

# Ultraschall: Erzeugung und Eigenschaften. Grundprinzip der Sonographie, Bilderstellung.

**Balázs Kiss**

kissb3@gmail.com

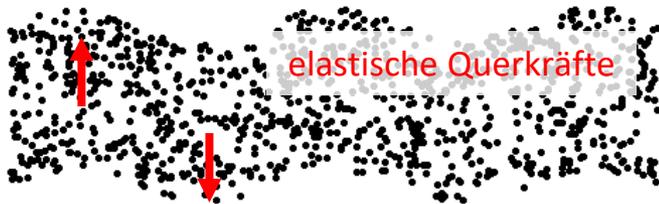
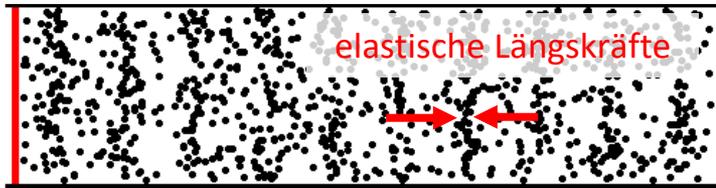


**Institut für Biophysik und Strahlenbiologie,  
Myofilament-Mechanobiophysik Forschungsgruppe,  
Semmelweis Universität**

*07. März 2025.*

# Schallwellen: mechanische Wellen

- Zur Ausbreitung ist immer ein **Medium** notwendig!



## Längswellen (longitudinale Wellen)

- Verdichtungen und Verdünnungen
- Schwingungsrichtung ist parallel zur Ausbreitungsrichtung
- in Flüssigkeiten und Gasen: nur Längswellen

## Querwellen (transversale Wellen)

- Wellenberge und Wellentäler
- Schwingungsrichtung steht senkrecht zur Ausbreitungsrichtung
- in Festkörpern: Querwellen auch möglich

hydrostatischer Druck  
Druckschwankung, Schalldruck

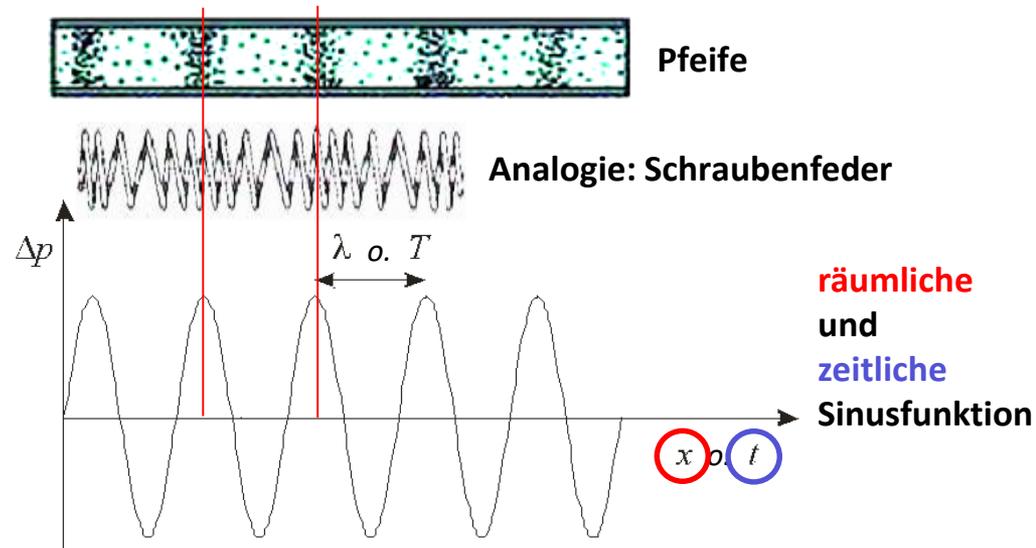
$$p_{\text{gesamt}} = p_{\text{hydr}} + \Delta p$$

Analogie:

Elektrizitätslehre: DC + AC

$$\Delta p(x) = A \cdot \sin(\omega \cdot x - \varphi_x)$$

$$\Delta p(t) = A \cdot \sin(\omega \cdot t - \varphi_t)$$



# Physikalische Eigenschaften der Schallwellen

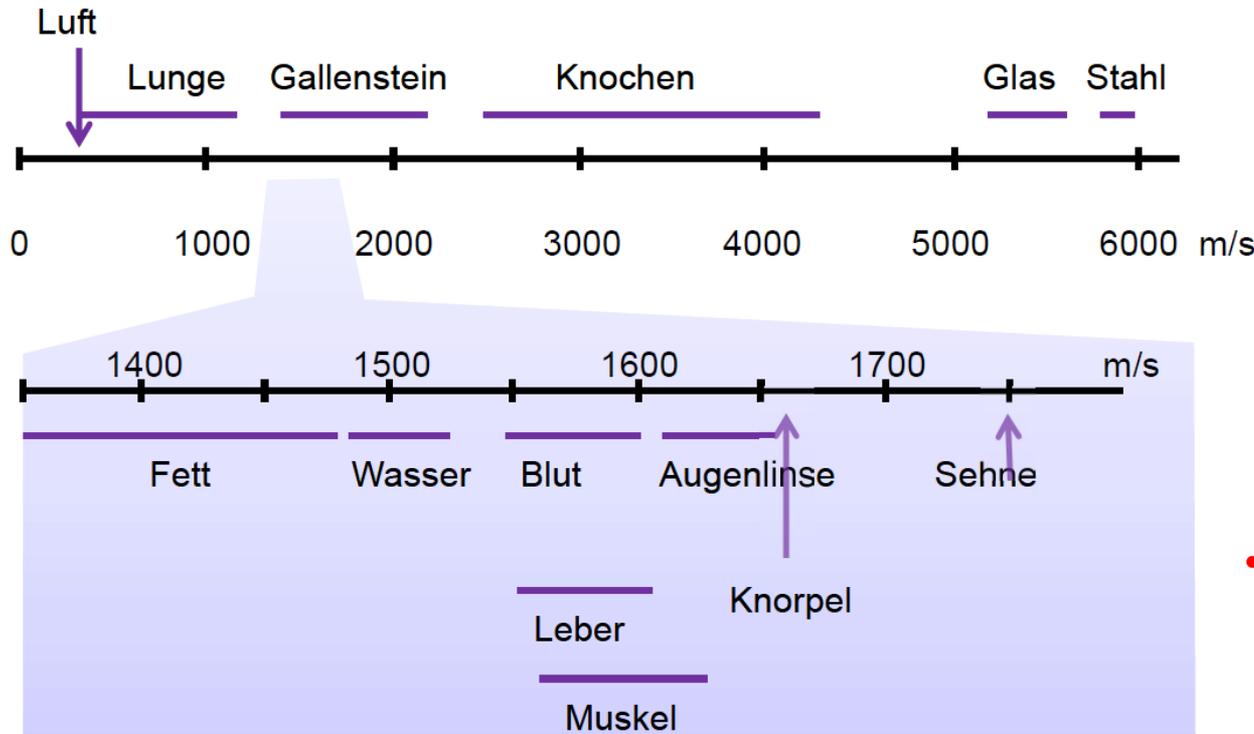


$$f = \frac{c}{\lambda}$$

- in den bildgebenden Geräten:  $f = 2 - 10 \text{ MHz}$ ,  $\lambda = 0,77 - 0,154 \text{ mm}$
- **Ausbreitungsgeschwindigkeit:** unabhängig von der Frequenz

**$c = 1540 \text{ m/s}$   
in Weichteilgeweben**

**$c = 340 \text{ m/s}$   
in der Luft**



$$c = \frac{1}{\sqrt{\rho \cdot \kappa}}$$

$\rho$  (Rho): Dichte  
 $\kappa$  (Kappa): Kompressibilität

$$\kappa = \frac{-\Delta V/V}{\Delta p}$$

- **akustische Impedanz (Z):**

$$Z = \rho \cdot c = \sqrt{\frac{\rho}{\kappa}} \quad [\text{rayl}]$$

# Wechselwirkung mit der Materie: Schwächung

- **Schallintensität: J**  $J = \frac{1}{Z} \cdot \Delta p_{eff}^2$ 
  - bei der Diagnostik:  $J = 0,01 - 0,1 \text{ W/cm}^2$
  - bei der Therapie:  $J \approx 2,5 \text{ W/cm}^2$

- **Schwächungsgesetz:**  $J = J_0 \cdot e^{-\mu \cdot x}$ 
  - $\mu$  hängt von der Frequenz ab!
  - **D: Halbwertsdicke**  $D = \frac{\ln(2)}{\mu}$

Stoff	D in cm bei f=0,9 MHz	D in cm bei f=2,5 MHz
Fett	7,7	2,8
Knochenmark	7,7	2,8
Muskel	2,7	1,0
Gehirn	3,6	1,3
Knochen	0,2	0,1
Wasser	500	180

- **Dämpfung:**  $\alpha$ : Dämpfungskoeffizient [dB]

$$\alpha = 10 \cdot \lg \frac{J_0}{J}$$

$$\alpha = 10 \cdot \mu \cdot x \cdot \lg(e)$$

$\alpha$  ist direkt proportional zu  $\mu$

- **spezifische Dämpfung:**

$$\frac{\alpha}{f \cdot x} \left[ \frac{\text{dB}}{\text{cm} \cdot \text{MHz}} \right]$$

- für weiche Gewebe:  $\sim 1 \text{ dB}/(\text{cm} \cdot \text{MHz})$

# W.w. mit der Materie: Reflexion, Refraktion

- Reflexionsvermögen: R

$$R = \frac{J_{refl}}{J_{ein}} = \left( \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \right)^2$$

- wenn  $Z_1 \ll Z_2$ , dann  $R \approx 1$   
= Totalreflexion

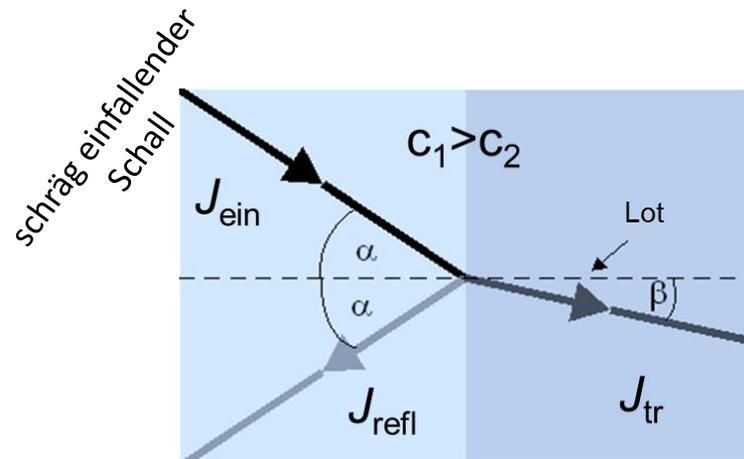
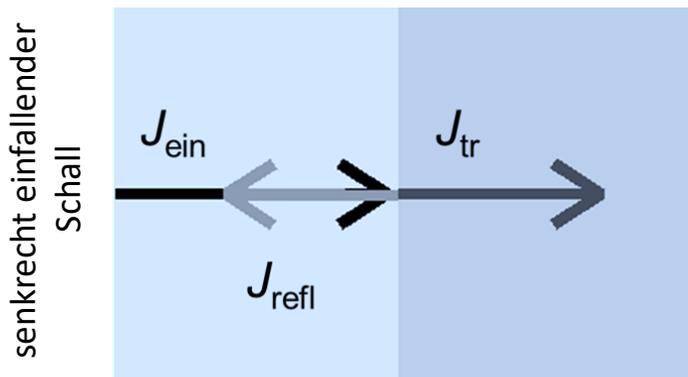
Grenzfläche	R
Muskel/Blut	0,0009
Fett/Leber	0,006
Fett/Muskel	0,01
Knochen/Muskel	0,41
Knochen/Fett	0,48
Weichteilgewebe/Luft	0,99

## Anpassungsschicht (Koppelmedium):

- Wasser, Gel, Paraffinöl
- vermindert den Impedanzunterschied zwischen Luft und Haut



- Refraktion (Brechung):

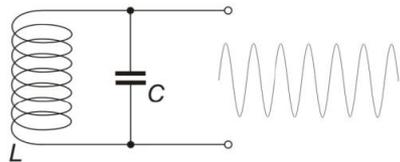


$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{c_1}{c_2}$$

# Erzeugung des Ultraschalls

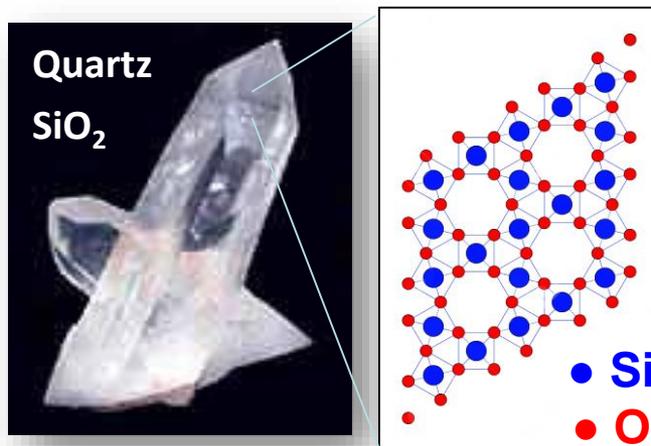
## Zwei Schritten:

1. Erzeugung sinusförmiger elektrischer Spannung mit hoher Frequenz: **Sinusozyllator**

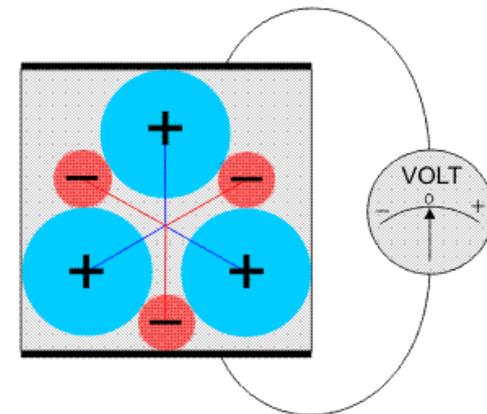
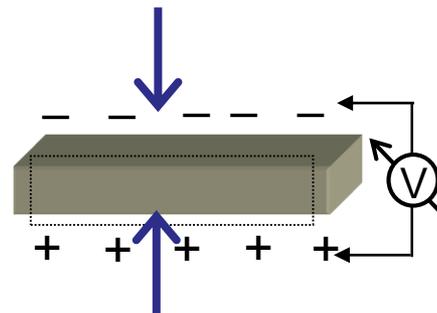


- positiv rückgekoppelter LC-Kreis  $f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$

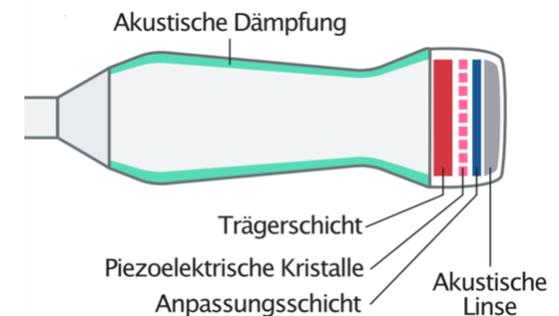
2. Umwandlung der elektrische Schwingung in mechanische Schwingung: **Transducer**



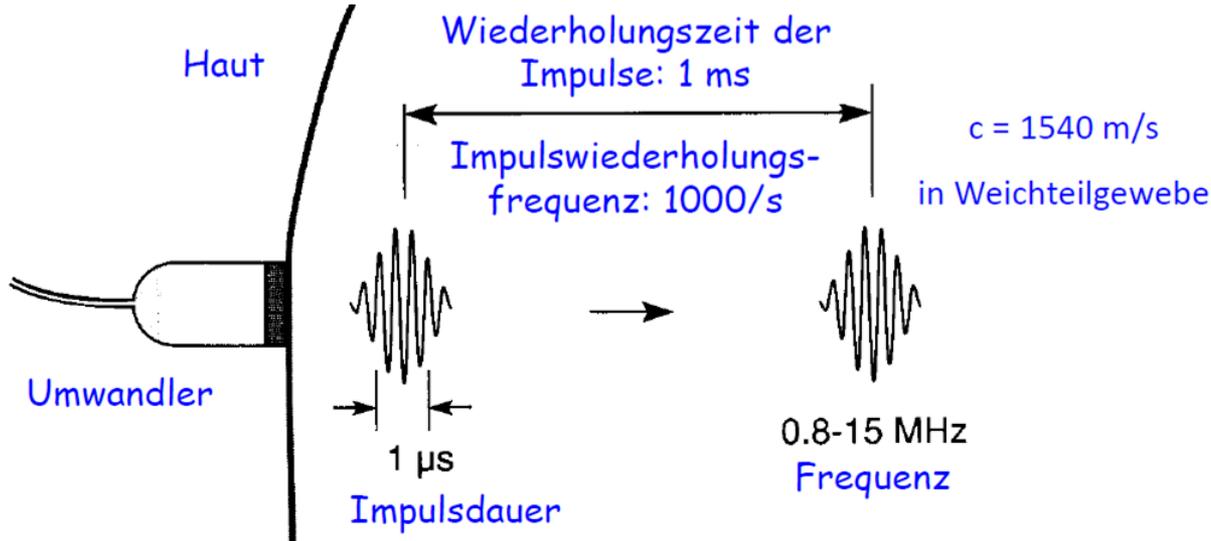
### Deformation



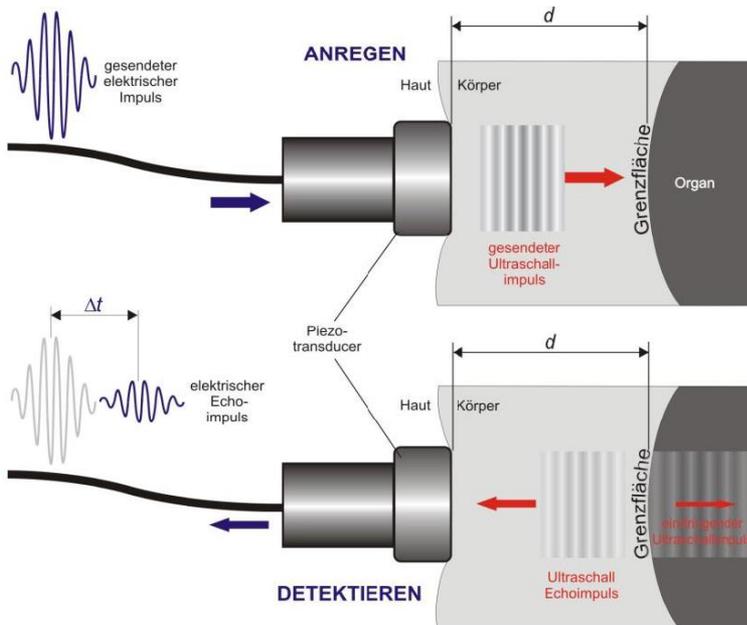
- Direkter piezoelektrischer Effekt: Deformation → Spannung (Detektor)
- Inverser piezoelektrischer Effekt: Spannung → Deformation (Sender)



# Diagnostik: Impuls-Echo Prinzip



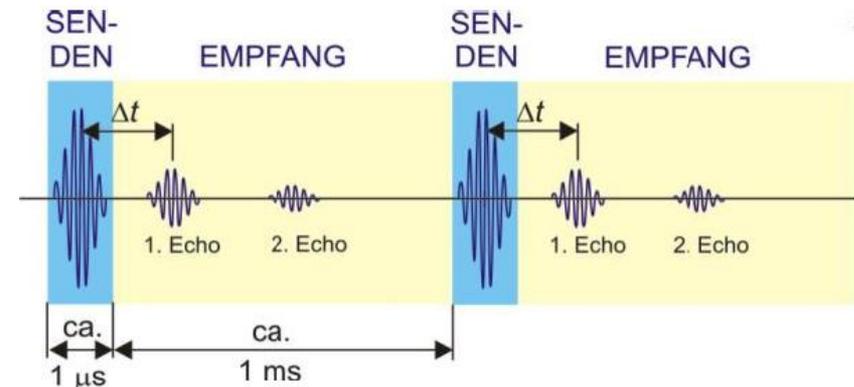
- Transducer: sowohl Sender als auch Empfänger:  
**Impulsbetrieb**
- Schallgeschwindigkeit ist als **1540 m/s** angenommen



- **Abstand des reflektierenden Gewebes:**

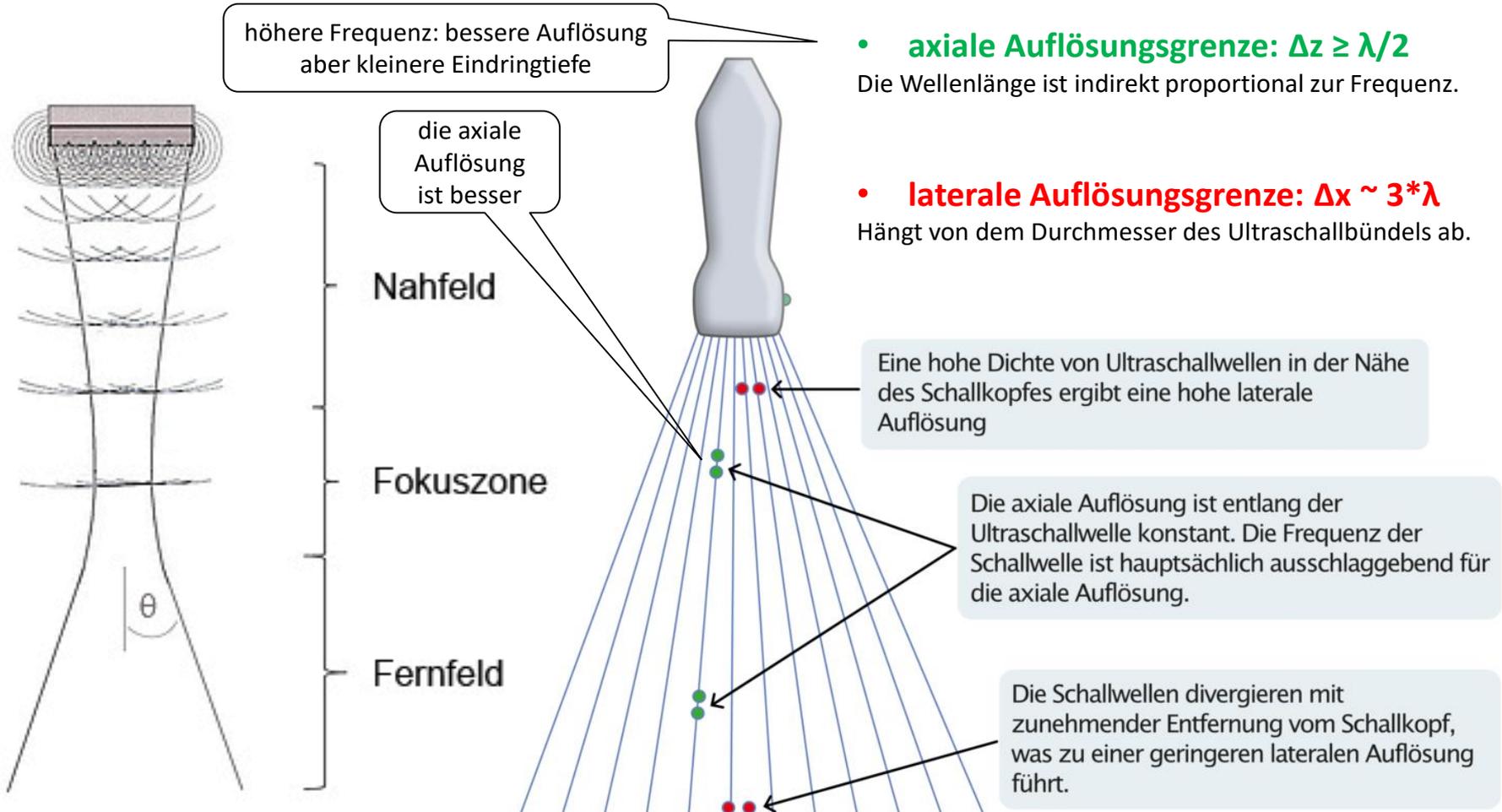
$$d = \frac{c \cdot \Delta t}{2}$$

- **Zeitsequenz von Senden und Detektieren:**



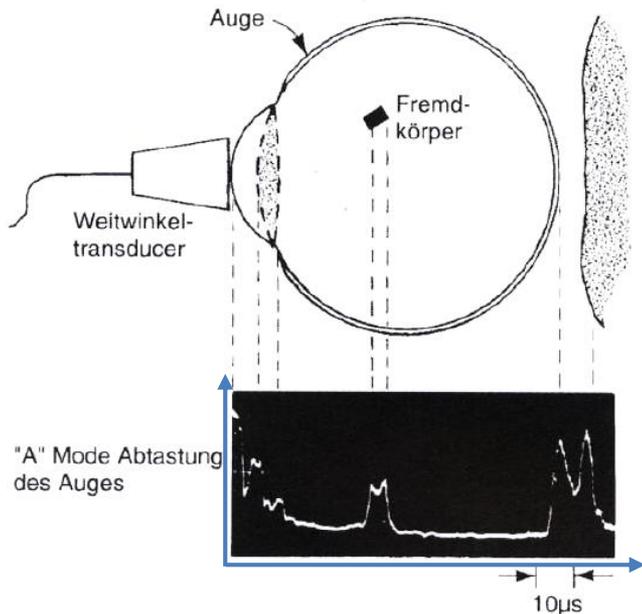
# Auflösung

- **Auflösungsgrenze:** der kleinste Abstand zweier noch getrennt detektierbaren Punkten.
- **Auflösungsvermögen:** Reziprokwert der Auflösungsgrenze.



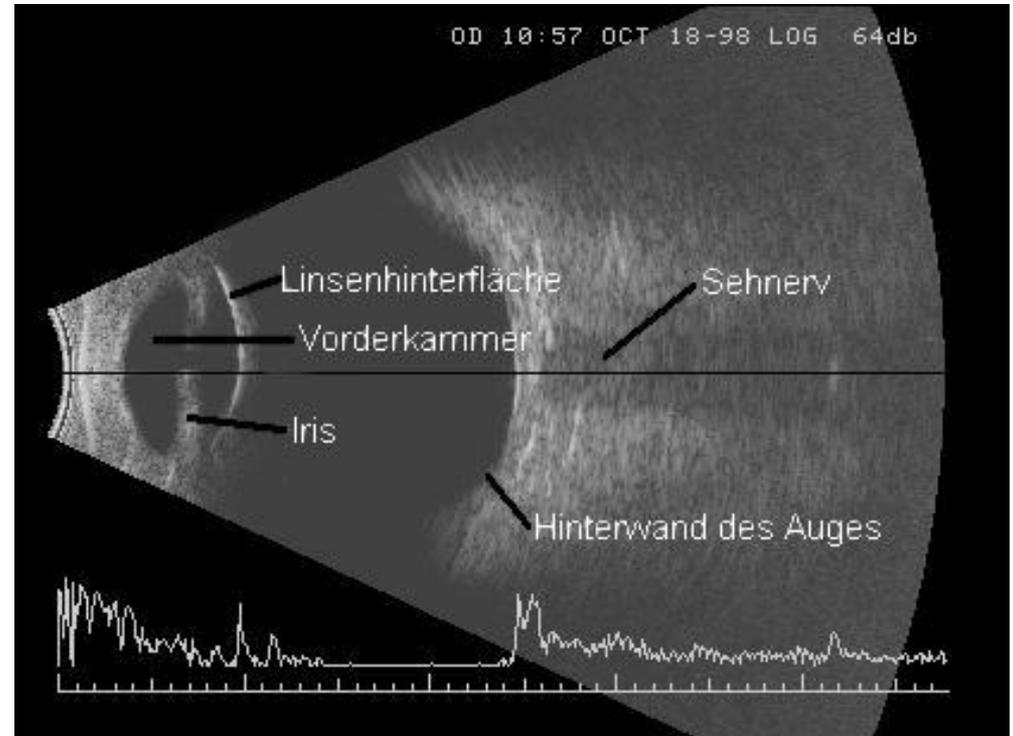
# Diagnostische Ultraschall-Verfahren: A und B-Bild

## A-Bild „Amplitudenmoduliert“



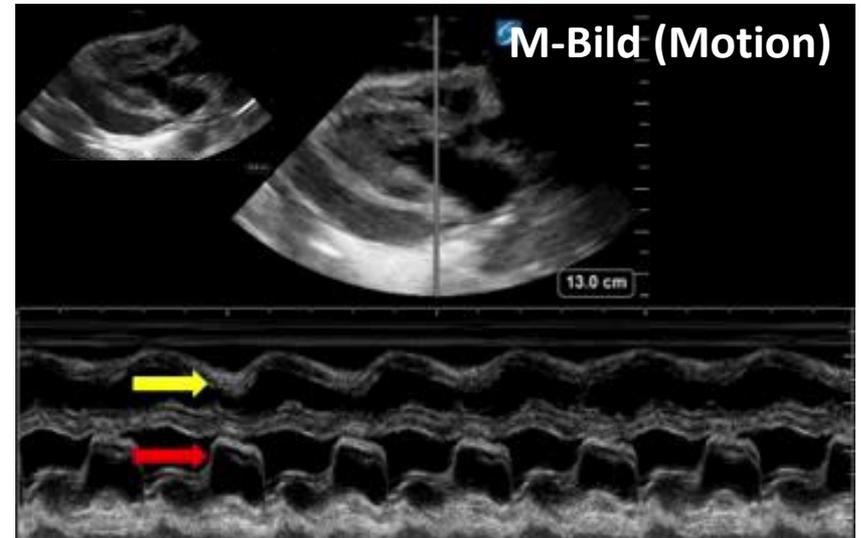
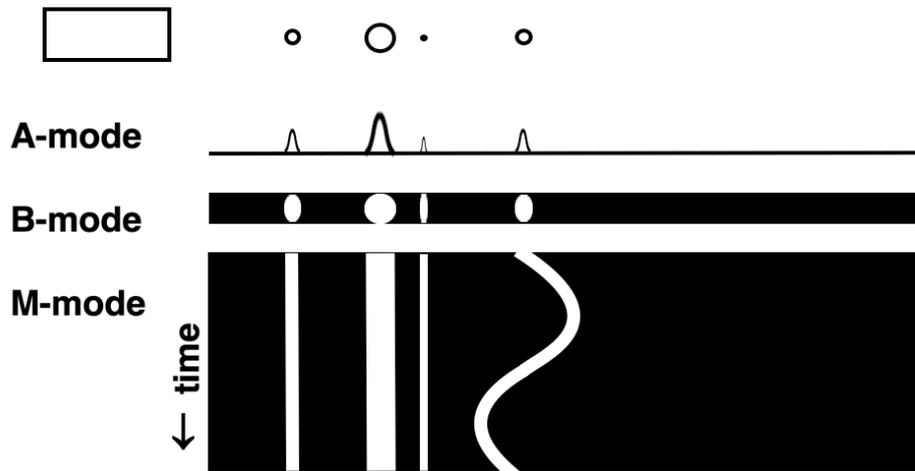
**x-Achse:** Zeit bzw. den entsprechenden Abstand  
**y-Achse:** Intensität des reflektierten Echosignals

## B-Bild „Brightness“, helligkeitsmoduliert



- **eindimensionales B-Bild** (selten)
- **2D B-Bild:** eine Ebene wird abgetastet als eine Serie von eindimensionalen B-Bildern, die Helligkeit der Punkte ist proportional zur Amplitude des reflektierten Ultraschalls (Grauskala).

# Diagnostische Ultraschall-Verfahren: M-Bild



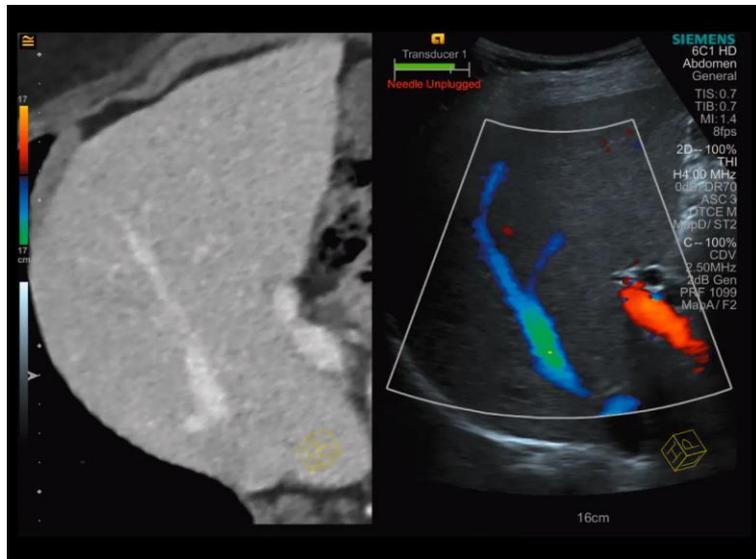
- Eine Serie von eindimensionalen B-Bildern, die in der auf dem 2D B-Bild gewählten Richtung registriert werden
- **x-Achse: Zeit (t)**
- **y-Achse: Tiefposition und Helligkeit der reflektierenden Fläche**
- geeignet für Visualisierung von sich bewegenden Strukturen
- **Information über die Lage der beobachteten Grenzfläche als Funktion der Zeit**
- Bewegungsablauf, Amplitude, Geschwindigkeit der Bewegung anatomischer Strukturen lassen sich genau verfolgen

# 3D, 4D, multimodale Sonographie

## 3D-Bild eines Embryos



## 4D-Videoaufnahme eines Embryos

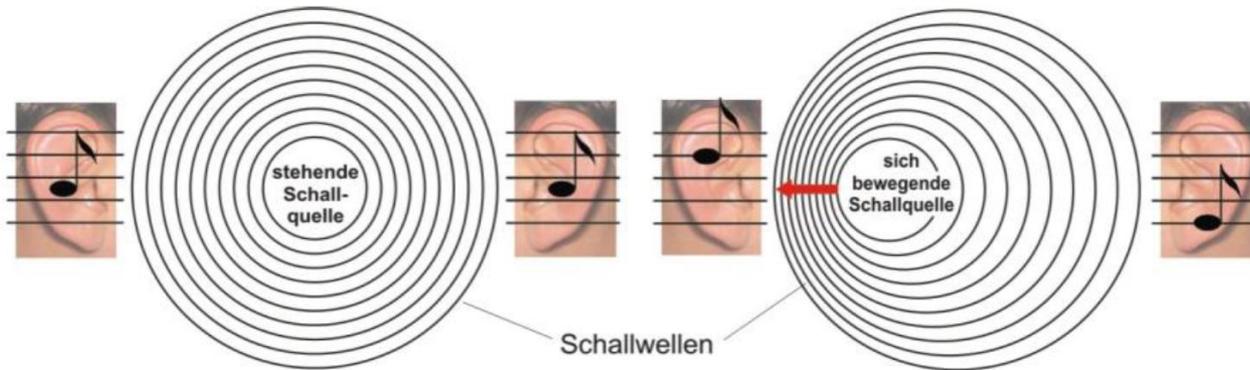


- **Überlagerung** von Echtzeit-Ultraschallaufnahmen mit bereits aufgenommenen dreidimensionalen **Computertomographie (CT)-Aufnahmen** per Mausklick direkt am Gerät.
- Bild: Leber auf CT und untersucht mit Doppler-Sonographie



# Doppler Sonographie

- **Doppler-Prinzip:** Veränderung der Wellenfrequenz und damit der Wellenlänge wenn Quelle und Beobachter im Verhältnis zueinander bewegen



$$f' = f_0 \frac{c \pm v_Q}{c \mp v_E}$$

$f'$ : wahrgenommene Frequenz  
 $f_0$ : Wellenfrequenz  
 $c$ : Schallgeschwindigkeit  
 $Q$ : Quelle  
 $E$ : Empfänger

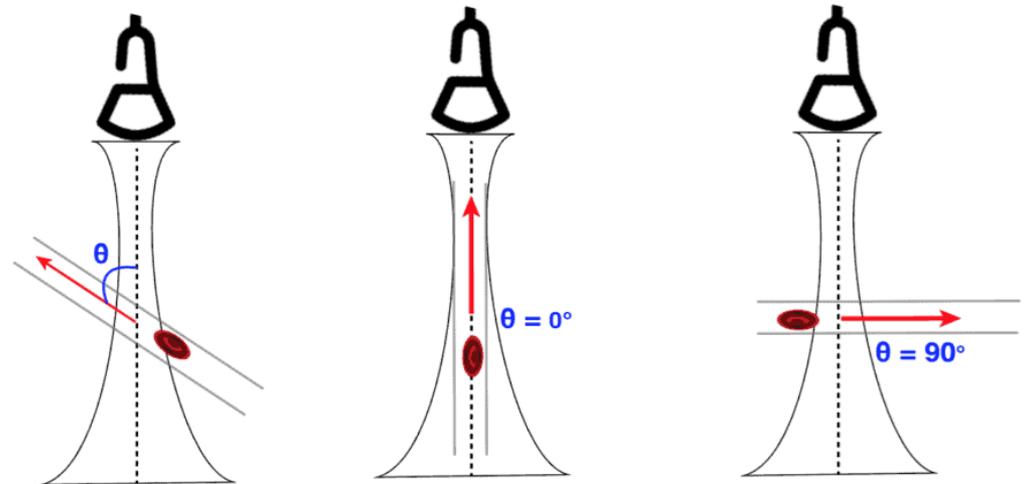
- **Doppler-Verschiebung:**  $\Delta f = f' - f_0$

- bei bewegter Grenzfläche:

$$f' = f_0 \left( 1 \pm 2 \frac{v}{c} \right)$$

- **$v$ : Strömungsgeschwindigkeit** von Erythrozyt:

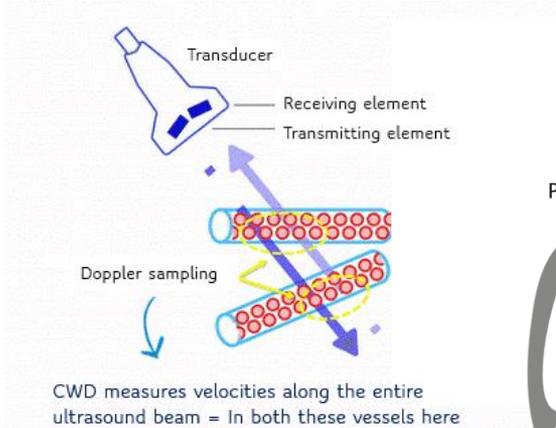
$$v = \frac{\Delta f \cdot c}{2f_0 \cdot \cos(\theta)}$$



# CW / PW / Farbdopplerverfahren

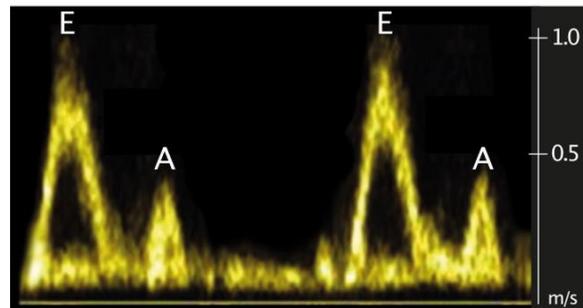
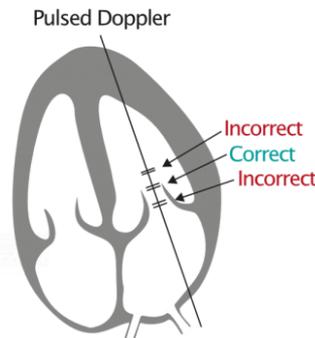
## CW - Continuous Wave

- Blutströmungsgeschwindigkeit in Arterien und in Venen
- fetale Herzschläge und fetaler Blutfluss



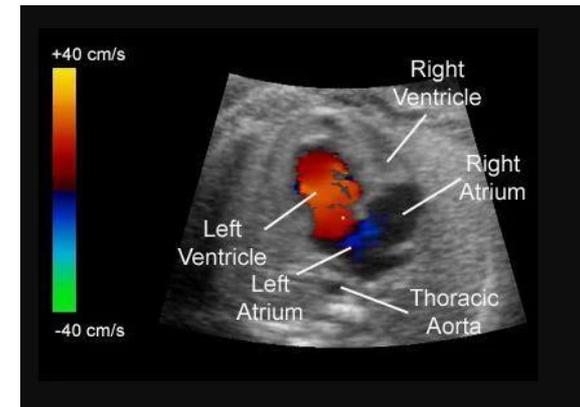
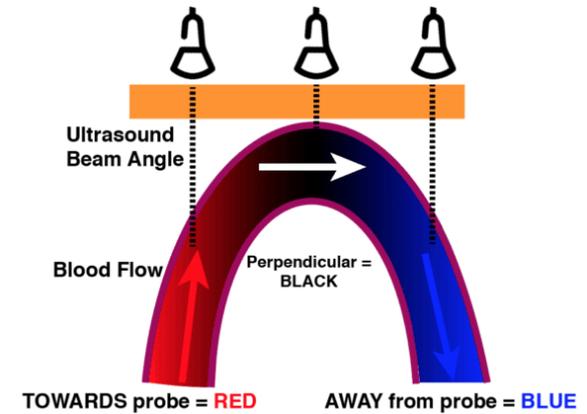
## PW - Pulse Wave

- Information nur aus einem **kleinen** vorgebbaren **Bereich**
- Direkte Bestimmung der **Volumenstromstärke**
- Beurteilung von Herzklappenfehler: z.B.: Mitralklappenfehler: z.B.: Mitralklappeninsuffizienz



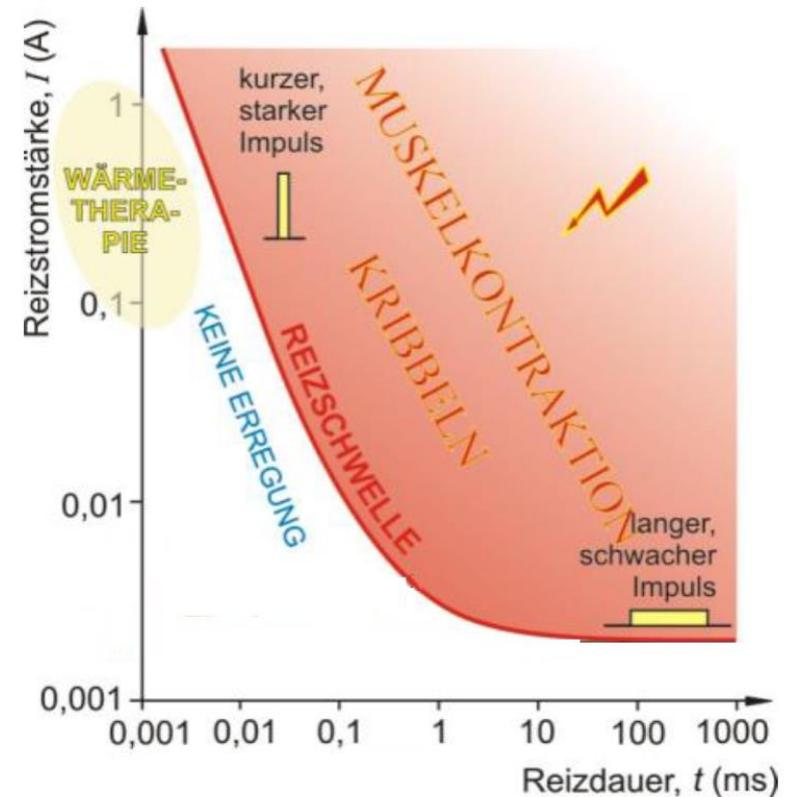
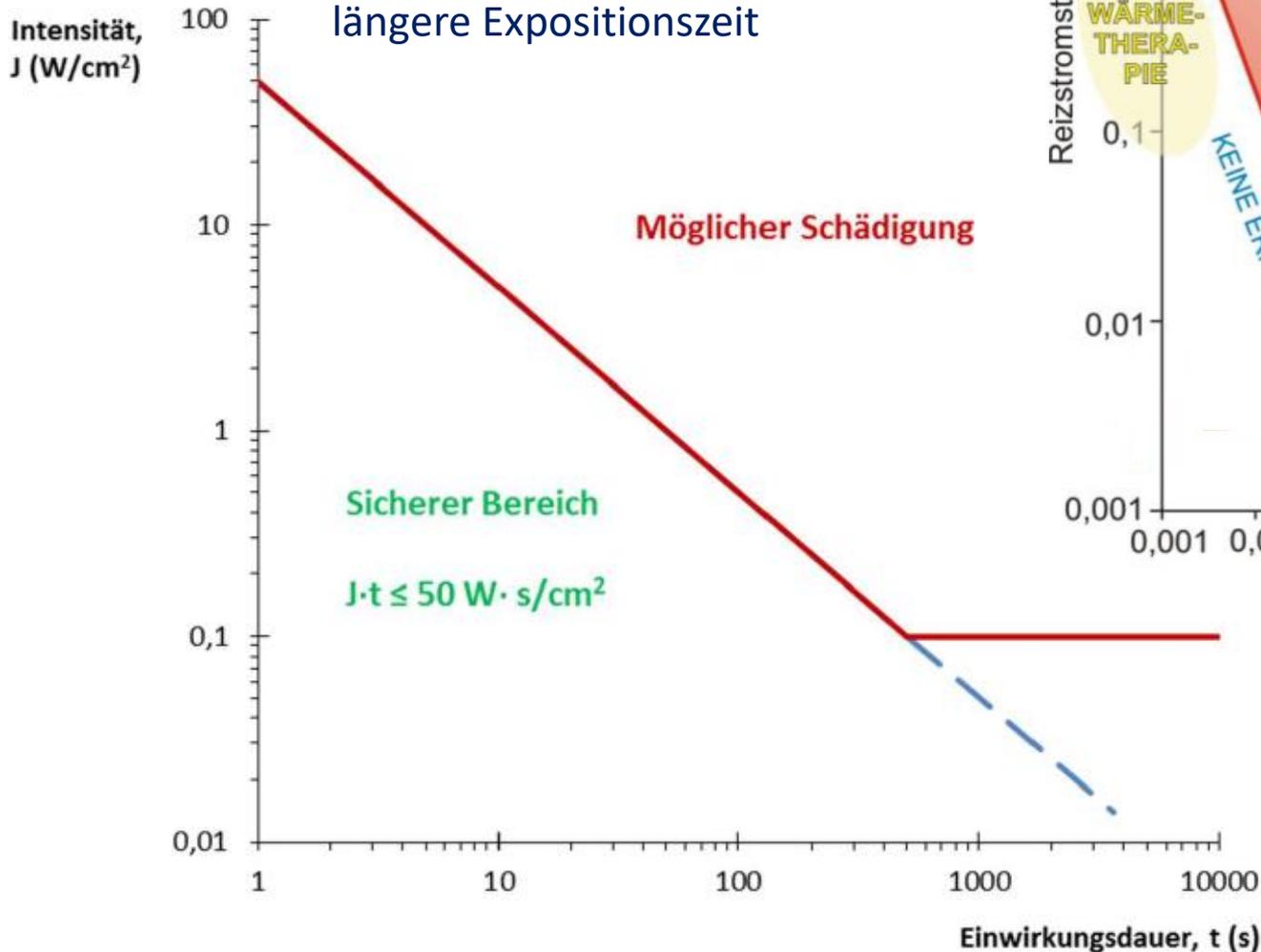
## Farb-Doppler

„BART“  
blue away, red towards



# Sicherheitsaspekte

- Achte auf die Intensität!
- Achte auf die Applikationsdauer!
- 3D/4D Videoaufnahmen benötigen längere Expositionszeit



siehe später:  
Reizdauer-Stromstärke-Diagramm  
(Reizcharakteristik) bei der  
Elektroreizung

# Hausaufgaben

## Aufgabensammlung

2.131, 2.145-147, 8.13-15, 8.18-19

## Feedback