = ?$$

$$T_2 = 10^\circ \quad \frac{dQ}{dt} = 0,054 \text{ W}$$

$$A = 1 \text{ m}^2 \quad \lambda = 2,5 \frac{\text{W}}{\text{mK}} \quad \Delta x = 33 \text{ km}$$

$$\frac{dQ}{dt} = -\lambda \cdot A \cdot \frac{\Delta T}{\Delta x} \Rightarrow |\Delta T| = \frac{\Delta x \cdot \frac{dQ}{dt}}{\lambda \cdot A}$$

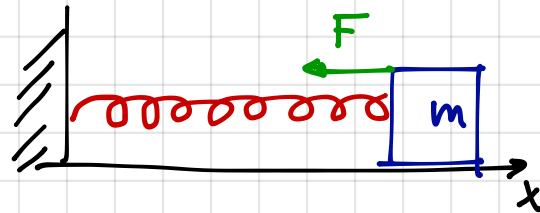
$$\Delta T = 713 \text{ K} \Rightarrow T_1 = 723^\circ \text{ C}$$

# 6 Schwingungen und Wellen

## 6.1 Schwingungen

### 6.1.1. Federschwingungen

a) ungedämpft



$$F = -kx = m \frac{d^2x}{dt^2}$$

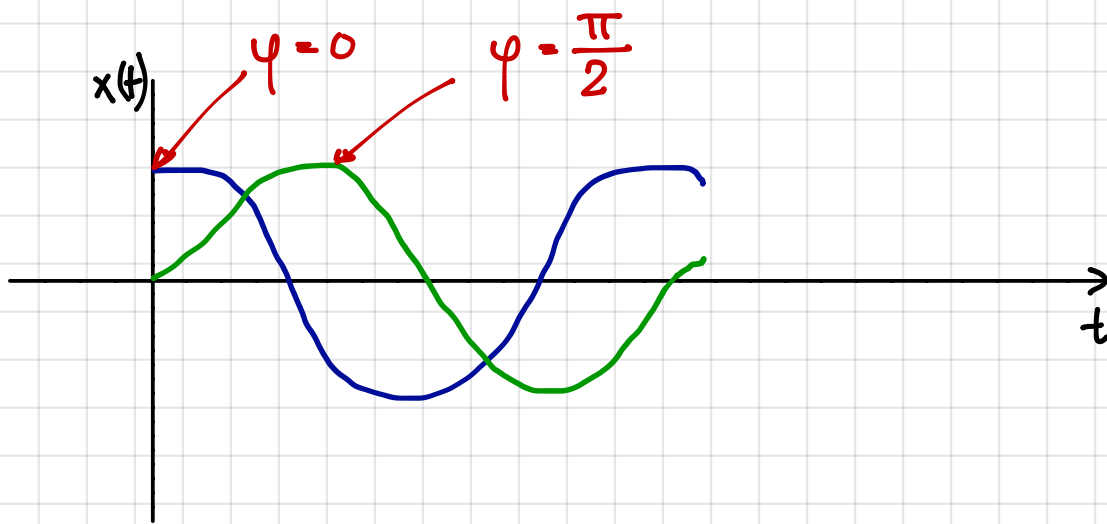
Ansatz:  $x(t) = A \cdot \cos(\omega t + \varphi)$

Einsetzen:  $-kx(t) = -Ak \cdot \cos(\quad)$   
 $= -m\omega^2 \cos(\quad)$  für alle  $t$

$$\Rightarrow \omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

$$x(t) = A \cdot \cos\left(\sqrt{\frac{k}{m}} \cdot t + \varphi\right)$$

Anfangsbedingungen:  $t=0: x(t=0) = A \Rightarrow \varphi = 0$



Energiebilanz:

$$E_k = \frac{1}{2} m v^2 = \frac{1}{2} m \left( \frac{dx}{dt} \right)^2$$

$$= \frac{1}{2} m \frac{k}{m} A^2 \cdot \sin^2 \left( \sqrt{\frac{k}{m}} \cdot t \right)$$

$$E_p = \int_0^x k x' dx' = \frac{1}{2} k x^2$$

$$= \frac{1}{2} k A^2 \cdot \cos^2 \left( \sqrt{\frac{k}{m}} \cdot t \right)$$

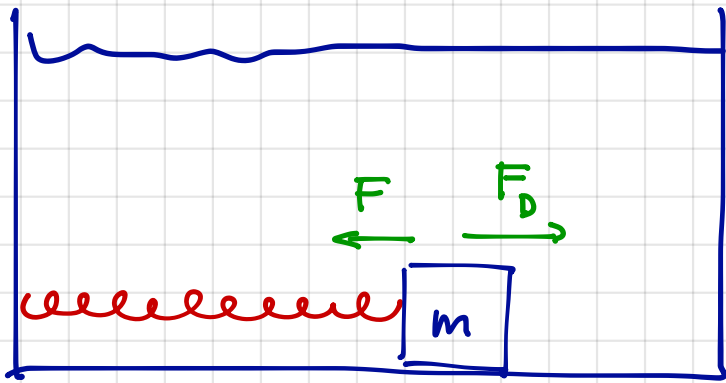
$$E_{\text{tot}} = E_p + E_k = \frac{1}{2} k A^2 = \text{const.}$$

Gesamtenergie hängt nicht von der Zeit ab.

⇒ erhalten ✓



## b) gedämpfte Schwingungen



$$F = -kx$$

$$F_D = -b \cdot v$$

Stokasche Reibung

Bewegungsglg: 
$$-kx - b \frac{dx}{dt} = m \frac{d^2x}{dt^2}$$

Homogene DGL, d.h. keine konstanten Terme

Ansatz: 
$$x(t) = x_0 \cdot e^{\lambda t}$$

$$\dot{x}(t) = \lambda x(t)$$

$$\ddot{x}(t) = \lambda^2 x(t)$$

$$\Rightarrow m\lambda^2 + b\lambda + k = 0$$

Charakteristische Gleichung

$$\lambda_{1/2} = -\frac{b}{2m} \pm \sqrt{\frac{b^2}{4m^2} - \frac{k}{m}}$$

## Fallunterscheidungen

1.)  $b = 0$  keine Dämpfung (siehe oben)

$$x(t) = x_0 \cdot \cos(\omega_0 t + \varphi) \text{ mit } \omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

2.)  $b < \sqrt{4mk}$  Dämpfung schwach

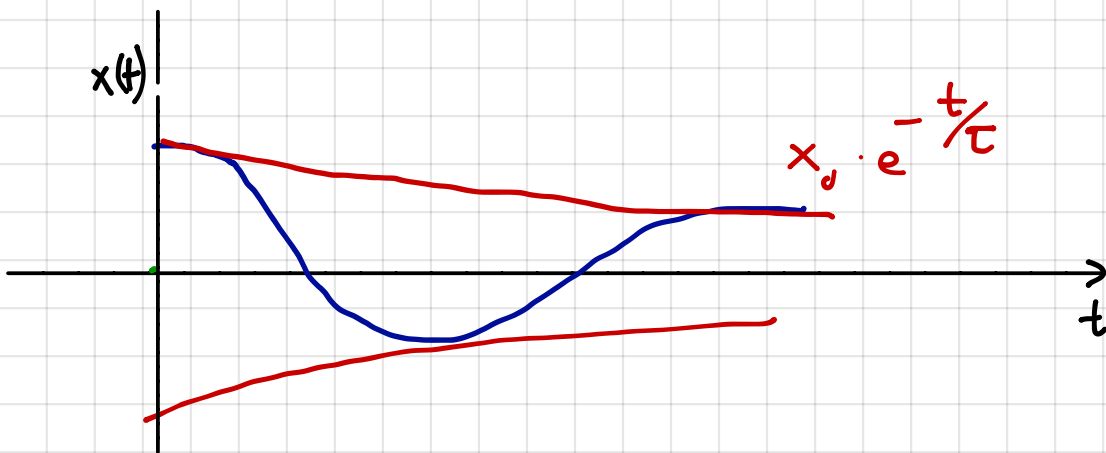
$$x(t) = x_0 \cdot e^{-\frac{b}{2m}t} \cdot \cos \sqrt{\frac{k}{m} - \frac{b^2}{4m^2}} t$$

Zeitkonst.

$$\gamma = \frac{1}{\tau} = \frac{b}{2m}$$

$$\text{Re}(e^{i\omega t}) \text{ mit } \omega = \sqrt{\frac{k}{m} - \frac{b^2}{4m^2}}$$

$$\text{da } e^{i\varphi} = \cos \varphi + i \sin \varphi$$



3.)  $b = \sqrt{4mk}$  Aperiodischer Grenzfall

4.)  $b > \sqrt{4mk}$  Kriechfall

} nächste Vorlesung