

ULTRASCHALL



Ausschließlich für den Unterrichtsgebrauch

1

ULTRASCHALL



Notwendige Vorkenntnisse

Wahlfach:

Schwingungen, Wellen:
Schwingung (harmonische Schwingung),
Periodenzeit, Frequenz, Kreisfrequenz, Amplitude,
Welle (Longitudinalwelle, Transversalwelle),
Wellenlänge, $c = \lambda \cdot v$, Beugung, Interferenz,
stehende Welle, Schallwelle, Schallbereiche,
Doppler-Effekt

Statistik:

Medizinische Informatik, medizinische
Signalverarbeitung (Vortrag No.13.)

2

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.

3

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 |

4

1. Eigenschaften des Ultraschalls

1.2 Charakteristiken

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

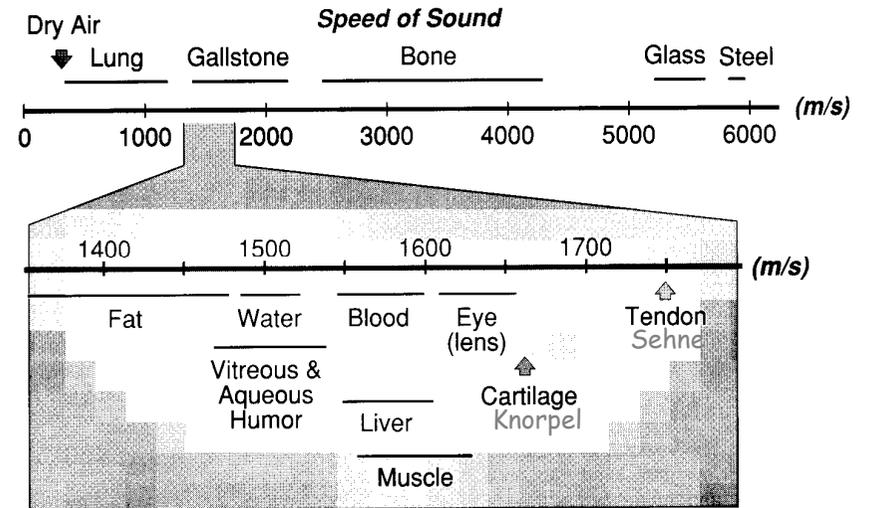
Beispiel: $f = 2 \text{ MHz}$
 $c = 1540 \text{ m/s}$ in Weichteilgeweben
 $\lambda = ?$

$$\lambda = c \cdot T = c / f$$

$$\lambda = c / f = 1540 \text{ m/s} / 2 \cdot 10^6 \text{ s} = 0,77 \cdot 10^{-3} \text{ m} = 0,77 \text{ mm}$$

5

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	$1,489 \cdot 10^6$
Luft (p_n, T_n)	331	1,293	$0,000414 \cdot 10^6$
Fett	1470	970	$1,42 \cdot 10^6$
Knochenmark	1700	970	$1,65 \cdot 10^6$
Muskel	1568	1040	$1,63 \cdot 10^6$
Gehirn	1530	1020	$1,56 \cdot 10^6$
Knochen (kompakt)	3600	1700	$6,12 \cdot 10^6$

Konsequenzen:

- je größer die *elastischen Kräfte* sind, desto größer ist die Geschwindigkeit.
- Feste Körper > Flüssigkeiten > Gase

7

1. Eigenschaften des Ultraschalls

1.4 Die akustische Impedanz

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

v - Teilchengeschwindigkeit

$$Z = c \cdot \rho$$

8

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

9

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

10

1. Eigenschaften des Ultraschalls

1.6 Die Schwächung

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

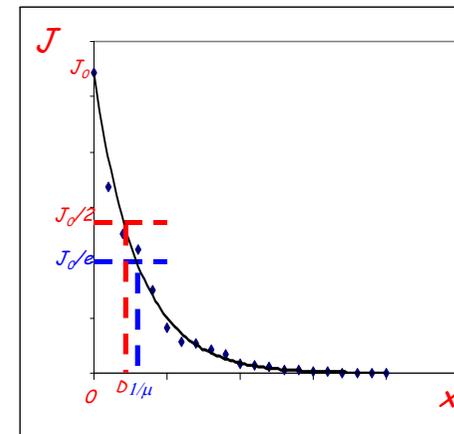
$$\mu = \frac{\ln 2}{D} = \frac{0,693}{D} \quad \mu = \mu(f)$$

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

11

1.6 Die Schwächung



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

Dämpfung:

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

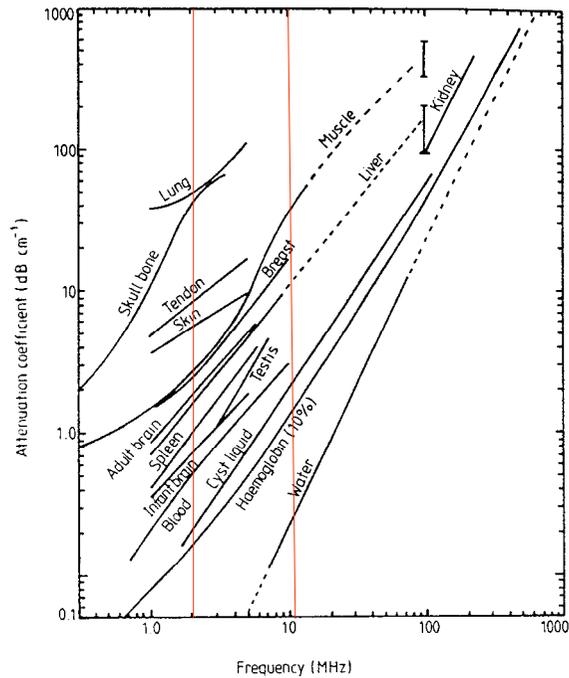
$$\alpha = 10 \cdot \mu \cdot x \cdot \lg e \text{ dB}$$

spezifische
Dämpfung:

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

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

12

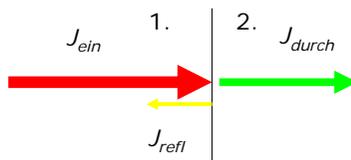


Frequenz Mhz	Eindringtiefe in cm	Untersuchungsgebiet
1	50	
2-3,5	25-15	Fetus, Leber, Herz, Veterinärmedizin (Großtiere)
3,5	15	Niere, Veterinärmedizin (große Hunde)
5	10	Gehirn, Veterinärmedizin (mittelgroße Hunde)
7,5	7	Veterinärmedizin (kleine Hunde, Katzen)
8-9	6	Prostata (endoskopisch)
10	5	
11-12	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

1. Eigenschaften des Ultraschalls

1.7 Reflexion

- an der Grenzflächen von zwei unterschiedlichen Medien

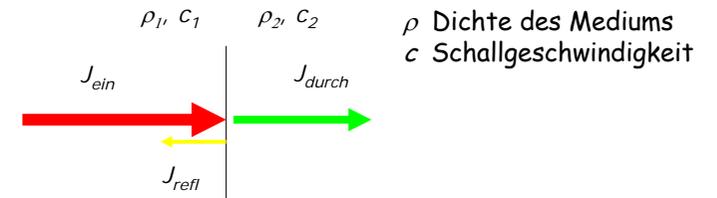


$$R = \frac{J_{refl}}{J_{ein}}$$

Ein wievielter Anteil der einfallender Intensität wird reflektiert

1. Eigenschaften des Ultraschalls

1.7 Reflexion



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

1. Eigenschaften des Ultraschalls

1.7 Reflexion

$$Z = \rho \cdot c$$

ρ - Dichte des Mediums
 c - Schallgeschwindigkeit
 Z - akustische Impedanz

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

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

1. Eigenschaften des Ultraschalls

1.7 Reflexion

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

- a. Grundformel der medizinischen Diagnostik
- b. $Z = \rho \cdot c$ akustische Impedanz
- c. 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, Parafinöl

vermindert den Impedanzunterschied zwischen Luft und Haut

Reflexion

Reflexionsvermögen

"totale" Reflexion

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

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

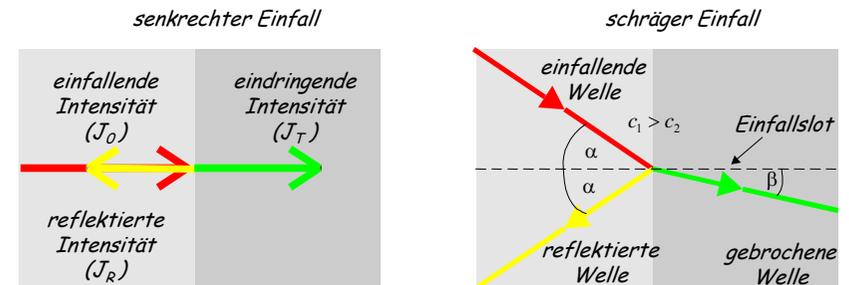
optimale Anpassung:

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



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

Phänomene an der Grenzflächen zweier Medien



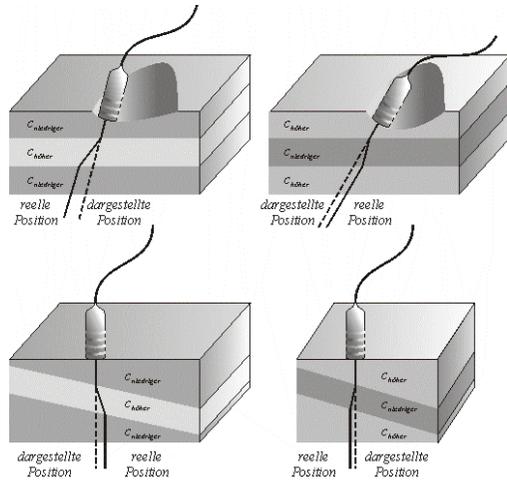
$$J_0 = J_R + J_T$$

Reflexion und Transmission

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

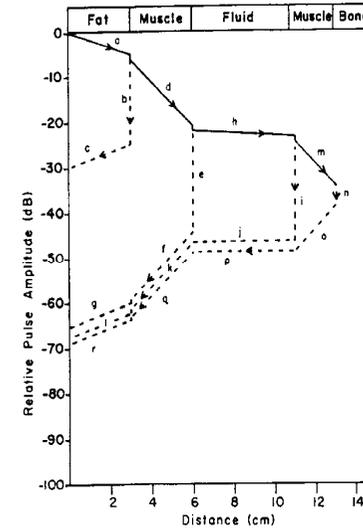
Snellius-Descartes

Schräger Einfall bzw. Schräge Grenzfläche



21

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	$10 \lg R$	T	T	$10 \lg T$
	$g/(cm^2 s)$	$g/(cm^2 s)$		%	dB		%	dB
Muskel/Fett	$1,63 \cdot 10^5$	$1,42 \cdot 10^5$	0,004741	0,4741	-23,24	0,995	99,5	0,021

22

2. Erzeugung des Ultraschalls

- In zwei Schritten:

- a. Erzeugung sinusförmiger elektrischer Spannung mit hoher Frequenz $f > 20 \text{ kHz}$

- Sinusoszillator

- b. Umwandlung der elektrische Schwingung in mechanische Schwingung

- Wandler (Transducer)

23

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

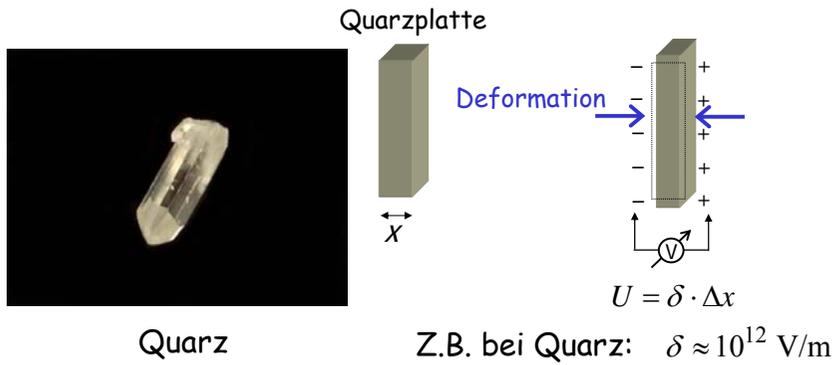
piezoelektrischer Effekt

elektrische Schwingung \rightarrow mechanische Schwingung

reziproker piezoelektrischer Effekt

24

Piezoelektrizität



Quarzplatte

Quarz

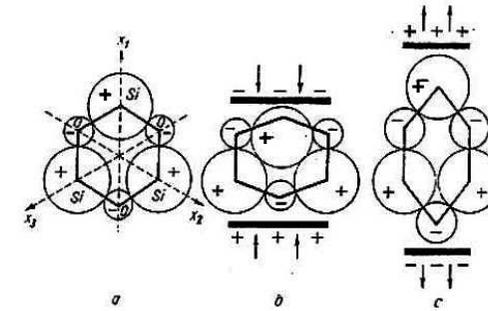
Deformation

$U = \delta \cdot \Delta x$

Z.B. bei Quarz: $\delta \approx 10^{12} \text{ V/m}$

25

„Mechanismus“ des Piezoeffektes :

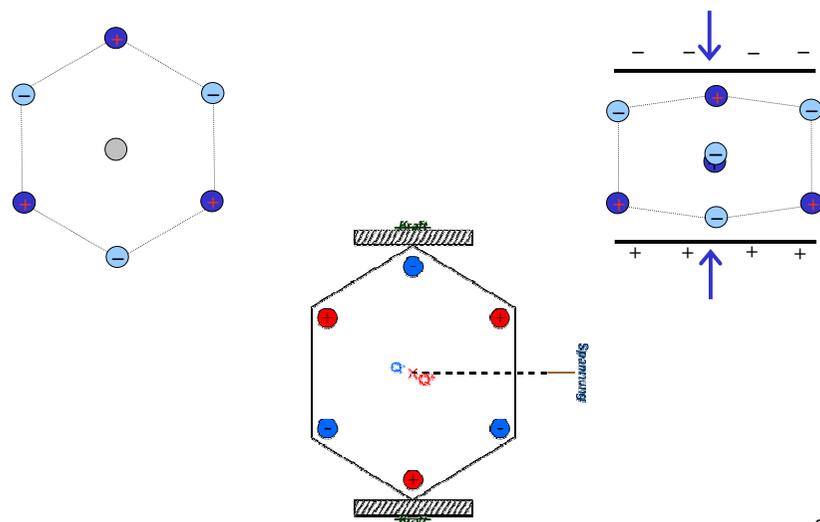


Die Schwerpunkte der elektrischen Ladungen fallen zusammen.

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

26

„Mechanismus“ des Piezoeffektes :



27

2. Wandler: Schwingquarz

elektrische Schwingung → mechanische Schwingung

reziproker piezoelektrischer Effekt

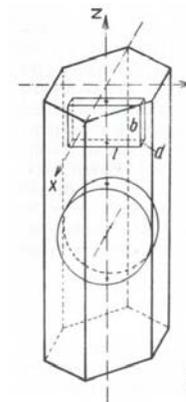


Abb. IX, 61. Schnittlage von piezoelektrischen Quarzplatten und Stäben

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

Längsschwingung

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

Dickenschwingung

l, d in cm

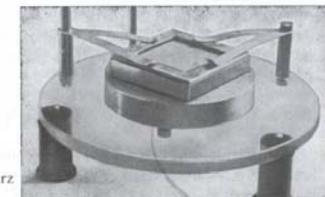


Abb. IX, 62. Ultraschallquarz in einer Halterung

28

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

Notwendige Kenntnisse

Biophysik für Mediziner:

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

VIII/4.2.1

Praktikumsbuch Biophysik:

Ultraschall