

# ULTRASCHALL



## Notwendige Kenntnisse

Damjanovich et al.: Biophysik für Mediziner:

II/2.4., II/2.4.1, II/2.4.2, II/2.4.3

VIII/4.2.1

Ausschließlich für den Unterrichtsgebrauch

1

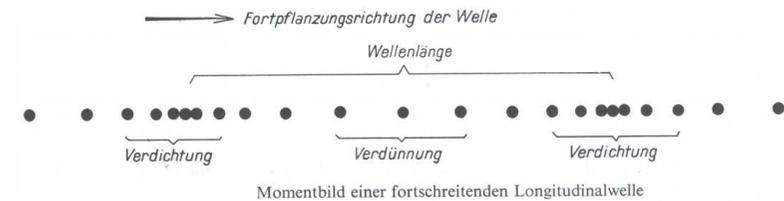
## Einleitung



### Längswellen (longitudinale Wellen):

Verdichtungen und Verdünnungen (d.h. Druckschwankungen gegenüber dem Normaldruck) laufen über das Trägermedium.

Die Schwingungsrichtung der einzelnen Oszillatoren ist parallel zur Ausbreitungsrichtung der Welle.



2

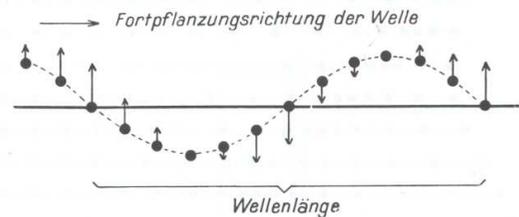
## Einleitung



### Querwellen (transversale Wellen):

Wellenberge und Wellentäler laufen über das Trägermedium.

Die Schwingungsrichtung der einzelnen Oszillatoren steht senkrecht zur Ausbreitungsrichtung der Welle.



Momentbild einer fortschreitenden Transversalwelle

## Eigenschaften des Ultraschalls

mechanische Schwingung, mechanische Welle

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

- ❖ *Mechanische Transversalwellen* entstehen nur, wenn elastische Querkräfte wirken.
- ❖ *Mechanische longitudinale* Wellen entstehen, wenn elastische Längskräfte wirken.
- ❖ *In Festkörpern* können sich Transversal- und Longitudinalwellen ausbreiten.
- ❖ *In Flüssigkeiten und Gasen* können sich nur Längswellen ausbreiten.

4

## Eigenschaften des Ultraschalls

### Charakteristiken

Frequenz  $f > 20 \text{ kHz}$   
 Wellenlänge  $\lambda$

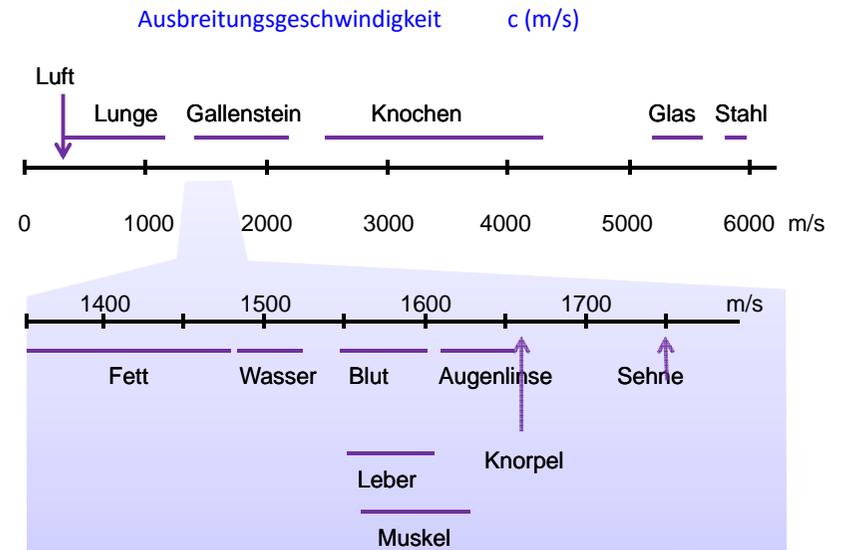
in den bildgebenden Geräten:  
 $f = 2 - 10 \text{ MHz}$   
 $\lambda = 0,77 - 0,154 \text{ mm}$

Frequenzbereiche der Schallwellen:

- a. 0 – 20 Hz      Infraschall
- b. 20 Hz – 20 kHz    hörbarer Bereich
- c. 20 kHz – 1 GHz    Ultraschall
- d. 1 GHz – 10 THz    Hyperschall

Beispiel:  
 $f = 2 \text{ MHz}$   
 $c = 1540 \text{ m/s}$  in Weichteilgeweben  
 $\lambda = ?$

5



6

## Eigenschaften des Ultraschalls

Ausbreitungsgeschwindigkeit  
**unabhängig von der Frequenz => keine Dispersion**

Stoff	Schallgeschwindigkeit (m/s)	Dichte (kg/m <sup>3</sup> )
Wasser (20 °C)	1483	998,2
Luft ( $p_0, T_0$ )	331	1,293
Fett	1470	970
Knochenmark	1700	970
Muskel	1568	1040
Gehirn	1530	1020
Knochen (kompakt)	3600	1700

7

## Eigenschaften des Ultraschalls

Kompressibilität ( $\kappa$ ) und  
 Ausbreitungsgeschwindigkeit ( $c$ )

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

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

$\rho$  - Dichte

Akustische Impedanz ( $Z$ ) und  
 Ausbreitungsgeschwindigkeit

$$Z = \frac{p}{v} = \frac{p_{\max}}{v_{\max}}$$

$v$  - Teilchengeschwindigkeit

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

8

## Eigenschaften des Ultraschalls

### Die Schallintensität

$$J = \frac{1}{2Z} \Delta p_{\max}^2$$

Intensität = Energieflußdichte,  
Leistungsdichte

$$J = \frac{1}{Z} \Delta p_{\text{eff}}^2$$

effektiver Wert:  
 $\Delta p_{\text{eff}}^2 = \Delta p_{\max}^2 / 2$

$$P_{\text{el}} = \frac{1}{Z_{\text{el}}} U_{\text{eff}}^2$$

elektrische Analogie

9

## Intensität und Gewebeschädigung

Die Schallintensität bei Diagnostik  $\bar{J} = 0,01 \text{ W/cm}^2 < 0,1 \text{ W/cm}^2$

Siehe Sicherheitsaspekte!

Druckschwankung in Muskel:  
effektiv ~0,13fache,  
maximum ~0,2fache des Atmosphärendruckes

Die Schallintensität bei der Therapie  $\bar{J} = 2,5 \text{ W/cm}^2$

Achte auf die Applikationsdauer!

Druckschwankung in Muskel:  
effektiv ~2fache,  
maximum ~3fache des Atmosphärendruckes

Vergleich: Hörshwelle  $J_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2 = 10^{-16} \text{ W/cm}^2$   
Schmerzgrenze  $J = 10 \text{ W/m}^2 = 10^{-3} \text{ W/cm}^2$

10

## Eigenschaften des Ultraschalls

### Die Schwächung

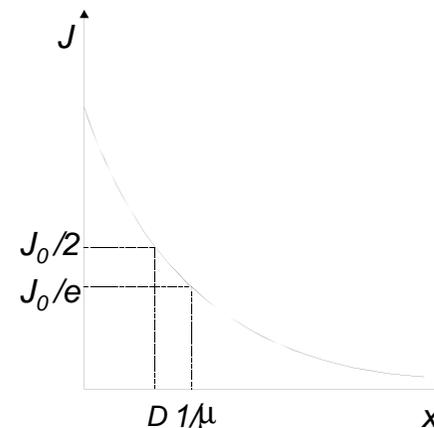
Schwächungsgesetz  $J = J_0 \cdot e^{-\mu \cdot x}$

$$\mu = \frac{\ln 2}{D} = \frac{0,693}{D} \quad \mu = \mu(f)$$

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 (distilliert)	500	180

11

### Die Schwächung



$$\mu = \mu(f)$$

Dämpfung:

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

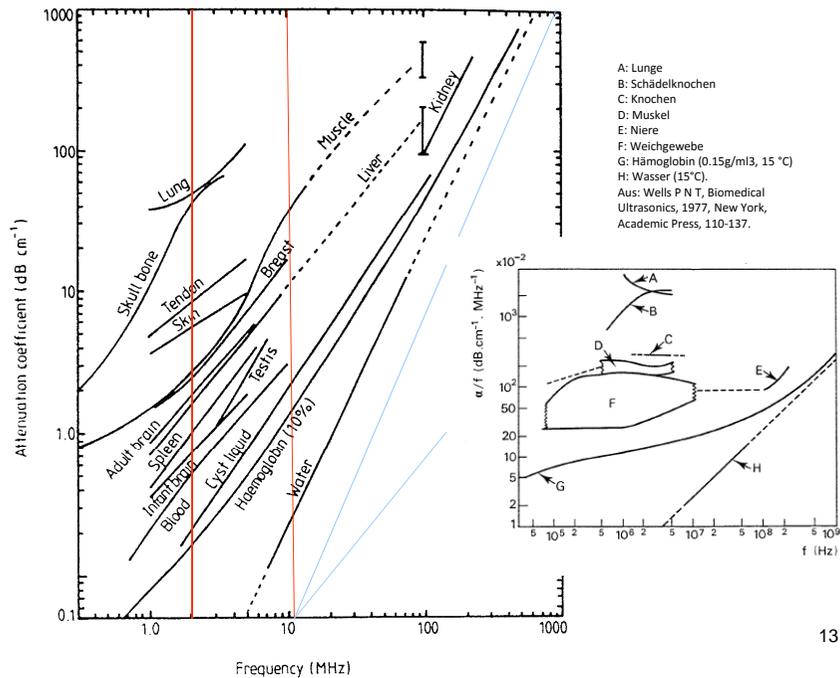
$$\alpha = 10 \cdot \mu \cdot x \cdot \lg e \text{ dB}$$

spezifische  
Dämpfung:

$$\frac{\alpha}{f \cdot x}$$

Für weiche Gewebe:  
~1dB/(cm·MHz)

12



13

### Reflexion

$$R = \frac{J_{refl}}{J_{ein}} = \left( \frac{\rho_1 \cdot c_1 - \rho_2 \cdot c_2}{\rho_1 \cdot c_1 + \rho_2 \cdot c_2} \right)^2$$

$$Z_1 \ll Z_2, \quad R \approx 1$$

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, Parafinöl  
vermindert den Impedanzunterschied zwischen Luft und Haut

optimale Anpassung:

$$Z_{Kopplung} \approx \sqrt{Z_{Quelle} \cdot Z_{Haut}}$$

14

## 2. Erzeugung des Ultraschalls

- In zwei Schritten:

- Erzeugung sinusförmiger elektrischer Spannung mit hoher Frequenz  $f > 20 \text{ kHz}$   
- Sinusoszillator
- Umwandlung der elektrische Schwingung in mechanische Schwingung  
- Wandler (Transducer)

15

## Wandler



Brüder Curie, 1881:

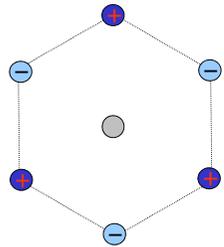
Bei Kristallen mit polaren Achsen (Turmalin, Quarz) treten durch Druck oder Dehnung in bestimmten Richtungen elektrische Ladungen an den Enden der polaren Achsen auf.

mechanische Schwingung → elektrische Schwingung  
piezoelektrischer Effekt

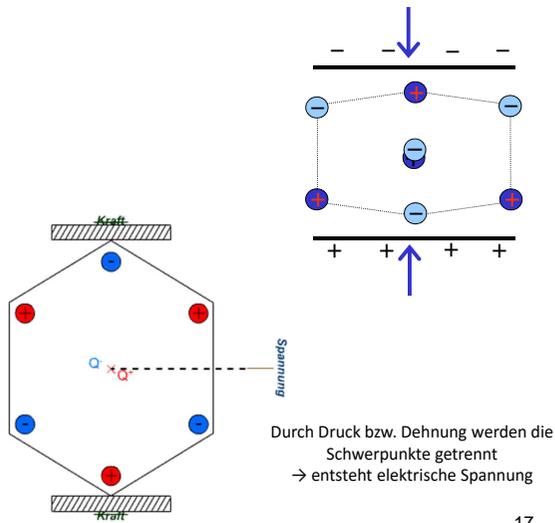
elektrische Schwingung → mechanische Schwingung  
reziproker piezoelektrischer Effekt

16

## „Mechanismus“ des Piezoeffektes :



Die Schwerpunkte der elektrischen Ladungen fallen zusammen.



17

## Wandler: Schwingquarz

elektrische Schwingung → mechanische Schwingung

Bemerkungen:

- $f_{\text{elektrische}} = f_{\text{mechanische}}$
- $A_{\text{elektrische}} \sim A_{\text{mechanische}}$
- Umwandlung in beiden Richtungen!

Schwingquarz = Sender/Detektor

18