

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

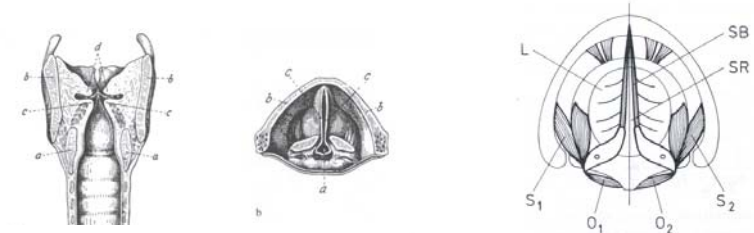
Ausschließlich für den Unterrichtsgebrauch

1

Einleitung

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.

2

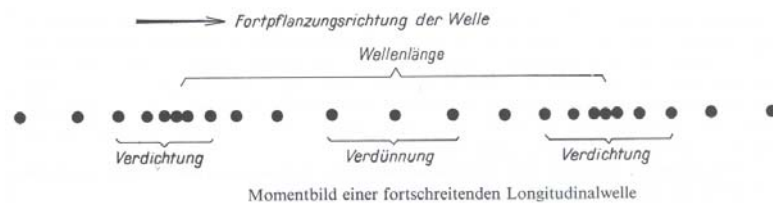
Einleitung



Längswellen (longitudinale Wellen):

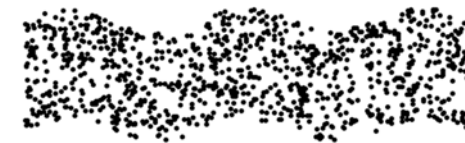
Verdichtungen und Verdünnungen (d.h. Druckschwankungen gegenüber dem Normaldruck) laufen über das Trägermedium.

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



3

Einleitung

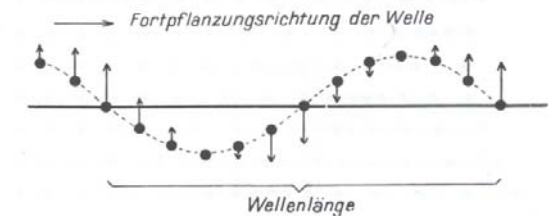


Querwellen (transversale Wellen):

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 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.

5

Eigenschaften des Ultraschalls

Charakteristiken

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

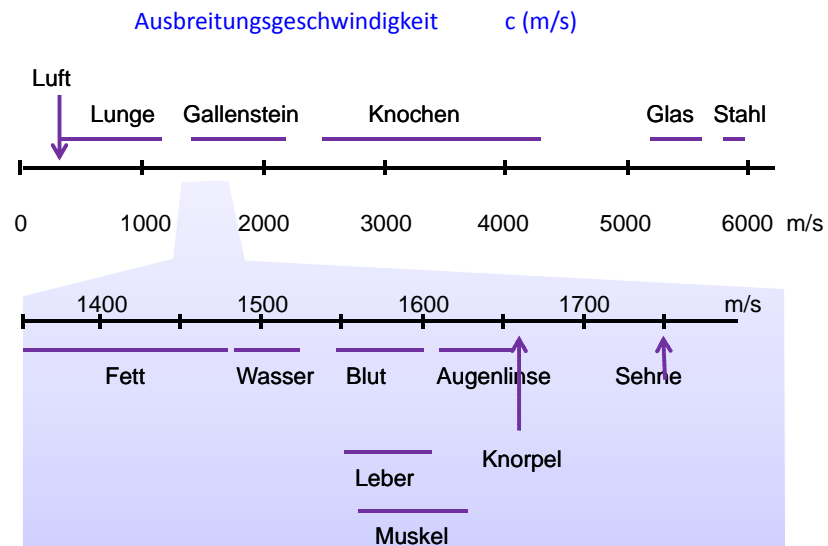
in den bildgebenden Geräten:
 $f = 2 - 10 \text{ MHz}$
 $\lambda = 0,77 - 0,154 \text{ mm}$

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
 $\lambda = ?$

6



7

Eigenschaften des Ultraschalls

Ausbreitungsgeschwindigkeit

unabhängig von der Frequenz => keine Dispersion

Stoff	Schallgeschwindigkeit (m/s)	Dichte (kg/m³)
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

8

Eigenschaften des Ultraschalls

Kompressibilität und Ausbreitungsgeschwindigkeit

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

κ - Kompressibilität

- relative Volumenabnahme

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

ρ - Dichte

9

1. Eigenschaften des Ultraschalls

Die akustische Impedanz und Ausbreitungsgeschwindigkeit

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

v - Teilchengeschwindigkeit

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

10

Medium	ρ Dichte [kg/m³]	κ Kompressibilität [1/GPa]	c Geschwindigkeit [m/s]	Z akustische Impedanz [kg/(m² s)]	$\alpha/(fx)$ spezifische Dämpfung [dB/(cm MHz)]
Luft	1,3	7650	331	$0,00043 \cdot 10^6$	1,2
Lunge	400	5,92	650	$0,26 \cdot 10^6$	-
Fett	925	0,51	1470	$1,42 \cdot 10^6$	0,63
Wasser 20°C	998	0,45	1492	$1,49 \cdot 10^6$	0,0022
Gehirn	1025	0,42	1530	$1,56 \cdot 10^6$	0,85
Weichteile	1060	0,40	1540	$1,63 \cdot 10^6$	0,3-1,7
Leber	1060	0,38	1560	$1,65 \cdot 10^6$	0,94
Niere	1040	0,40	1560	$1,62 \cdot 10^6$	1,0
Milz	1060	0,39	1566	$1,64 \cdot 10^6$	-
Muskel	1060	0,40	1568	$1,63 \cdot 10^6$	1,3-3,3
Blut	1060	0,38	1570	$1,61-1,66 \cdot 10^6$	0,18
Augenlinse	1140	0,34	1620	$1,84 \cdot 10^6$	2,0
Knochenmark	970	0,36	1700	$1,65 \cdot 10^6$	-
Knochen, porös	1380	0,08	3000	$2,2-2,9 \cdot 10^6$	-
Knochen, kompakt	1700	0,05	3600	$6,12 \cdot 10^6$	20,0
Aluminium	2700	0,009	6400	$17,28 \cdot 10^6$	-
Kontaktgel	-	-	-	$6,5 \cdot 10^6$	-

Tabelle II.4.

11

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

12

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 $J = 10 \text{ W/m}^2$

13

Eigenschaften des Ultraschalls

Die Schwächung

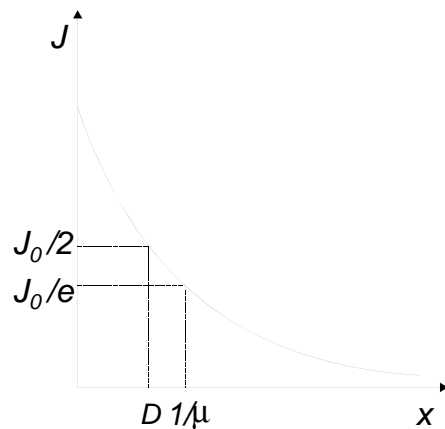
Schwächungsgesetz $J = J_0 \cdot e^{-\mu x}$

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

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

14

Die Schwächung



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

Dämpfung:

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

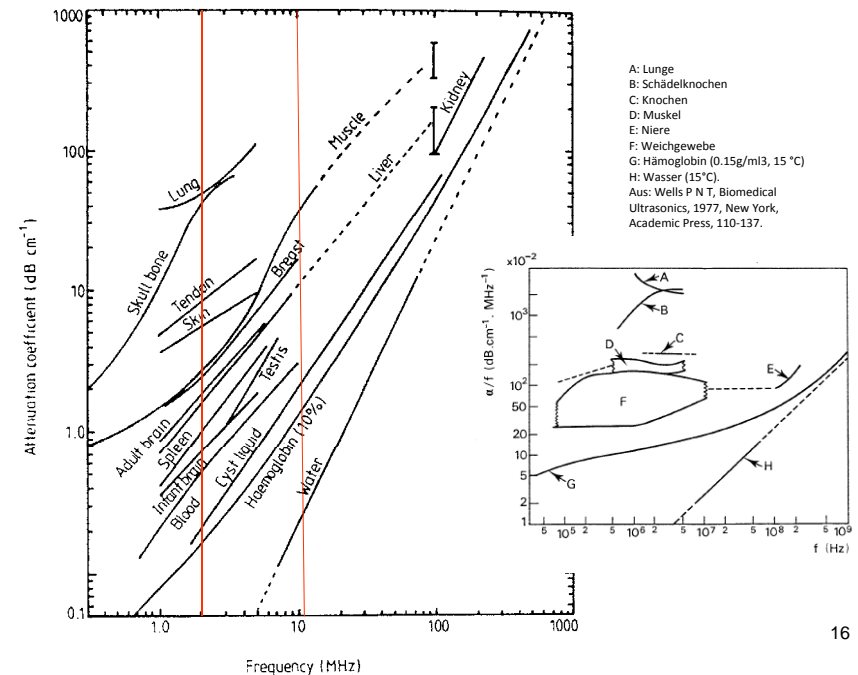
$$\alpha = 10 \cdot \mu \cdot x \cdot \lg e \text{ dB}$$

spezifische
Dämpfung:

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

Für weiche Gewebe:
~1dB/(cm·MHz)

15



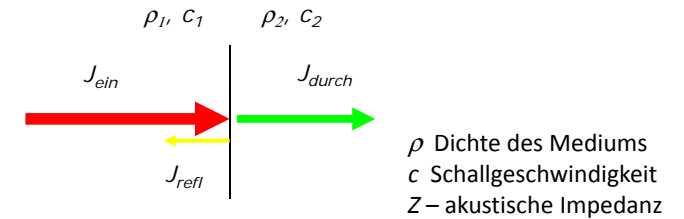
16

Frequenz (MHz)	Eindringtiefe (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 (inoperativ)
7,5-15	7-2	Brustdiagnostik
20	1,2	
21-24	1,1-0,9	Auge, Haut
40	0,6	Haut, Gefäße

17

Eigenschaften des Ultraschalls

Reflexion



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

18

Eigenschaften des Ultraschalls

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 Ultraschalldiagnostik

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, Parafinöl

vermindert den Impedanzunterschied zwischen Luft und Haut

19

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

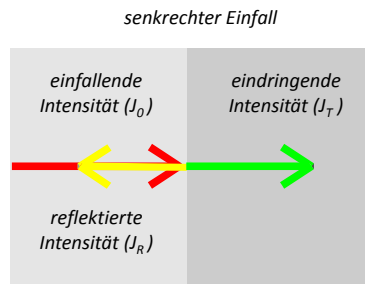


optimale Anpassung:

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

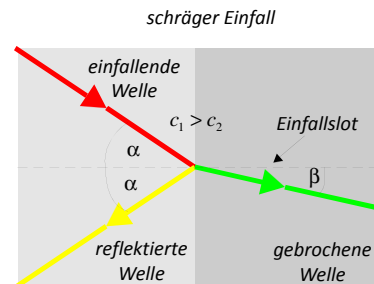
20

Phänomene an der Grenzflächen zweier Medien



$$J_0 = J_R + J_T$$

Reflexion und Transmission

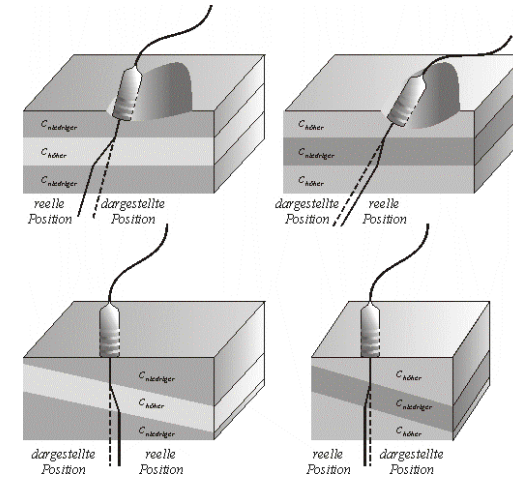


$$\frac{c_1}{c_2} = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta}$$

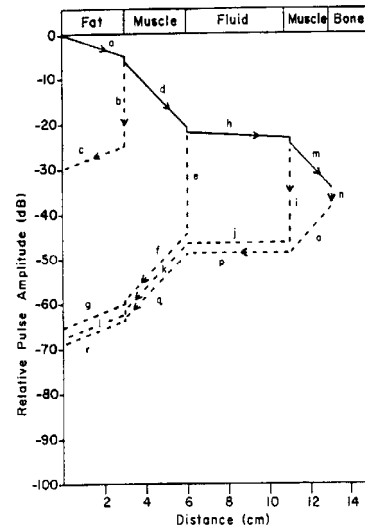
Snellius-Descartes

21

Schräger Einfall bzw. Schräge Grenzfläche



22



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

23

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)

24

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

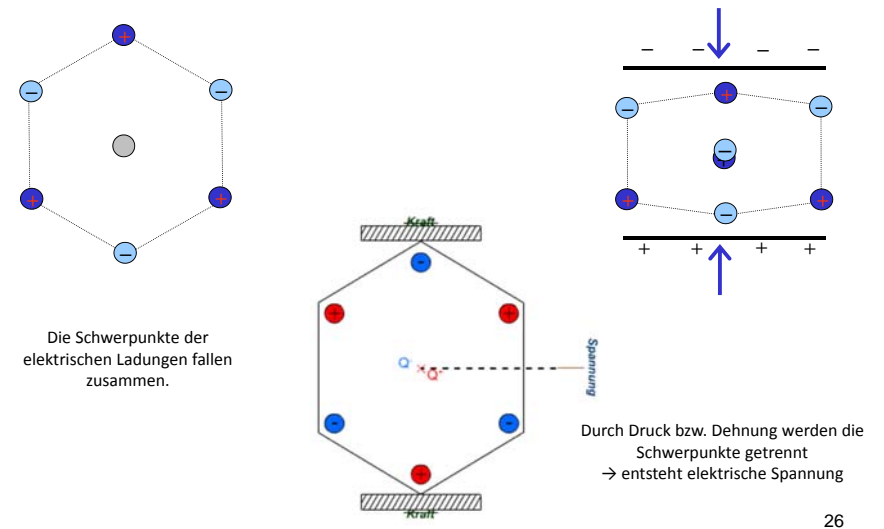
piezoelektrischer Effekt

elektrische Schwingung → mechanische Schwingung

reziproker piezoelektrischer Effekt

25

„Mechanismus“ des Piezoeffektes :



26

Wandler: Schwingquarz

elektrische Schwingung → mechanische Schwingung

reziproker piezoelektrischer Effekt

Schnittlage von piezoelektrischen Quarzplatten und Stäben

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

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

l, d in cm



27

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

28