

ULTRASCHALL



Ausschließlich für den Unterrichtsgebrauch

1

Notwendige Kenntnisse

Biophysik für Mediziner:

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

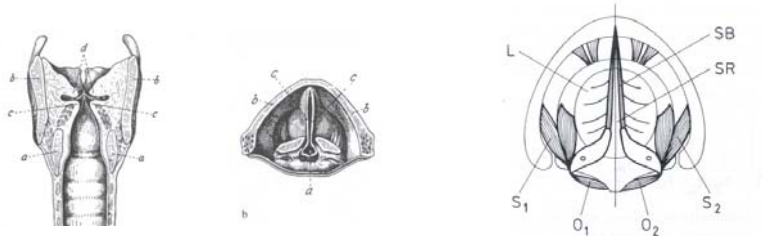
VIII/4.2.1

2

1. Einleitung

Was ist der Schall für eine Erscheinung?

Ein oszillierender oder vibrierender Körper in einem elastischen Medium strahlt **Schall** ab.



Die Schallwellen bestehen in einer *mechanischen Störung* des Gleichgewichtszustands der Materie, die sich *wellenförmig* ausbreitet.

3

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.

4

1. Einleitung



Querwellen (transversale Wellen): Wellenberge und Wellentäler laufen über das Trägermedium. Die Schwingungsrichtung der einzelnen Oszillatoren steht senkrecht zur Ausbreitungsrichtung der Welle.

5

1. Eigenschaften des Ultraschalls

1.1 mechanische Schwingung mechanische Welle

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

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

6

1. Eigenschaften des Ultraschalls

1.2 Charakteristiken

f Frequenz, $f > 20$ kHz
(in den bildgebenden Geräten: 2 - 10 MHz)

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 |

7

1. Eigenschaften des Ultraschalls

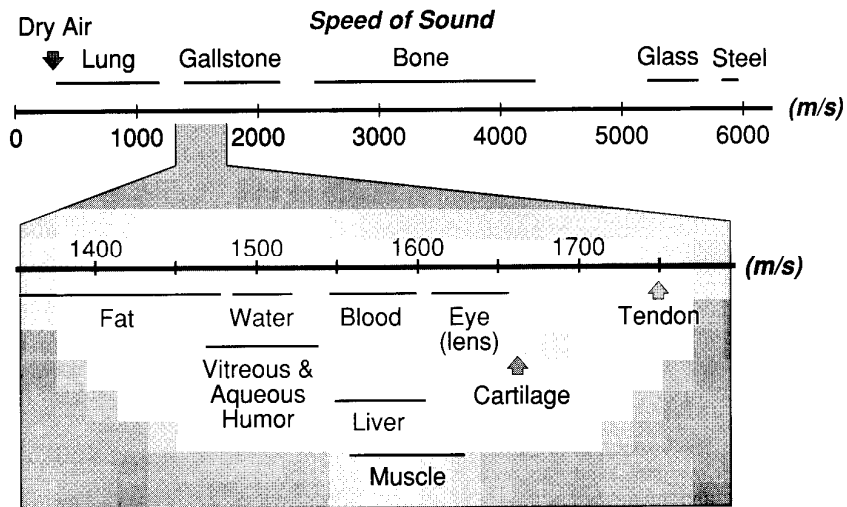
1.2 Charakteristiken

λ Wellenlänge
(in den bildgebenden Geräten: 0,77 - 0,154 mm)

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

8

1.3 Ausbreitungsgeschwindigkeit



1. Eigenschaften des Ultraschalls

1.3 Ausbreitungsgeschwindigkeit

Stoff	Schallgeschwindigkeit m/s	Dichte kg/m ³	Wellenwiderstand kg/m ² s
Wasser (20 °C)	1483	998,2	1,489 · 10 ⁶
Luft (p _n , T _n)	331	1,293	0,000414 · 10 ⁶
Fett	1470	970	1,42 · 10 ⁶
Knochenmark	1700	970	1,65 · 10 ⁶
Muskel	1568	1040	1,63 · 10 ⁶
Gehirn	1530	1020	1,56 · 10 ⁶
Knochen (kompakt)	3600	1700	6,12 · 10 ⁶

Konsequenzen:

➤ je größer die *elastischen Kräfte* sind, desto größer ist die Geschwindigkeit.

➤ Feste Körper > Flüssigkeiten > Gase

10

1. Eigenschaften des Ultraschalls

1.3 Ausbreitungsgeschwindigkeit

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

κ - Kompressibilität

- relative Volumenabnahme

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

ρ - Dichte

11

1. Eigenschaften des Ultraschalls

1.4 Die akustische Impedanz

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

v - Teilchengeschwindigkeit

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

12

1. Eigenschaften des Ultraschalls

1.5 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

13

Intensität und Gewebeschädigung

Die Schallintensität bei Diagnostik $J = 100 \text{ W/m}^2$

Druckschwankung in Muskel $\sim 0,2$ fache des Atmosphärendruckes

Die Schallintensität bei der Therapie $J = 2500 \text{ W/m}^2$

Druckschwankung in Muskel ~ 3 fache des Atmosphärendruckes

14

1. Eigenschaften des Ultraschalls

1.6 Die Schwächung

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

$$\mu = \frac{\ln 2}{D} = \frac{0,693}{D}$$

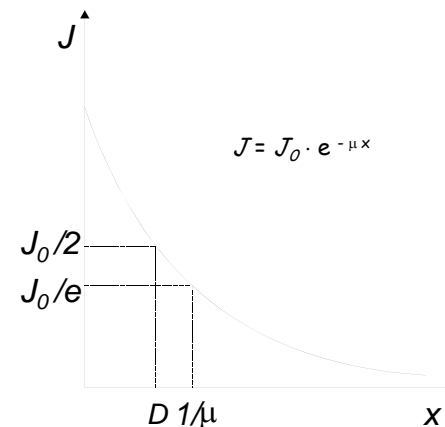
$$\mu = \mu(f)$$

Tab.13.2 Halbwertsdicken h für Ultraschall

Stoff	h/cm bei $f = 0,9 \text{ MHz}$	h/cm bei $f = 2,5 \text{ MHz}$
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
H ₂ O, destilliert	500	180

15

1.6 Die Schwächung



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

Dämpfung:

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

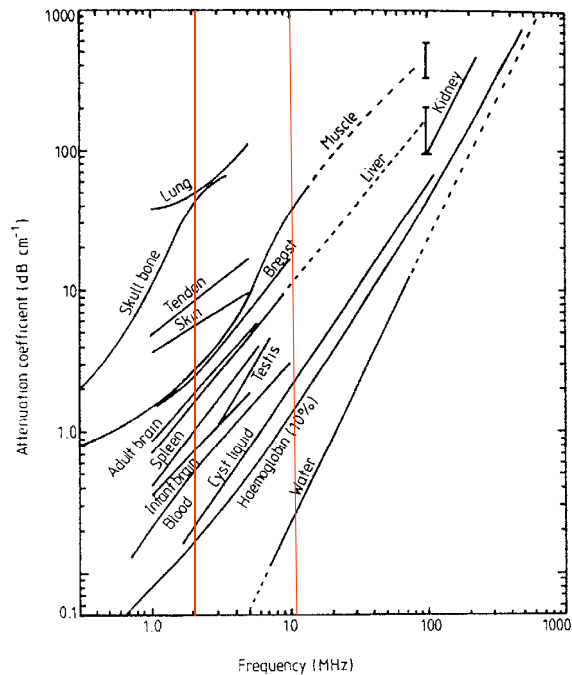
$$\alpha = 10 \cdot \mu \cdot x \cdot \lg e \text{ dB}$$

spezifische
Dämpfung:

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

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

16



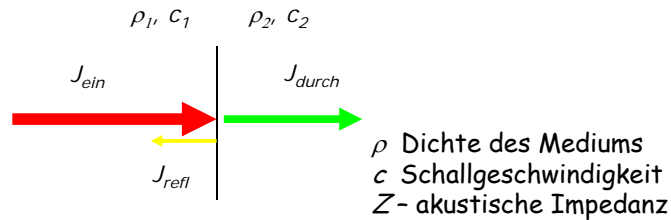
17

Frequenz Mhz	Eindringtiefe in cm	Untersuchungsgebiet
1	50	
2–3,5	25–15	Fetus, Leber, Herz, Veterinärmedizin (Großtiere)
3,5	15	Niere, Veterinärmedizin (große Hunde)
5	10	Gehirn, Veterinärmedizin (mittelgroße Hunde)
7,5	7	Veterinärmedizin (kleine Hunde, Katzen)
8–9	6	Prostata (endoskopisch)
10	5	
11–12	4–3	Pankreas (intraoperativ)
7,5–15	7–2	Brustdiagnostik
20	1,2	
21–24	1,1–0,9	Auge, Haut
40	0,6	Haut, Gefäße

18

1. Eigenschaften des Ultraschalls

1.7 Reflexion



$$R = \frac{J_{\text{refl}}}{J_{\text{ein}}} = \left(\frac{\rho_1 \cdot c_1 - \rho_2 \cdot c_2}{\rho_1 \cdot c_1 + \rho_2 \cdot c_2} \right)^2 = \left(\frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \right)^2$$

19

1. Eigenschaften des Ultraschalls

1.7 Reflexion

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

a. Grundformel der medizinischen Diagnostik

b. wenn $\rho_1 \cdot c_1 \ll \rho_2 \cdot c_2 \Rightarrow R \approx 1$ totale Reflexion!

Gas – Flüssigkeit

Gas – Festkörper

Anpassungsschicht (Koppelmedium): Wasser, Gel, Paraffinöl

vermindert den Impedanzunterschied zwischen Luft und Haut

20

Reflexion

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

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



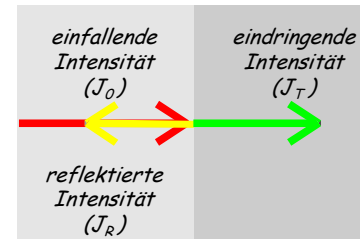
optimale Anpassung:

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

21

Phänomene an der Grenzflächen zweier Medien

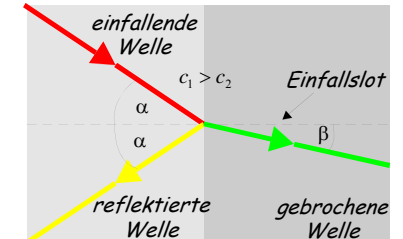
senkrechter Einfall



$$J_0 = J_R + J_T$$

Reflexion und Transmission

schräger Einfall

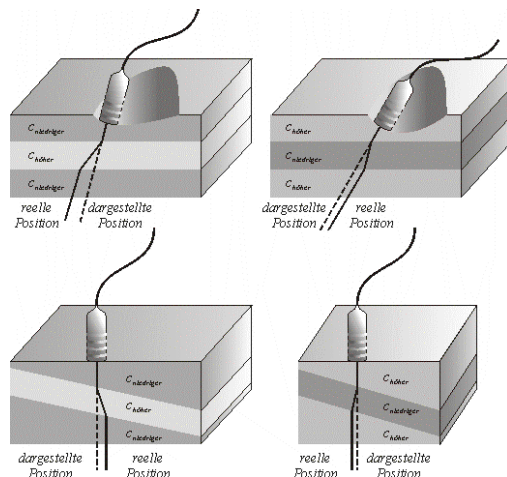


$$\frac{c_1}{c_2} = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta}$$

Snellius-Descartes

22

Schräger Einfall bzw. Schräge Grenzfläche



23

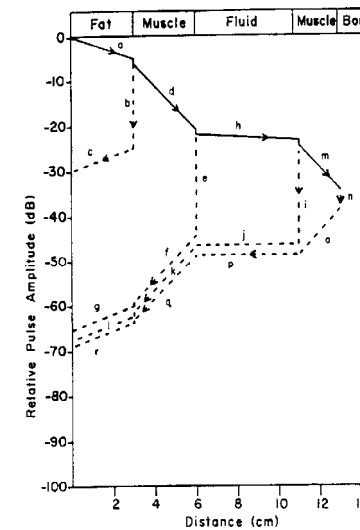
Absorption und Reflexion

Je tiefer die Reflexionsschicht liegt, desto schwächer ist das Echosignal.

Die Verstärkung der Echosignale aus immer größeren Tiefe ist immer stärker.

TGC: time gain compensation

DGC: depth gain compensation



	Z_1	Z_2	R	R	10 lgR	T	T	10 lgT
	g/(cm ² s)	g/(cm ² s)		%	dB		%	dB
Muskel/Fett	1,63 10 ⁵	1,42 10 ⁵	0,004741	0,4741	-23,24	0,995	99,5	0,021

24

2. Erzeugung des Ultraschalls

- In zwei Schritten:

- Erzeugung sinusförmiger elektrischer Spannung mit hoher Frequenz $f > 20 \text{ kHz}$
 - Sinusooszillator
 - Siehe Praktikum: Verstärker
- Umwandlung der elektrischen Schwingung in mechanische Schwingung
 - Wandler (Transducer)

25

2. Wandler

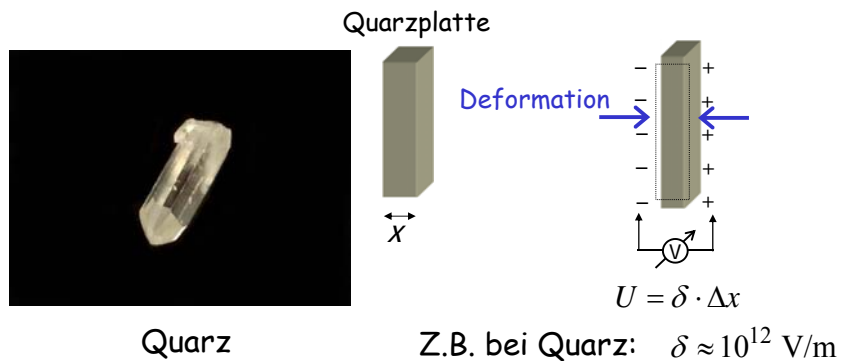
1881 entdeckten die Brüder Curie, dass bei Kristallen mit polaren Achsen (Turmalin, Quarz) durch Druck/Dehnung in bestimmten Richtungen elektrische Ladungen an den Enden der polaren Achsen auftreten.

mechanische Schwingung \rightarrow elektrische Schwingung
piezoelektrischer Effekt

elektrische Schwingung \rightarrow mechanische Schwingung
reziproker piezoelektrischer Effekt

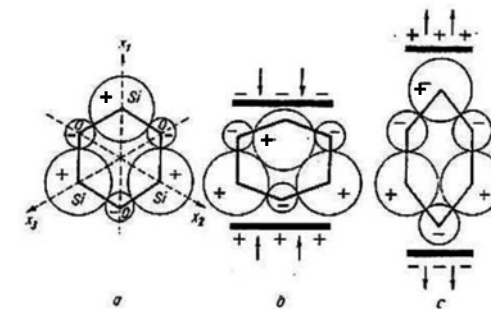
26

Piezoelektrizität



27

„Mechanismus“ des Piezoeffektes :



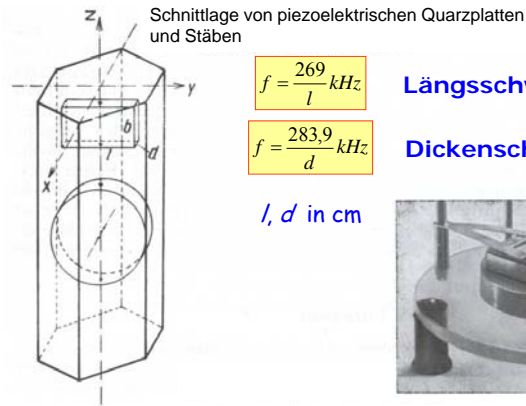
Die Schwerpunkte der elektrischen Ladungen fallen zusammen.

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

28

2. Wandler: Schwingquarz

elektrische Schwingung → mechanische Schwingung
reziproker piezoelektrischer Effekt



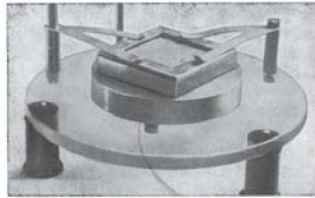
$$f = \frac{269}{l} \text{ kHz}$$

Längsschwingung

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

Dickenschwingung

l, d in cm



29

2. 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

30