

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

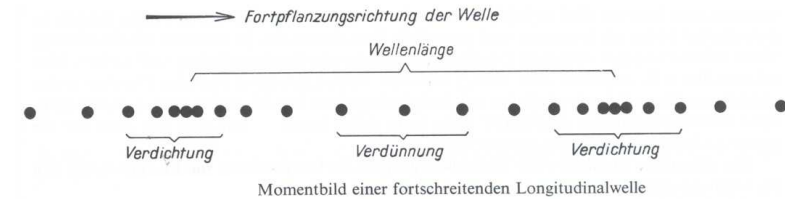
Einleitung



Längswellen (longitudinale Wellen):

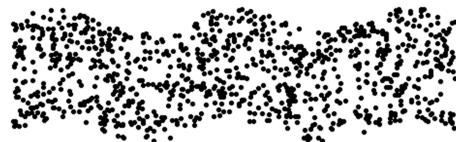
Verdichtungen und Verdünnungen (d.h. Druckschwankungen gegenüber dem Normaldruck) laufen über das Trägermedium.

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



2

Einleitung

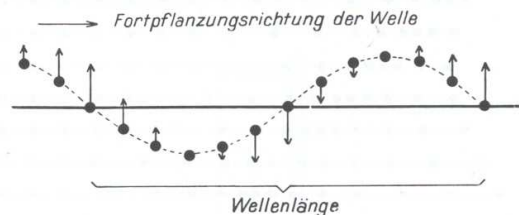


Querwellen (transversale Wellen):

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

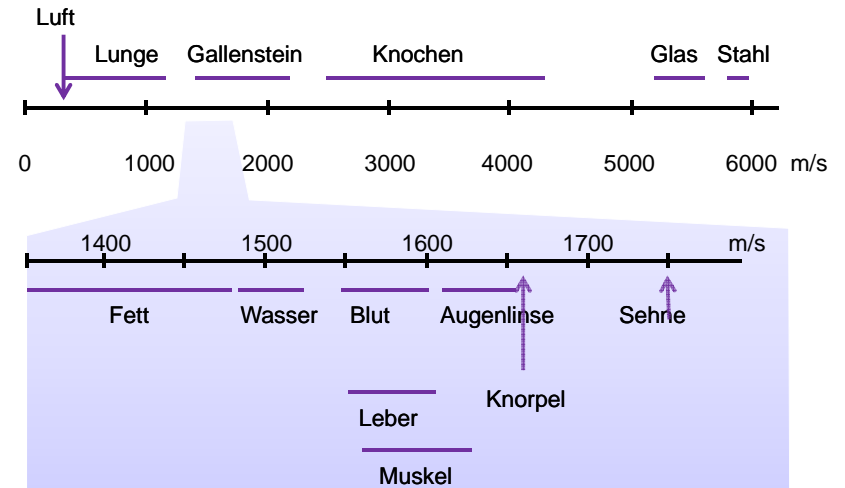
Frequenzbereiche der Schallwellen:

- 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

Ausbreitungsgeschwindigkeit $c \text{ (m/s)}$



6

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

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

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

10

Eigenschaften des Ultraschalls

Die Schwächung

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

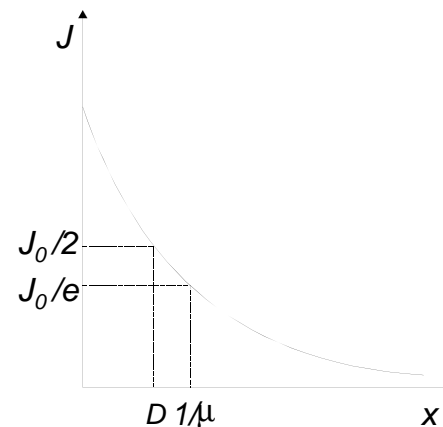
$$\mu = \frac{\ln 2}{D} = \frac{0,693}{D}$$

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

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:

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

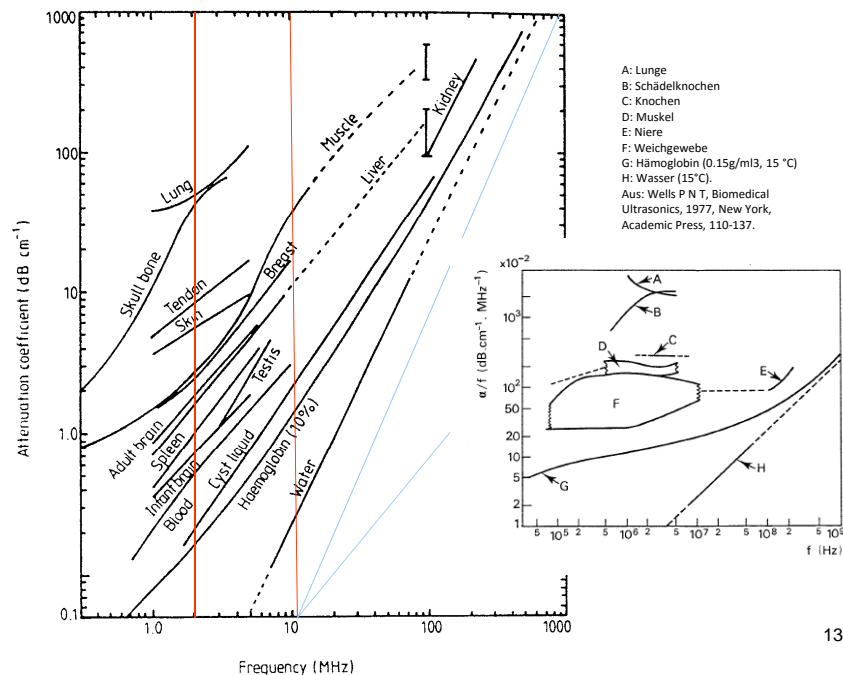
$$\alpha = 10 \cdot \mu \cdot x \cdot \lg e \text{ dB}$$

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:

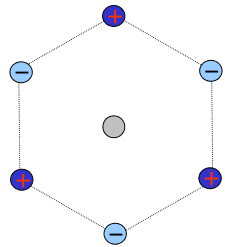
Bei Kristallen mit polaren Achsen (Turmalin, Quarz) treten durch Druck oder Dehnung in bestimmten Richtungen elektrische Ladungen an den Enden der polaren Achsen auf.

mechanische Schwingung → elektrische Schwingung
piezoelektrischer Effekt

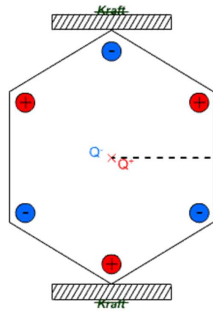
elektrische Schwingung → mechanische Schwingung
reziproker piezoelektrischer Effekt

16

„Mechanismus“ des Piezoeffektes :

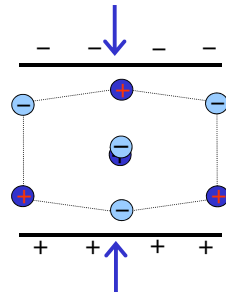


Die Schwerpunkte der elektrischen Ladungen fallen zusammen.



Spannung

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



17

Wandler: Schwingquarz

elektrische Schwingung → mechanische Schwingung

Bemerkungen:

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

Schwingquarz = Sender/Detektor

18

ULTRASCHALL IN DER MEDIZIN

1. DIAGNOSTIK
2. THERAPIE

1

1. DIAGNOSTIK

SONOGRAPHIE

- Ultraschalluntersuchung des Patienten

- Vorteile:**
1. Nahezu überall und jederzeit verfügbar (auch auf der Trage oder am Krankenbett)
 2. Biologisch unschädlich (keine Ionisation)
 3. beliebige Wiederholbarkeit
 4. ohne Kontrastmittel*

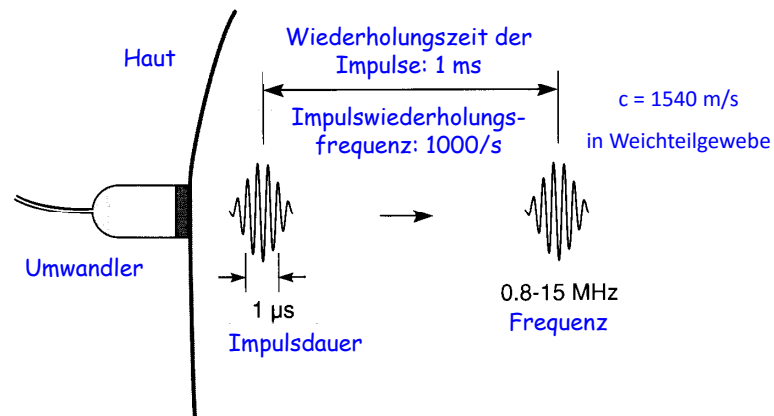
*Die Menge benötigten Kontrastmittels ist um das ca. 100fache kleiner als bei CT und MRT, die bislang bekannten Nebenwirkungen sind wesentlich seltener.

2

Charakteristiken der Ultraschall-Impulse

Transducer/Umwandler: Sender und Empfänger

Zeitliche Trennung → Impulse



3

Auflösungsgrenze, Auflösungsvermögen

Auflösungsgrenze: der kleinste Abstand zweier noch getrennt detektierbaren Punkten

Auflösungsvermögen: Reziprokwert der Auflösungsgrenze

Die axiale Auflösungsgrenze hängt von der Impulslänge.

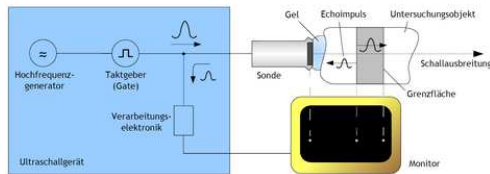
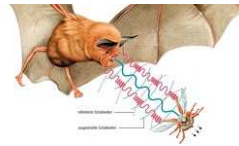
Die Impulslänge ist indirekt proportional zur Frequenz.

Die laterale Auflösungsgrenze hängt von dem Durchmesser des Ultraschallbündels.

4

1.1 SONOGRAPHIE

Prinzip des Echoimpulsverfahrens



$$z = c \cdot t / 2$$

z - Abstand der Grenzfläche vom Schallkopf

t - Laufzeit

c - Schallgeschwindigkeit

$A \sim R$

5

Bemerkungen:

1. Die Reflexion tritt nur an Grenzübergängen auf, die grösser als die Wellenlänge sind.
2. Sind Strukturen ähnlich gross oder kleiner als die Wellenlänge, so wird ein Teil der Intensität gestreut.
3. Je höher die Ultraschallfrequenz, desto stärker ist die Absorption im Gewebe und desto besser ist die Ortsauflösung.
4. Die Eindringtiefe und Auflösungsvermögen hängt von der Ultraschallfrequenz ab.
5. Das Verfahren besitzt in tief gelegenen Geweben eine geringere Raumaufklärung als die CT und MRT.

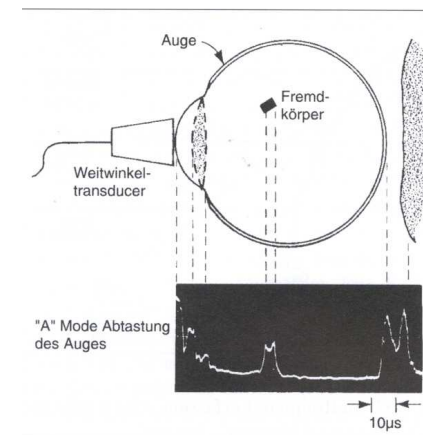
6

Bemerkungen: ad 3 und 4:

Sendefrequenz (MHz)	Wellenlänge (mm)	Eindringtiefe (hin und rück) (cm)	Ortsauflösung (mm)	
			laterale	axiale
2	0,78	25	3	0,8
3,5	0,44	14	1,7	0,5
5	0,31	10	1,2	0,35
7,5	0,21	6,7	0,8	0,25
10	0,16	5	0,6	0,2
15	0,1	3,3	0,4	0,15

7

Das A-Mode Verfahren

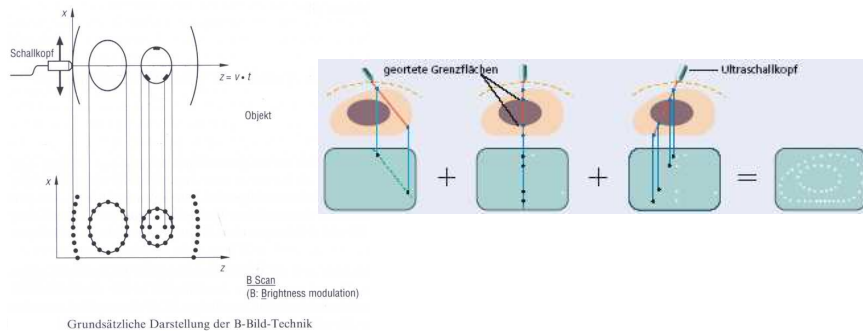


Ultraschallamplitudenmessung zur Bestimmung der Lage eines Fremdkörpers aus der Laufzeit des reflektierten Ultraschallsignals

8

Das B-Bild Verfahren

Man kodiert die Echoamplitude als Intensität oder Grauwert des Kathodenstrahls.



Der Schallstrahl wird nach jedem Sendeimpuls in der darzustellenden Ebene Senkrecht zur Körperoberfläche verschoben.

9

Das B-Bild Verfahren



2D-Sonogramm eines Menschenfetuses von neun Woche

10

Das B-Bild Verfahren

- Der Schallkopf wurde ursprünglich *manuell* auf der Körperfläche bewegt.
- Wird der Wandler gezielt bewegt, entsteht ein 2D Schnittbild.

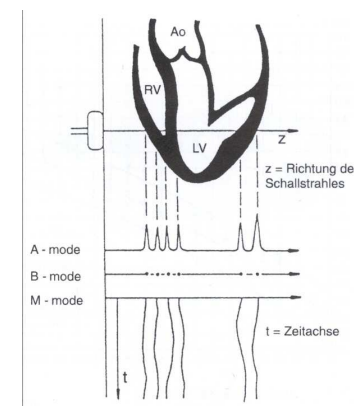
Aufnahme von Schnittbildern (Scan):

Regelmässige *Abtastung* einer Ebene der zu untersuchenden Körperregion mit Ultraschallimpulsen mit einem bestimmten *Scanformat*.

11

Das M-Mode Verfahren

Man schreibt die zeitlich aufeinanderfolgenden Echozeilen nebeneinander.



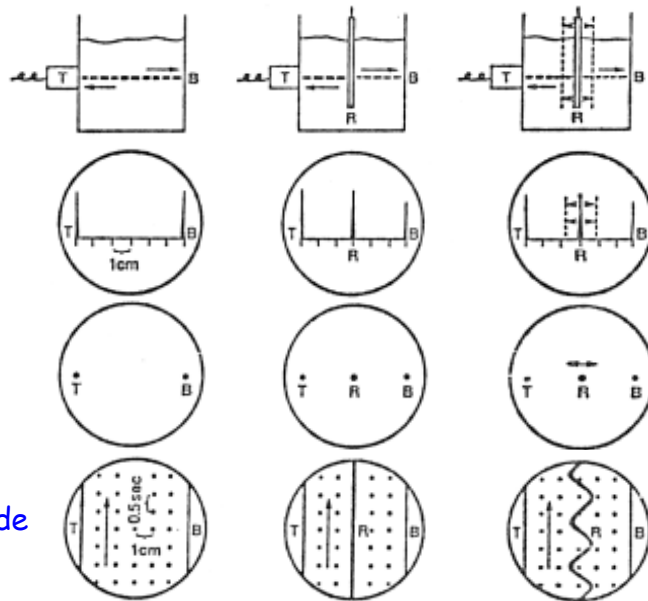
Bewegungsablauf, Amplitude, Geschwindigkeit der Bewegung anatomischer Strukturen lassen sich genau verfolgen.

12

A -
Mode

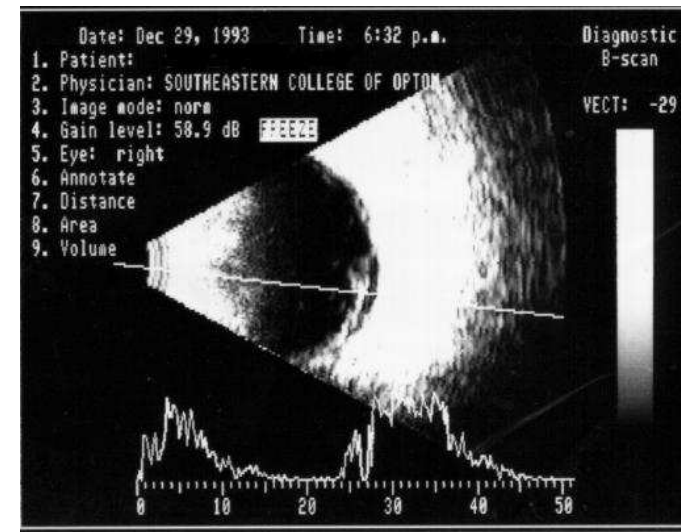
B - Mode

TM - Mode



13

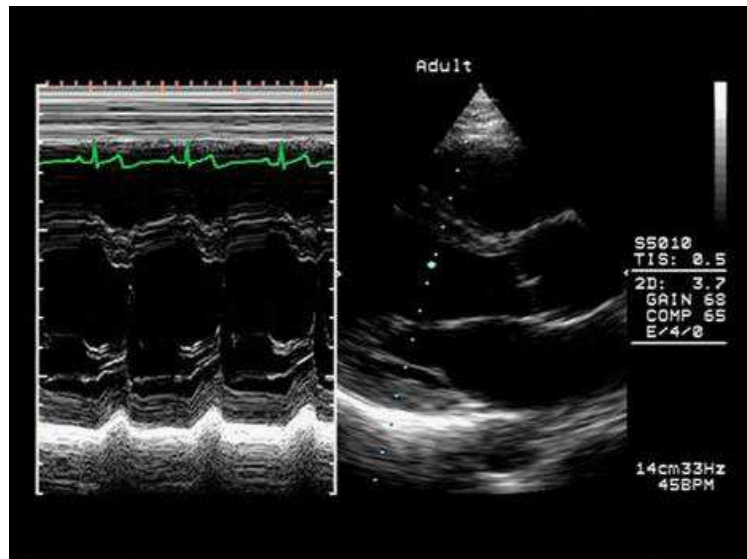
Zweidimensionales B-Bild und A-Bild



14

TM-Bild

B-Bild

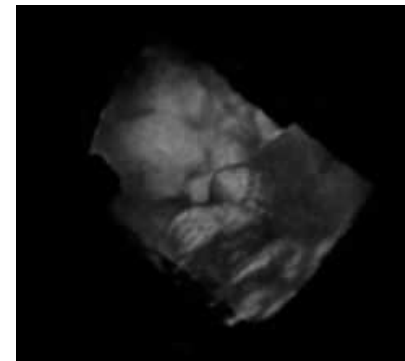


15

Mehrdimensionale Anwendung

3D-Ultraschall: produziert räumliche Standbilder

4D-Ultraschall (Live-3D): 3D plus zeitliche Dimension



16



Das High-End-Ultraschallsystem Acuson S3000 von Siemens

29. November 2011

Das Acuson S3000* ist Siemens' neues Ultraschallsystem der Premiumklasse. In dem System ist erstmals die Bildgebungstechnologie eSie Fusion** integriert. Sie ermöglicht eine automatische Überlagerung von Echtzeit-Ultraschallaufnahmen mit bereits aufgenommenen dreidimensionalen Computertomografie (CT)-Aufnahmen per Mausclick direkt am Gerät. Dieses Bild zeigt die Überlagerung einer CT- und Ultraschallaufnahme, um den Verdacht einer Aorten-Endoleak zu bewerten.

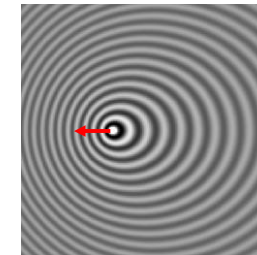
17

1.1 SONOGRAPHIE

Der Doppler-Effekt (Ch. DOPPLER 1803 - 1853)

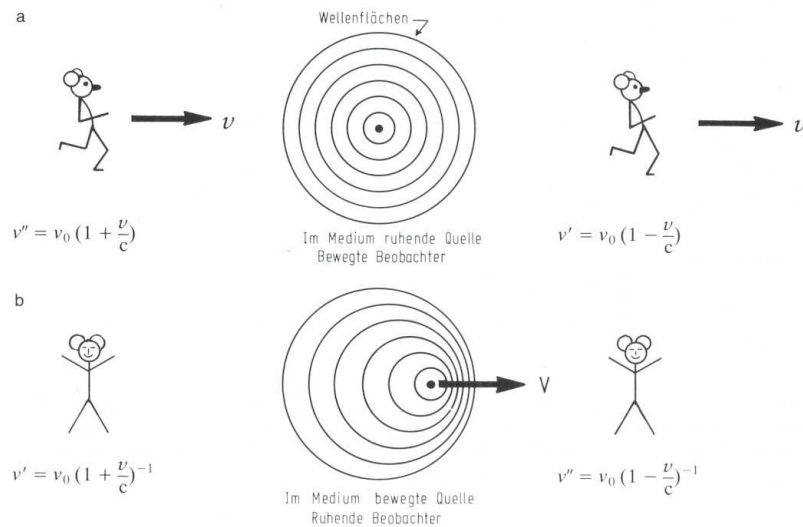
Das Phänomen, dass der sich bewegende Beobachter eine andere Frequenz registriert als der ruhende Beobachter, bezeichnen wir als Doppler-Effekt.

Änderungen treten ebenso auf, wenn der Beobachter ruht und die Quelle sich bewegt.



18

Der Doppler-Effekt



19

Der Doppler-Effekt

1. Bewegter Empfänger, ruhender Sender:

$$f = \frac{c \pm v_E}{\lambda} = f_0 \cdot \frac{c \pm v_E}{c} = f_0 \cdot \left(1 \pm \frac{v_E}{c}\right)$$

f	wahrgenommene Frequenz
f_0	Frequenz des Sendesignals
v_E	Geschwindigkeit der Bewegung des Empfängers
c	Schallgeschwindigkeit
+	beim Annähern
-	beim Entfernen

20

Der Doppler-Effekt

2. Bewegter Sender, ruhender Empfänger:

$$f = \frac{c}{\lambda_B} = \frac{\lambda \cdot f_0}{\lambda \mp \frac{v_s}{f_0}} = \frac{\lambda \cdot f_0}{\lambda \mp \lambda \frac{v_s}{c}} = \frac{f_0}{\left(1 \mp \frac{v_s}{c}\right)}$$

f	wahrgenommene Frequenz
f_0	Frequenz des Sendesignals
v_s	Geschwindigkeit der Bewegung des Senders
c	Schallgeschwindigkeit
-	beim Annähern
+	beim Entfernen

21

Der Doppler-Effekt

wenn: $v \ll c$

v
 c

Geschwindigkeit der Bewegung
Schallgeschwindigkeit

$$f = f_0 \cdot \left(1 \pm \frac{v}{c}\right)$$

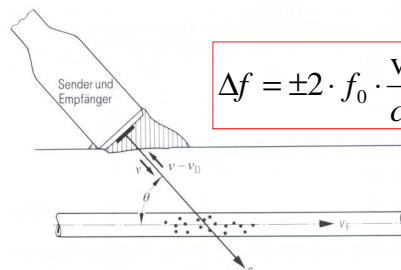
$$f - f_0 = \pm f_0 \cdot \frac{v}{c}$$

$$\Delta f = f_D = \pm f_0 \cdot \frac{v}{c}$$

22

Doppler-Sonographie (CW - Continuous Wave)

- Blutströmungsgeschwindigkeit in Arterien, in Venen
- fetale Herzschläge und fetaler Blutfluss



$$\Delta f = \pm 2 \cdot f_0 \cdot \frac{v}{c} \cdot \cos \Theta$$

zB. $f = 8 \text{ MHz}$
 $v = 12 \text{ cm/s}$
 $c = 1600 \text{ m/s}$
 $\Theta = 34^\circ < 40^\circ$
 $\Rightarrow f_D = 1 \text{ kHz}$
 (Schwebung)

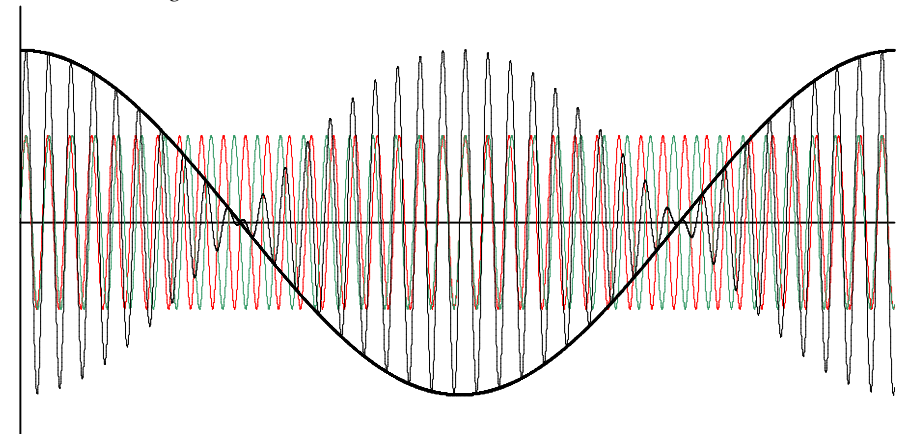
Ultraschall-Doppler-Effekt zur Messung von Strömungsgeschwindigkeiten

23

Schwebung

$$f_{\text{rot}} \geq f_{\text{grün}}$$

Die Frequenz der Schwebung ist gleich der Differenz der Frequenzen von interferierenden Wellen

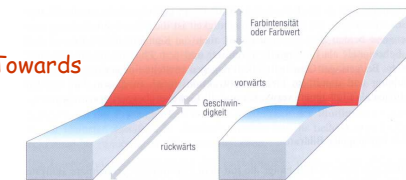


<http://www.leifiphysik.de/themenbereiche/akustische-wellen>

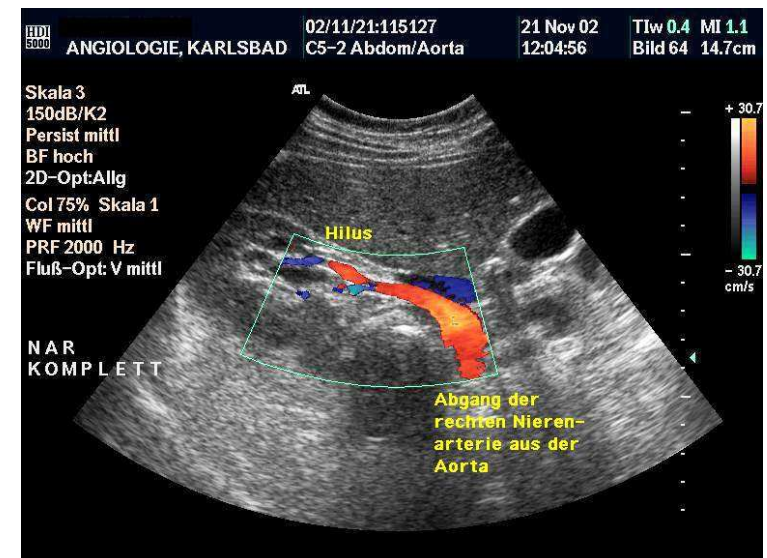
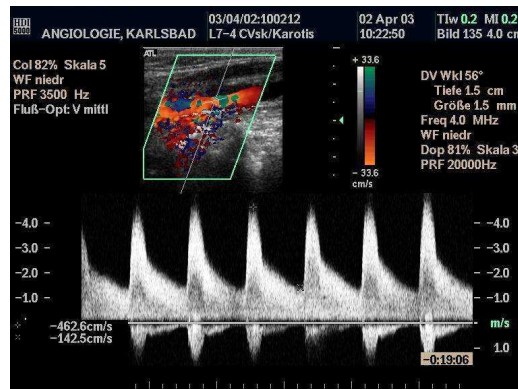
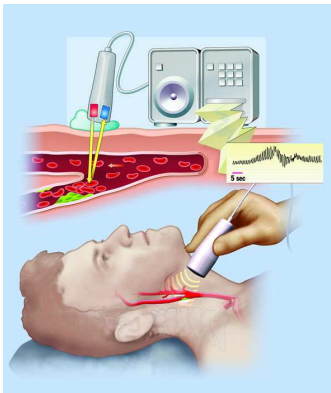
24

- 25

BART: Blue Away Red Towards

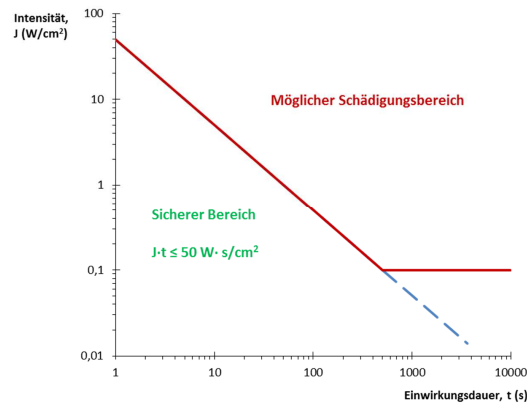


26



28

SICHERHEITSASPEKTE



Schädigungsgrenze für diagnostisch angewendeten Ultraschall nach
Nyborg, W.L. (1965): Acoustic Streaming, Vol. 2B, Academic Press, New York

29

2. THERAPIE

Die **Ultraschalltherapie** beruht auf der Wärme- und mechanischen (Mikromassage-) Wirkung des Ultraschalls.

- ✓ Kleinere Intensität: Mikromassage
- ✓ Größere Intensität: Zerstört Gewebe, Moleküle; (entstehen freie Radikale, DNA-Brechungen)
 - ✓ Kavitation (Entstehung von Hohlräumen bzw. Gasbläschen)

30

2. THERAPIE

Ultraschalltherapie: Thumorthherapie (Hyperthermie)
 physikalischen Therapie (z.B. Tennis-Ellbogen)
 Zahnsteinentfernung

Übliche Werte:

Betriebsfrequenz: 800 kHz,

Maximalintensität: einige W/cm².

Ultraphonophorese-Therapie - eine Behandlung, wobei **Medikamente** mit Hilfe der Ultraschallenergie (dem Schalldruck) in den Körper gebracht werden

31