

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

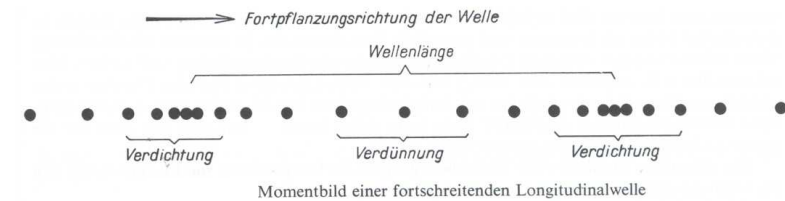
Einleitung



Längswellen (longitudinale Wellen):

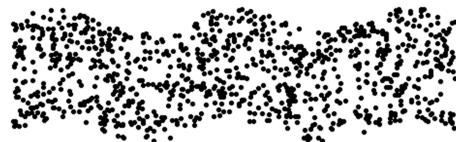
Verdichtungen und Verdünnungen (d.h. Druckschwankungen gegenüber dem Normaldruck) laufen über das Trägermedium.

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



2

Einleitung

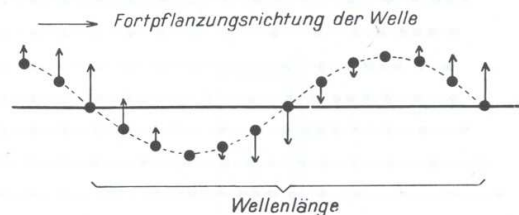


Querwellen (transversale Wellen):

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 Querkkräfte 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 λ

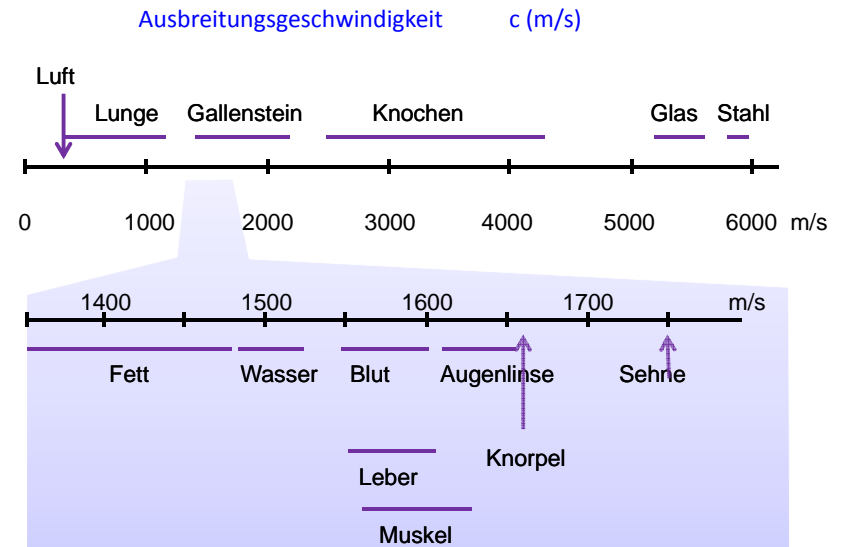
in den bildgebenden Geräten:
 $f = 2 - 10 \text{ MHz}$
 $\lambda = 0,77 - 0,154 \text{ mm}$

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 ³)
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 (κ) und
Ausbreitungsgeschwindigkeit (c)

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

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

ρ - 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 $\bar{J} = 0,01 \text{ W/cm}^2 = 10 \text{ mW/cm}^2 < 100 \text{ mW/cm}^2$

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

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

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

Vergleich: Hörschwelle $J_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$
Schmerzgrenze $J = 10 \text{ W/m}^2$

10

Eigenschaften des Ultraschalls

Die Schwächung

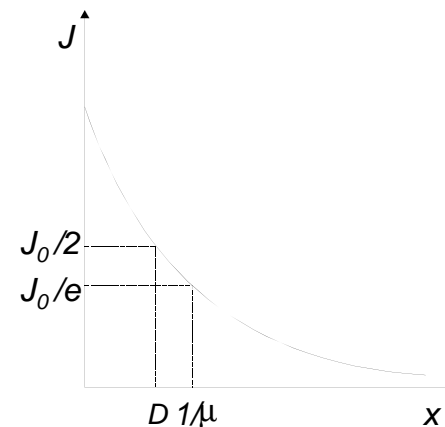
Schwächungsgesetz $J = J_0 \cdot e^{-\mu x}$

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

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 (destilliert)	500	180

11

Die Schwächung



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

Dämpfung:

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

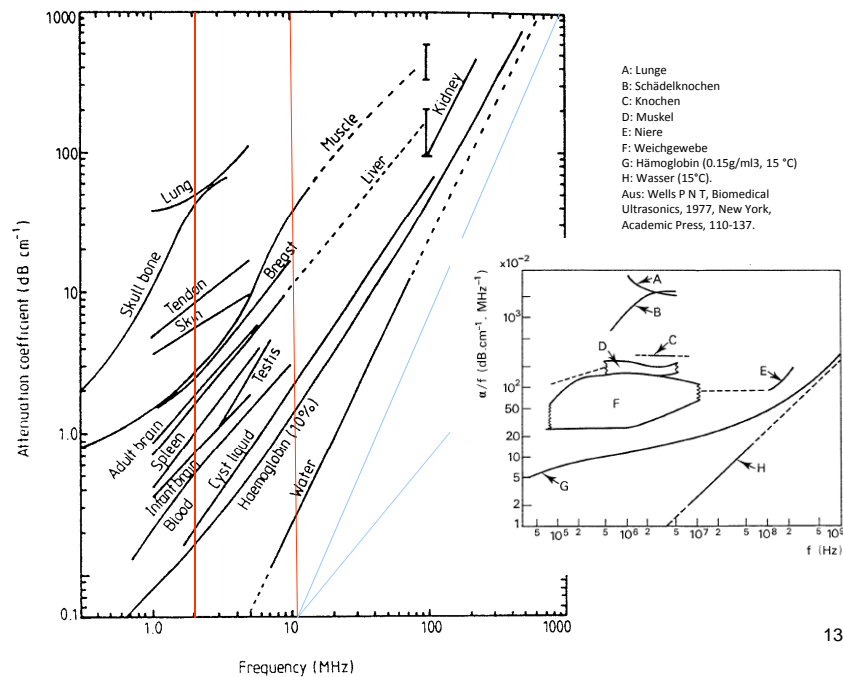
$$\alpha = 10 \cdot \mu \cdot x \cdot \lg e \text{ dB}$$

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 elektrischen Schwingung
in mechanische Schwingung
- Wandler (Transducer)

15

Wandler



Brüder Curie, 1881:

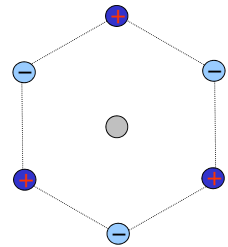
Bei Kristallen mit polaren Achsen (Turmalin, Quarz) treten durch Druck oder Dehnung in bestimmten Richtungen elektrische Ladungen an den Enden der polaren Achsen auf.

mechanische Schwingung → elektrische Schwingung
piezoelektrischer Effekt

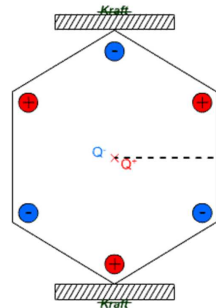
elektrische Schwingung → mechanische Schwingung
reziproker piezoelektrischer Effekt

16

„Mechanismus“ des Piezoeffektes :

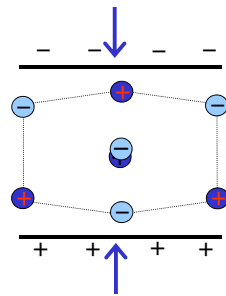


Die Schwerpunkte der elektrischen Ladungen fallen zusammen.



Spannung

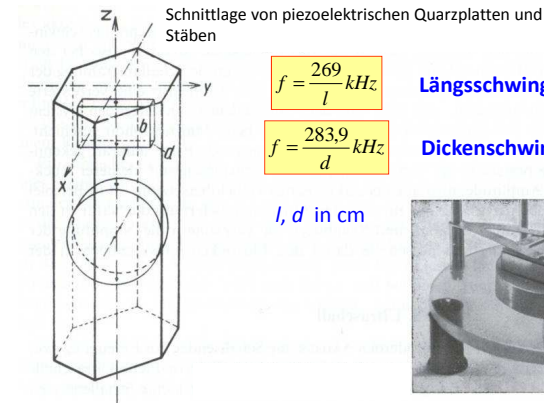
Durch Druck bzw. Dehnung werden die Schwerpunkte getrennt
→ entsteht elektrische Spannung



17

Wandler: Schwingquarz

elektrische Schwingung → mechanische Schwingung
reziproker piezoelektrischer Effekt



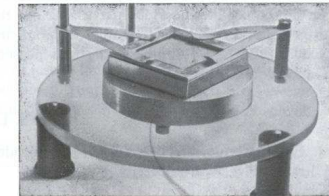
$$f = \frac{269}{l} \text{ kHz}$$

Längsschwingung

$$f = \frac{283,9}{d} \text{ kHz}$$

Dickenschwingung

l, d in cm



18

Wandler: Schwingquarz

elektrische Schwingung → mechanische Schwingung

Bemerkungen:

a. $f_{\text{elektrische}} = f_{\text{mechanische}}$

b. $A_{\text{elektrische}} \sim A_{\text{mechanische}}$

c. Umwandlung in beiden Richtungen!

Schwingquarz = Sender/Detektor

19