

Vorlesung 2

Karim Kouz

SS2017 2. Semester Biophysik

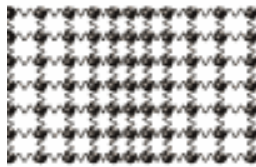
(I) Ultraschall & Sonographie

Karim Kouz

SS2017 2. Semester Biophysik

Wiederholung: Wellen

- Eine sich räumlich ausbreitende Veränderung oder Schwingung einer orts- und zeitabhängigen Größe wird als Welle bezeichnet
- Es gibt drei verschiedene Arten von Wellen:
 - Mechanische Wellen
 - Elektromagnetische Wellen
 - Materiewellen
- Zudem unterscheidet man zwischen Longitudinal- und Transversalwellen



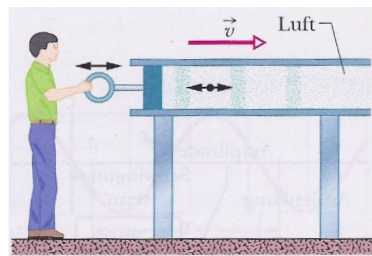
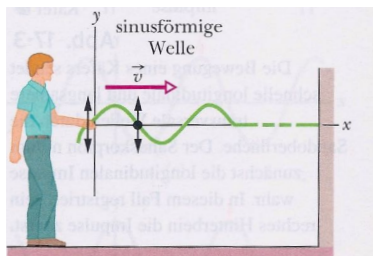
Karim Kouz, Biophysik SS2017

Quelle: <http://www.kitphysik.de>

3

Longitudinal- und Transversalwellen

- Abhängig davon, wie die Auslenkungsrichtung (Schwingungsrichtung) und die Wellenausbreitungsrichtung zueinander stehen, unterscheidet man Longitudinal- und Transversalwellen
- **T**ransversalwellen: Schwingungsrichtung senkrecht zur Ausbreitungsrichtung
- **L**ongitudinalwellen: Schwingungsrichtung parallel zur Ausbreitungsrichtung



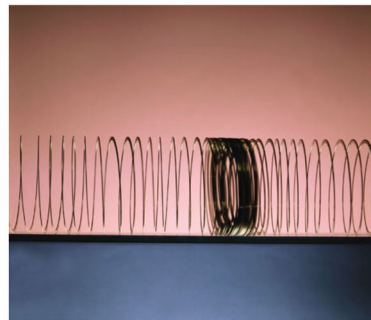
Karim Kouz, Biophysik SS2017

Quelle: Physik, Halliday, Resnick, Walker, WILEY-VCH

4

Longitudinal- und Transversalwellen

- **T**ransversalwellen: Schwingungsrichtung senkrecht zur Ausbreitungsrichtung
- **L**ongitudinalwellen: Schwingungsrichtung parallel zur Ausbreitungsrichtung



Karim Kouz, Biophysik SS2017

Quelle: Tjelt, Paul A., Morca, Gene, Kommer, Christoph [2018]: Physik für Wissenschaftler und Ingenieure, 7. Aufl. hg. v. Jerry Wagner, Springer Spektrum

5

Frequenzbereiche der Schallwellen

- Schallwellen sind mechanische Wellen und können auf Grundlage des menschlichen Hörens in vier Bereiche eingeteilt werden:
 - Infraschall: $< 20 \text{ Hz}$
 - Hörschall: $20 - 20000 \text{ Hz}$
 - Ultraschall: $20000 - 10^9 \text{ Hz}$
 - Hyperschall: $> 10^9 \text{ Hz}$

Karim Kouz, Biophysik SS2017

6

Ultraschall und seine Eigenschaften

- Mechanische Welle oder Schwingung
- Ausbreitung der Welle ist daher an ein Medium gebunden
- Mechanische Wellen können sowohl Longitudinal- als auch Transversalwellen beschreiben:
 - In Festkörpern: Longitudinal- und Transversalwellen
 - In Flüssigkeiten und Gasen: Nur Longitudinalwellen

- Frequenzbereich: 20 kHz – 1 GHz

- Frequenzen in den bildgebenden Verfahren: 2 – 10 MHz

- Es gilt: $c = \lambda \cdot f = \frac{\lambda}{T}$

- Durchschnittliche Schallgeschwindigkeit in Weichteilgewebe: $c = 1540 \frac{\text{m}}{\text{s}}$

Beachte:

- 1.: c ist nicht die Lichtgeschwindigkeit
- 2.: Die durchschnittliche Schallgeschwindigkeit gilt für Weichteilgewebe und nicht für Knochen, Gallensteine,...

Karim Kouz, Biophysik SS2017

7

Kompressibilität (κ)

- Die Kompressibilität gibt das Verhältnis der relativen Volumenänderung zur Druckänderung an (d.h. sie gibt die Veränderung eines Volumens aufgrund einer Druckänderung an):

$$\kappa = \frac{-\frac{\Delta V}{V}}{\Delta P}$$

- Sie ist ein Maß dafür, wie leicht sich ein Stoff zusammendrücken lässt
- Je leichter sich ein Medium zusammendrücken lässt, desto größer ist seine Kompressibilität und desto größere Deformationen werden durch einen gegebenen Druck hervorgerufen

Karim Kouz, Biophysik SS2017

8

Ausbreitungsgeschwindigkeit (c)

- Die Ausbreitungsgeschwindigkeit ist:
 - NICHT abhängig von der Frequenz der Wellen, d.h., dass sie z.B. in Fettgewebe immer die gleiche ist, unabhängig von der verwendeten Frequenz
 - Abhängig von der Dichte des jeweiligen Materials
 - Abhängig von der Kompressibilität des Materials
- Dichte (ρ): Je größer ρ , desto kleiner ist c
- Kompressibilität (κ): Je größer κ , desto kleiner ist c
- Es gilt:

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

Beachte: Gase haben viel geringere Dichten als Festkörper (um 3 Größenordnungen kleiner), jedoch ist die Kompressibilität von Gasen um mehr als 3 Größenordnungen größer als die von Festkörpern. Insgesamt ist daher c in Festkörpern größer als in Gasen.



Quelle: <http://heirich11.wordpress.com/2011/07/12/eine-neue-oase-fur-die-sime/>

9

Karim Kouz, Biophysik SS2017

Akustische Impedanz (Z)

- Als akustische Impedanz werden alle Widerstände zusammengefasst, die der Ausbreitung von Schwingungen in einem bestimmten Umfeld entgegenwirken:

$$Z = \frac{P}{v}$$

P : Druck
 v : Teilchengeschwindigkeit
 c : Ausbreitungsgeschwindigkeit der Welle

- Sie beschreibt also den Widerstand, den ein Medium einer Schallwelle entgegensetzt (d.h., wie sehr ein Medium dem widersteht, dass seine Teilchen in Bewegung gebracht werden)
- Zudem gilt:

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

- Z ist also auch ein Materialparameter, da Z abhängig von zwei anderen Materialparametern ist

10

Karim Kouz, Biophysik SS2017

Schallintensität (J)

- Für die Schallintensität gilt folgender Zusammenhang:

$$J = \frac{1}{2 \cdot Z} \cdot \Delta P_{max}^2 = \frac{1}{Z} \cdot \Delta P_{eff}^2$$

- D.h. zu einer gegebenen Intensität J gehört eine bestimmte Druckschwankung ΔP
- Größenordnungen:
 - Diagnostik: $J = 100 \frac{W}{m^2}$
 - Therapie: $J = 25000 \frac{W}{m^2}$

Druckschwankungen können bei der Anwendung von Ultraschall zu Gewebeschädigungen führen.

Karim Kouz, Biophysik SS2017

11

Gewebeschädigungen

- Aufgrund der Gefährlichkeit von Druckschwankungen in Geweben sind für die medizinische Anwendung von Ultraschall Intensitätsgrenzwerte vorgeschrieben
- Die mechanische Beanspruchung reicht aus, um Zellkontakte aufzulösen und Hohlräume zu schaffen (Kavitation)
- Fallen diese Hohlräume wieder zusammen (Annihilation), so werden große Energiemengen freigesetzt, die u.a. folgende Effekte zur Folge haben:
 - Bildung freier Radikale (zytotoxisch)
 - Starke Erwärmung

Karim Kouz, Biophysik SS2017

12

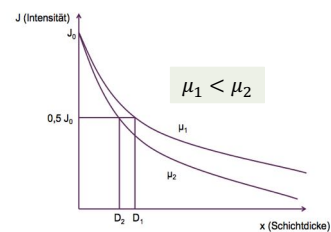
Intensitätsverluste

- Während der Ausbreitung des Ultraschalls tritt durch Reibung ein Energieverlust auf, wodurch die Strahlungsintensität abnimmt
- Dabei folgt die Schwächung dem Schwächungsgesetz:

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

- μ ist abhängig von der Frequenz – im Diagnostikbereich gilt in guter Näherung: $\mu \sim f$
- Zudem gilt für die Halbwertsdicke:

$$D = \frac{\ln 2}{\mu}$$



Karim Kouz, Biophysik SS2017

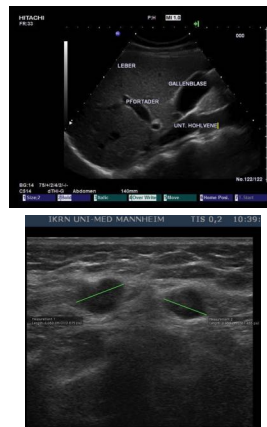
Quelle: Karim Kouz (03/2015)

13

Frequenzabhängigkeiten

- μ ist abhängig von der Frequenz – im Diagnostikbereich gilt in guter Näherung: $\mu \sim f$

- Niedrige Frequenzen:
 - Geringe Absorption
 - Hohe Eindringtiefe
 - Schlechtere räumliche Auflösung
- Hohe Frequenzen:
 - Starke Absorption
 - Niedrige Eindringtiefe
 - Bessere räumliche Auflösung



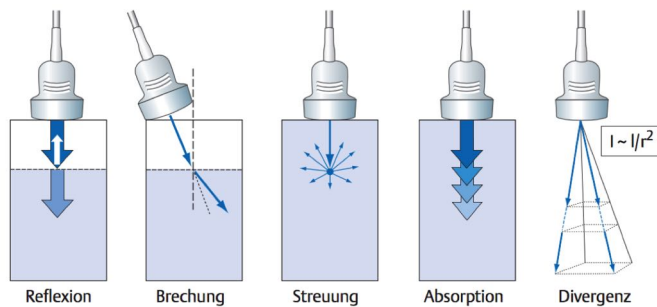
Karim Kouz, Biophysik SS2017

Quelle: <http://www.gastroenterologie-baellkousgen.de/ultraschall>, http://www.umm.uni-heidelberg.de/nst/fur/klinik_mamma_sono.html

14

Intensitätsverluste

- Neben der Schwächung durch Absorption gibt es noch andere Ursachen der Schallabschwächung
- Maßgeblich an der Bildentstehung beteiligt sind dabei die Schwächung durch Reflexion und durch Absorption (unterschiedliche Gewebe schwächen den US unterschiedlich stark)



Streuung tritt v.a. auf, wenn Strukturen gleich groß oder kleiner sind als die Wellenlänge des US. Reflexion tritt nur an Grenzübergängen auf, die größer sind als die Wellenlänge des US.

Karim Kouz, Biophysik SS2017

Quelle: Duale Reihe Radiologie 3. Auflage; M. Reiser, F.-P. Kuhn; Thieme Verlag

15

Dämpfung (α)

- In der Praxis wird zur Beschreibung der Intensitätsschwächung die Dämpfung benutzt, für die gilt:

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

Der logarithmische Ausdruck ist dimensionslos. Trotzdem hat die Dämpfung eine Einheit – das Dezibel.

- Beispielrechnung: Eine tausendfache Abnahme der Schallintensität aufgrund von Schwächung entspricht einer Dämpfung von $\alpha = 10 \cdot \lg \frac{J_0}{\frac{1}{1000} J_0} = 10 \cdot \lg 1000 = 30 \text{ dB}$

Karim Kouz, Biophysik SS2017

16

Spezifische Dämpfung

- Die Dämpfung lässt sich wie folgt ausdrücken:

$$\alpha = 10 \cdot \mu \cdot x \cdot \lg e$$

- Daher gilt:

- Bei einer gegebenen Schichtdicke ist α proportional zu μ
- Im diagnostischen Bereich ist daher (aufgrund der Abhängigkeit von μ und f) α proportional zur Frequenz f

- Für die spezifische Dämpfung gilt:

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

Die spezifische Dämpfung ist frequenzunabhängig, ein charakteristischer Materialparameter und für Weichteile $1 \frac{\text{dB}}{\text{cm} \cdot \text{MHz}}$.

Karim Kouz, Biophysik SS2017

17

Reflexionsvermögen (R)

- Der menschliche Körper ist keine homogene Masse – er besteht aus vielen verschiedenen Geweben mit unterschiedlichen akustischen Impedanzen
- Analog zur Optik treten Phänomene wie Reflexion und Brechung auch beim Ultraschall an der Grenzfläche von zwei Medien mit unterschiedlichen akustischen Impedanzen auf
- Das Funktionsprinzip der Sonographie basiert auf der Reflexion des Ultraschalls
- Die Größe der Reflexion kann durch das Reflexionsvermögen beschrieben werden:

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

Da die Reflexion bei der Sonographie die entscheidende Größe ist, muss diese immer gewährleistet sein. Sind zwei aneinander liegende Gewebe im Bezug auf ihre akustische Impedanz sehr ähnlich, so wird der Ultraschall nicht reflektiert und die (anatomische) Grenze wird nicht dargestellt. Ist die akustische Impedanz eines Gewebes viel größer, als die des anderen, so tritt der Fall $R \approx 1$ ein (Totalreflexion).

Karim Kouz, Biophysik SS2017

18

Kopplungsmedien

- An der Grenzfläche Luft – Gewebe tritt ein Problem auf:

- $Z_{Luft} = 430 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}$
- $Z_{Gewebe} = 1,63 \cdot 10^6 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}$
- $R = \left(\frac{430 - 1,63 \cdot 10^6}{430 + 1,63 \cdot 10^6} \right)^2 \approx 0,999$



- Durch die Verwendung eines Kopplungsmediums zwischen Ultraschallkopf und Gewebeoberfläche soll die dort stattfindende Reflexion reduziert werden
- Das Kopplungsmedium muss an die akustischen Impedanzen beider Grenzmedien angepasst werden (Luft & Weichteile) und lässt sich durch folgende Gleichung auswählen:

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

Karim Kouz, Biophysik SS2017

Quelle: http://www.dienchen.de/images/fotolia_32724060_xs_460.jpg

19

Klinisch bedeutende Grenzflächen

- Luft – Gewebe → Ultraschallgel
- Gewebe – Knochen → Keine Innendarstellung des Knochens; Knochenschatten
- Weichteile – Luft (Darm) → Keine Ansicht der Gasräume; Luftschatten
- Weichteile – Festkörper (z.B. Gallensteine) → Steinschatten



Karim Kouz, Biophysik SS2017

Quelle: <http://de.wikipedia.org/wiki/Schallschatten>

20

Tiefenabhängigkeit der Signalstärke

- Je tiefer eine Struktur liegt, desto länger ist der Weg, den der reflektierte Ultraschall zurücklegen muss
- Je länger der Weg ist, desto stärker wird das Signal geschwächt
- Anatomisch gleiche Strukturen erscheinen aufgrund der Tiefenabhängigkeit unterschiedlich
- Lösung:
 - TGC (Time Gain Compensation/zeitabhängige Verstärkung)
 - DGC (Depth Gain Compensation/tiefenabhängige Verstärkung)
- Fazit:
 - Signale, die aus tieferen Schichten kommen (DGC) bzw. eine längere Zeit bis zum Detektor brauchen (TGC), werden verstärkt
 - Abhängig von der Tiefe/Zeit wird das Signal immer stärker verstärkt



Karim Kouz, Biophysik SS2017

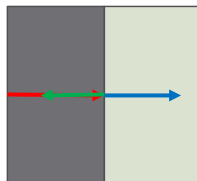
Quelle: <http://www.sonotrend.de>

21

Schräger Einfall/schräge Grenzfläche

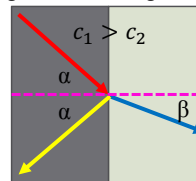
- Die Ultraschallwelle kann entweder senkrecht oder in einem von 0° verschiedenen Einfallswinkel auf eine Oberfläche treffen

Senkrechter Einfall



$$J_{\text{einfallend}} = J_{\text{reflektiert}} + J_{\text{eingedrungen}}$$

Schräger Einfall/schräge Grenzfläche



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

Karim Kouz, Biophysik SS2017

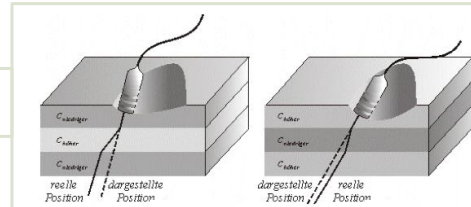
Quelle: Karim Kouz (03/2017)

22

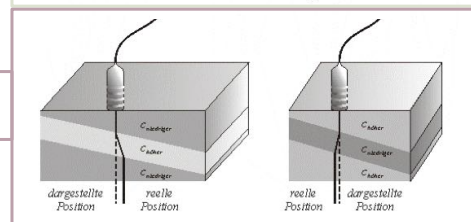
Schräger Einfall/schräge Grenzfläche

- Der schräge Einfall bzw. das Auftreffen des Ultraschalls auf schräge Grenzflächen führt zu Bildverzerrungen und der nicht wahrheitsgemäßen Abbildung von Strukturen
- Ohne Referenzwerte bzw. Kalibrationen kann die Lage von Strukturen nicht eindeutig bestimmt werden

Schräger Einfall



Schräge Grenzfläche



Karim Kouz, Biophysik SS2017

Quelle: Biophysik für Mediziner, Damjanovich, Fidy, Medicina Verlag

23

Zusammenfassung

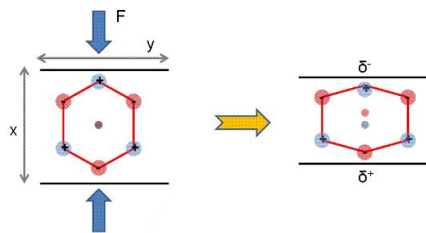
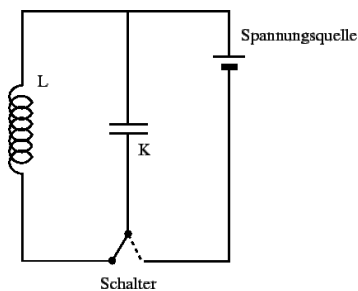
- Die Sonographie macht Gebrauch von der Auflösung kleiner Unterschiede der akustischen Impedanzen der verschiedenen Gewebe
- Kleine Unterschiede bedeuten nur sehr kleine Reflektanzwerte – die Signale sind also relativ schwach, was zu Detektionsproblemen führt
- Durch Erhöhung der Intensität erhält man stärkere Echosignale vs. Gewebeschädigung
- Ultraschallgel ermöglicht dem Ultraschall das Eindringen in das Gewebe
- Niedrige Frequenzen – geringe Absorption, hohe Eindringtiefe, aber schlechtere räumliche Auflösung
- Hohe Frequenzen – starke Absorption, niedrige Eindringtiefe, aber bessere räumliche Auflösung
- Je tiefer die Reflexionsschicht liegt, desto schwächer ist das Signal
- Ein aus der Tiefe kommendes Signal wird bei gleichen Reflexionsverhältnissen im Vergleich zu einem oberflächlichen Signal schwächer sein

Karim Kouz, Biophysik SS2017

24

Erzeugung des Ultraschalls

- Die Erzeugung von Ultraschall beruht auf zwei physikalischen Prinzipien:
 - LC-Kreis (Schwingkreis) zur Erzeugung sinusförmiger Spannungen
 - Inverser** (reziproker) piezoelektrischer Effekt zur Erzeugung der mechanischen Welle



Karim Kouz, Biophysik SS2017

Quelle: http://www.icp.uni-stuttgart.de/~hilfer/lehre/100-online/skriptum/html_book00/nodes4.html,
http://daten.didaktikchemie.uni-bayreuth.de/umw/piezo/piezo_effekt.htm

25

LC-Kreis

- Der LC-Kreis besteht aus einer Reihenschaltung mit einer Spule und einem Kondensator:



- Er wird auch als Schwingkreis bezeichnet, da er elektromagnetische Schwingungen erzeugen kann

Karim Kouz, Biophysik SS2017

26

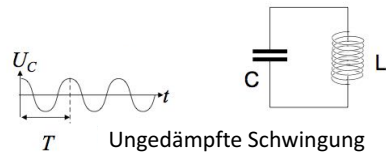
LC-Kreis

- Die Frequenz, mit der der Schwingkreis schwingt, lässt sich folgendermaßen bestimmen:

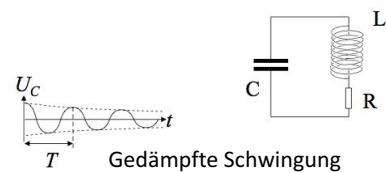
$$f = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C}}$$

L: Induktivität (Henry/H)

- In einem idealen Schwingkreis ohne jeglichen Wirkwiderstand kommt es zu keinen Energieverlusten, sodass die Schwingung nie zum Stillstand kommt = ungedämpfte Schwingung
- Dennoch gibt es immer Energieverluste, die z.B. aufgrund des Eigenwiderstandes der Leiter auftreten, sodass die Schwingung eine gedämpfte Schwingung ist



Ungedämpfte Schwingung



Gedämpfte Schwingung

Karim Kouz, Biophysik SS2017

27

Piezelektrischer Effekt

- Direkter Piezoeffekt:** Beschreibt das Auftreten einer elektrischen Spannung (Ladungstrennung) an speziellen Festkörpern (piezoelektrische Kristalle), wenn sie elastisch verformt werden
- Die entstehende Spannung ist proportional zu der Deformation des Festkörpers:

$$U = \delta \cdot \Delta x$$

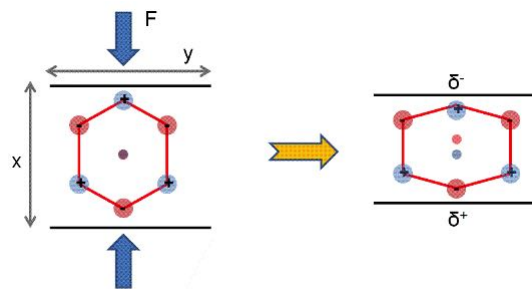
- Erscheinung des Piezoeffekts kann sich auch umgekehrt abspielen: Beim Anlegen einer elektrischen Spannung an den Festkörper ändert sich die Dicke des Festkörpers = **inverser (reziproker) Piezoeffekt**
- Verwendung in der Sonographie: Wird eine Wechselspannung mit einer bestimmten Frequenz an den Festkörper angelegt, so ändert dieser **mit der Frequenz der Wechselspannung** seine Dicke – fällt diese Frequenz in den Ultraschallbereich, so emittiert der Festkörper Ultraschallwellen

Karim Kouz, Biophysik SS2017

28

Piezoelektrischer Effekt

- Die gerichtete Verformung des Materials ruft eine Verschiebung der Ladungsschwerpunkte innerhalb des Kristalls hervor
- Aufsummiert führt diese Ladungsverschiebung zu einer makroskopisch messbaren Spannung



Karim Kouz, Biophysik SS2017

Quelle: http://daten.didaktikchemie.uni-bayreuth.de/umap/piezo/piezo_effekt.htm

29

Detektion des Ultraschalls

- Der Piezoeffekt wird sowohl zur Erzeugung als auch zur Detektion des Ultraschalls verwendet
- Aus dem Körper reflektierte Ultraschallwellen treffen auf den Piezokristall und deformieren diesen
- Die dadurch entstehende Spannung wird in ein Bild umgesetzt
- Der Piezokristall nimmt also zwei Funktionen gleichzeitig, jedoch zeitversetzt, ein (Transducer-Funktion):
 - Erzeugung des Ultraschalls
 - Detektion des Ultraschalls

Karim Kouz, Biophysik SS2017

30

Zusammenfassung

- Die Erzeugung sowie auch die Detektion des Ultraschalls beruhen auf dem indirekten bzw. direkten piezoelektrischen Effekt
- Um Ultraschallwellen mit Piezokristallen herstellen zu können, muss an diese eine Wechselspannung mit Frequenzen im Ultraschallbereich angelegt werden
- Die Frequenz der Wechselspannung entspricht der Frequenz der erzeugten Wellen
- Der Piezokristall im Ultraschallkopf übernimmt gleichzeitig die Aufgabe des Detektors als auch des Erzeugers des Ultraschalls

Karim Kouz, Biophysik SS2017

31

Ultraschall in der Medizin

- Diagnostik: bildgebendes Verfahren (Schnittbilder)
- Therapie (Wärme- und mechanische Wirkung des Ultraschalls):
 - Tumorthherapie (Hyperthermie)
 - Zahnsteinentfernung
 - Steinertrümmerung
 - Mikromassage
 - Gewebe-Zerstörung
 - Kavitation (z.B. Behandlung von Adipositas)
 - Ultraphonophorese



Karim Kouz, Biophysik SS2017

Quelle: <http://www.zahnreinigung.net/professionelle/ultraschall/>; http://www.sonographiebilder.de/runcus_coeliacus.html

32

Vorteile sonographischer Methoden

- Nahezu überall und jederzeit einsetzbar
- Biologisch (nahezu) unschädlich
- Beliebig oft wiederholbar (kein erhöhtes Risiko bei mehrfacher Anwendung)
- Preisgünstig im Vergleich zu anderen bildgebenden Verfahren
- Nicht nur in großen Einrichtungen, sondern auch bereits in Praxen vorhanden
- Kontrastmittel sind nicht zwingend notwendig



Karim Kouz, Biophysik SS2017

Quelle: <http://www.golem.de/1110/87007.html>

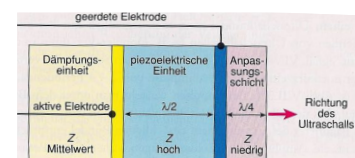
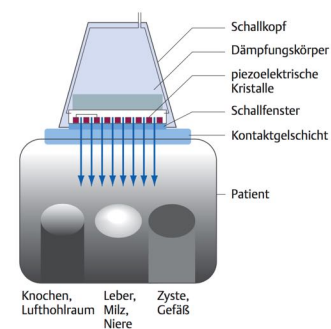
33

Aufbau des Ultraschallkopfes

- Der Ultraschallkopf ist ein Transducer (Sender und Empfänger)
- Voraussetzung einer wirksamen Deformation ist die Resonanz:
 - Die Eigenfrequenz des Piezokristalls muss also mit der Frequenz der Anregungsspannung übereinstimmen
 - Für die Dicke des Piezokristalls muss daher gelten:

$$d = \frac{\lambda}{2} = \frac{c}{2 \cdot f}$$

- Aktive Einheit: **Viele** piezoelektrische Plättchen
- Anpassungsschicht: Realisiert die maximale Energieabgabe in das Gewebe
- Dämpfungsschicht: Absorbiert den von dem Piezo-Plättchen erzeugten Ultraschall und sorgt damit für eine bessere Auflösung



Karim Kouz, Biophysik SS2017

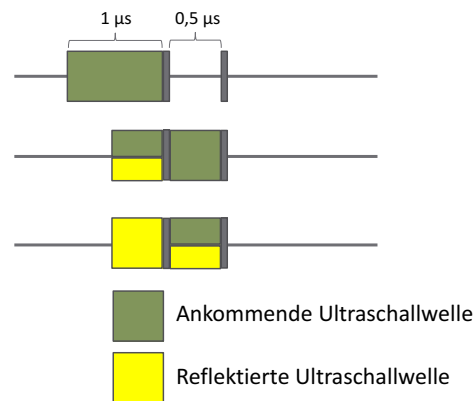
Quelle: Biophysik für Mediziner; Dargatzis, F. Medizina Verlag, Dual Reihe Radiologie 3. Auflage; M. Reiter, F. P. Kuhn, Thieme Verlag

34

Auflösungsvermögen der Ultraschallbilder

- Auflösungsgrenze: Der kleinste Abstand zweier noch gerade getrennt detektierbarer Punkte (gemessen in Längeneinheiten)
- Auflösungsvermögen: Kehrwert der Auflösungsgrenze

- Axiale Auflösungsgrenze:
 - Abhängig von der Impulslänge
 - Theoretisch beträgt sie eine halbe Impulsdauer (ca. 0,75 mm)
- Laterale Auflösungsgrenze:
 - Immer schlechter als die axiale Auflösungsgrenze
 - Entspricht praktisch dem Durchmesser des US-Bündels
 - Ist im Fokus am besten (Divergenz des Bündels nach lateral)



Karim Kouz, Biophysik SS2017

Quelle: Karim Kouz (09/2017)

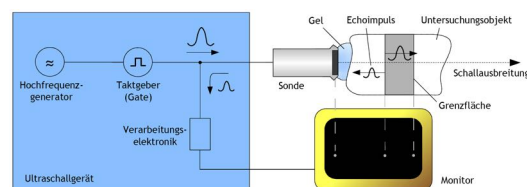
35

Echoimpulsverfahren

- Periodisch (Hochfrequenzgenerator) erzeugte US-Schwingungspakete
- Taktgeber koordiniert die Aussendung: Pause zwischen zwei Signalen muss so groß sein, dass das ausgesendete Signal vollständig detektiert werden kann, bevor das nächste Signal gesendet wird
- Elektrische Signale werden mit Hilfe einer Kathodenstrahlröhre (Oszilloskop) dargestellt
- Aus dem zeitlichen Abstand (t) zweier Signale kann bei bekannter Geschwindigkeit (v) der US-Welle im Gewebe auf den Abstand (a) der Strukturen geschlossen werden:

$$a = \frac{c \cdot t}{2}$$

Pausenzeitdauer: ms
Impulsdauer: µs



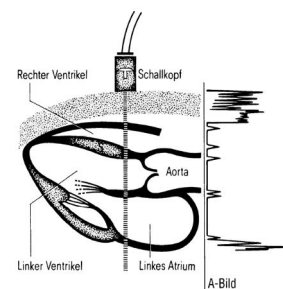
Karim Kouz, Biophysik SS2017

Quelle: <http://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Echo-Impuls-Verfahren.PNG>

36

A-Mode-Verfahren

- A-Mode = Amplituden-Mode
- Eindimensionales Verfahren
- Ultraschall wird entlang einer Achse in das Gewebe eingestrahlt, wodurch Reflexionen auch nur in dieser Richtung registriert werden
- Verfahren dient der Tiefenlokalisation bzw. Abstandsbestimmung von Strukturen (z.B. Fremdkörpersuche)
- Amplitude ist proportional zur Amplitude des Echosignals



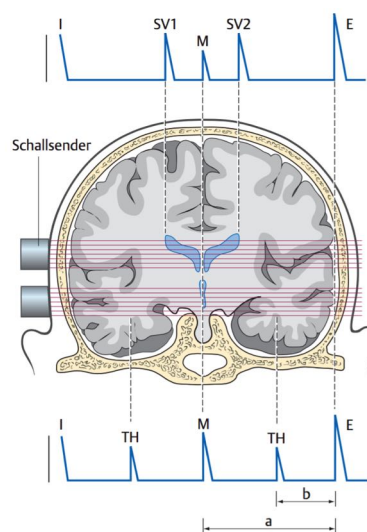
Karim Kouz, Biophysik SS2017

Quelle: Vorlesungsskript TU Darmstadt, Medizinische Bildverarbeitung – Bildgebender Ultraschall, 14.11.07

37

A-Mode-Verfahren

- Anwendung:
 - Wird nur gelegentlich eingesetzt
 - Echoenzephalografie
 - Sinusitisdiagnostik
 - Fremdkörpersuche



Karim Kouz, Biophysik SS2017

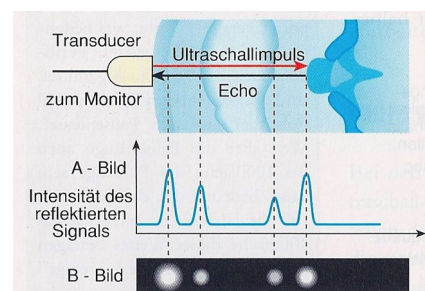
Quelle: Duale Reihe Radiologie 3, Auflage: M. Reiser, F.-P. Kuhn; Thieme Verlag

38

B-Mode-Verfahren (Eindimensional)

- B-Mode = Brightness-Mode (Helligkeit)
- Echoamplitude wird als Intensität oder Grauwert des Kathodenstrahls kodiert, wodurch sich die Helligkeit, abhängig von der Intensität des reflektierten Ultraschalls, ändert
- Je größer die reflektierte Intensität, desto heller ist der Punkt

Im A-Mode wird die Intensität als Amplitude und nicht als Helligkeit, im B-Mode als Helligkeit und nicht als Amplitude dargestellt.



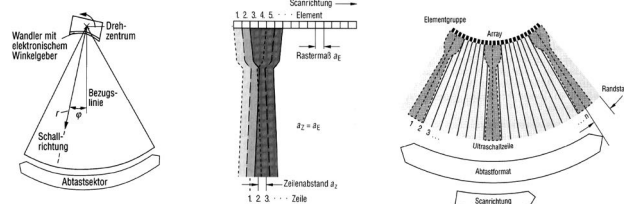
Quelle: Biophysik für Mediziner, Damjanovich, Fidy, Medicina Verlag

39

Karim Kouz, Biophysik SS2017

B-Mode (Zweidimensional)

- Das zweidimensionale B-Bild ist eine Serie von eindimensionalen B-Bildern
- Dabei werden zweidimensionale Schnittbilder erzeugt (Tomographisches Verfahren)
- Mehrere Möglichkeiten der Abtastung:
 - Linearscan: Piezo-Element wird linear innerhalb des Schallkopfes bewegt
 - Linear-Array: Piezo-Plättchen sind reihenförmig nebeneinander angeordnet, sodass das Piezo-Plättchen nicht mehr bewegt werden muss, um ein Bild zu erhalten
 - Convex-Scan: Piezo-Plättchen wird auf einer konvex-gebogenen Linie bewegt
 - Convex-Array: Piezo-Plättchen sind reihenförmig nebeneinander in einer gebogenen Anordnung angeordnet

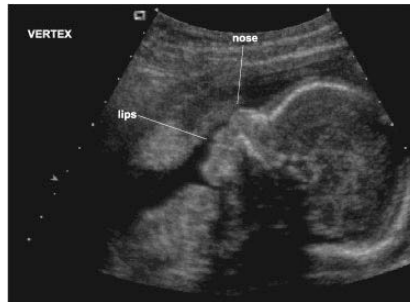
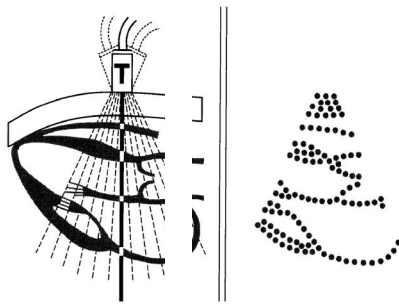


Karim Kouz, Biophysik SS2017

Quelle: Vorlesungsskript TU Darmstadt, Medizinische Bildverarbeitung – Bildgebender Ultraschall, 14.11.07

40

B-Mode-Bilder



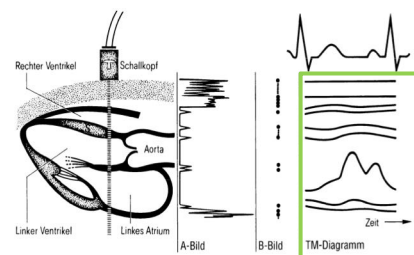
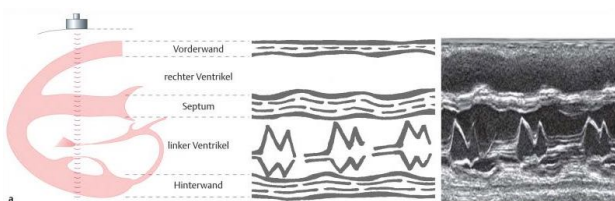
Karim Kouz, Biophysik SS2017

Quelle: Vorlesungsskript TU Darmstadt, Medizinische Bildverarbeitung – Bildgebender Ultraschall, 14.11.07;
http://www.answers.com/topic/biomedical-ultrasonics

41

M-Mode-Verfahren

- M-Mode = Motion-Mode
- Amplitude des Signals wird auf der vertikalen Achse dargestellt
- Die horizontale Achse stellt eine Zeitachse dar
- Die hintereinander liegenden Strukturen bzw. deren Echos sind auf der horizontalen Achse gegeneinander verschoben
- Dargestellt werden eindimensionale Bewegungsabläufe

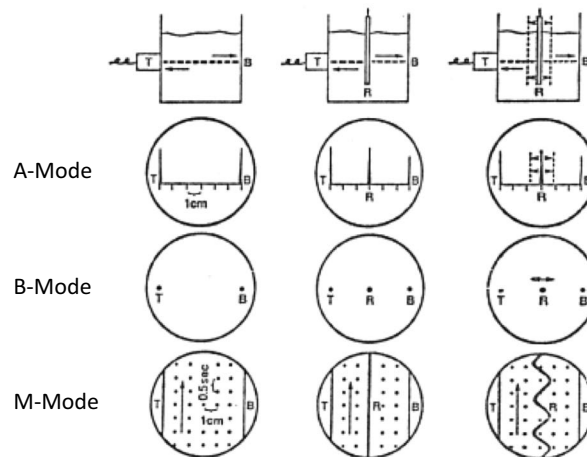


Karim Kouz, Biophysik SS2017

Quelle: Duale Reihe Radiologie 3, Auflage: M. Reiser, F.-P. Kuhn; Thieme Verlag;
Vorlesungsskript TU Darmstadt, Medizinische Bildverarbeitung – Bildgebender Ultraschall, 14.11.07

42

Übersicht über die Verfahren



Karim Kouz, Biophysik SS2017

Quelle: Vorlesungsskript Biophysik für Mediziner, Semmelweis Universität, SS2017

43

3D-Ultraschall

- Erweiterung des 2-dimensionalen B-Bildes um eine dritte Dimension
- Nach Rekonstruktionszeit erhält man ein 3-dimensionales Bild



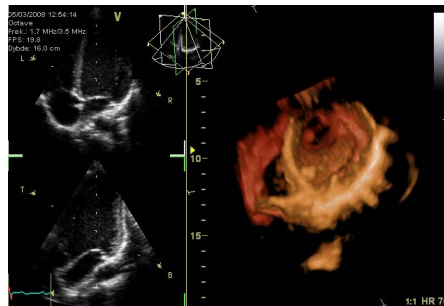
Karim Kouz, Biophysik SS2017

Quelle: <http://www.frauenarzt-haefner.de/wissenswertes/3d4d-ultraschall/>

44

4D-Ultraschall

- = „Live-3D-Ultraschall“
- 3-dimensionales Bild wird um die Dimension der Zeit erweitert
- Das 3-dimensionale Bild kann „live“ betrachtet werden



Zu sehen ist eine Aufsicht auf die Mitral-Klappe vom Apex aus.

Karim Kouz, Biophysik SS2017

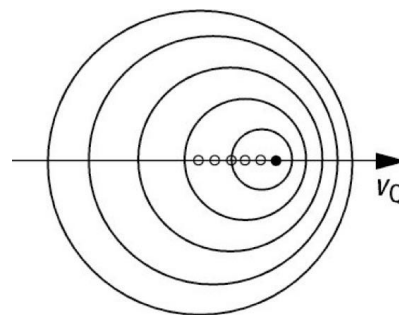
Quelle: <http://de.wikipedia.org/wiki/4D-Ultraschall>

45

Doppler-Effekt

- Definition: „Die von einem Empfänger registrierte Frequenz einer Welle stimmt nicht mit der gesendeten Frequenz überein, wenn sich Sender und Empfänger relativ zueinander bewegen“
- Die Frequenz nimmt zu, wenn sich Schallquelle und Beobachter einander nähern
- Die Frequenz nimmt ab, wenn sich Schallquelle und Beobachter voneinander entfernen

Der Doppler-Effekt tritt sowohl auf, wenn sich der Empfänger bewegt und der Sender nicht, als auch wenn sich der Sender bewegt und der Empfänger nicht.



Quelle: <http://www.spektrum.de/lexikon/physik/doppler-effekt/3275>

Karim Kouz, Biophysik SS2017

46

Doppler-Effekt: Mathematische Beschreibung

- Abhängig davon, ob sich der Beobachter bewegt oder der Sender, ergeben sich unterschiedliche Formeln
- Wenn jedoch die Geschwindigkeit der Bewegung des Empfängers/Senders viel kleiner ist, als die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Welle, dann ist die Abweichung der beiden Formeln gering
- Diese Bedingung ist bei der Sonographie immer erfüllt, sodass gilt:

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

f : beobachtete Frequenz
 f_0 : Frequenz der Schallquelle
 v : relative Geschwindigkeit der Schallquelle
 c : Ausbreitungsgeschwindigkeit der Welle
 $+$: Annäherung
 $-$: Entfernung

Karim Kouz, Biophysik SS2017

47

Bewegte reflektierende Körper

- Sonographische Untersuchungen beruhen u.a. auf der Reflexion des US
- Werden bewegte Körper, z.B. die Blutströmung, mit US beobachtet, so tritt ebenfalls der Doppler-Effekt auf
- Hierbei muss jedoch beachtet werden, dass die Blutströmung als eine sekundäre Schallquelle wirkt, da sie den US reflektiert
- Für bewegte reflektierende Körper gilt daher:

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

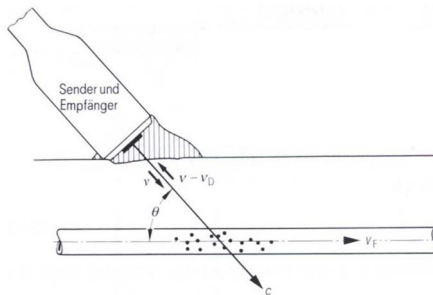
Karim Kouz, Biophysik SS2017

48

Doppler-Effekt bei der Sonographie

- Wird z.B. die Blutströmung mit einem Ultraschallkopf beobachtet, der schräg zur Körperfläche gehalten wird, so gilt:

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



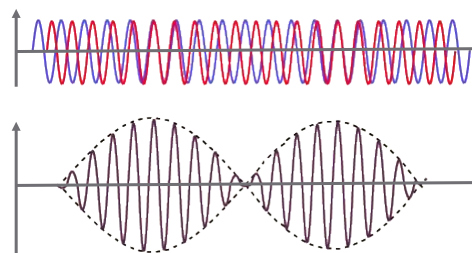
Karim Kouz, Biophysik SS2017

Quelle: Vorlesungsskript Biophysik für Mediziner, Semmelweis Universität, SS2017

49

Schwebung

- „Als Schwebung bezeichnet man die Resultierende der additiven Überlagerung zweier Schwingungen, die sich in ihrer Frequenz nur wenig voneinander unterscheiden, sodass es zur Interferenz kommt“
- Akustik:
 - Erklingen zwei Töne mit nahezu gleicher Frequenz, so ist ein Ton zu hören mit einer Frequenz, die dem Mittelwert der beiden Töne entspricht
 - Die Lautstärke dieses Tons schwankt mit der sogenannten Schwebungsfrequenz, die gleich der Differenz der beiden Töne ist



Karim Kouz, Biophysik SS2017

Quelle: Verändert nach <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/sound/ingsou/beatd.gif>

50

Schwebungen bei der Sonographie

- Auch in der Sonographie tritt das Phänomen der Schwebung auf
- Trifft der Ultraschall mit einer bestimmten Frequenz auf eine sich bewegende Struktur, so reflektiert diese den Ultraschall
- Aufgrund des Doppler-Effekts weicht die Frequenz des reflektierten Ultraschalls von der ursprünglich gesendeten Frequenz ab
- Die beiden Frequenzen überlagern sich und es kommt zum Phänomen der Schwebung

• Rechenbeispiel:

- Ausgesendet: 8000 kHz
- Empfangen: 7999 kHz
- Schwebung: $|7999 \text{ kHz} - 8000 \text{ kHz}| = 1 \text{ kHz}$

• Rechenbeispiel:

- Ausgesendet: 8000 kHz
- Empfangen: 8001 kHz
- Schwebung: $8001 \text{ kHz} - 8000 \text{ kHz} = 1 \text{ kHz}$

In beiden Situationen ist ein Ton mit einer Schwebungsfrequenz von 1 kHz zu hören. Es kann so noch nicht entschieden werden, ob sich das bewegte Objekt nähert oder entfernt.

Karim Kouz, Biophysik SS2017

51

Schwebung bei der Sonographie

- Um Informationen über die Richtung der Bewegung (Entfernung/Annäherung) zu erhalten, wird die reflektierte Welle mit einer Referenzwelle, die z.B. 5 kHz höher ist als die ursprüngliche Welle, überlagert

• Beispiel 1: sich entfernende Objekte

- Ausgesendet: 8000 kHz
- Empfangen: 7999 kHz
- Schwebung: $8000 + 5 - 7999 = 6 \text{ kHz}$

Unterscheidung möglich!



• Beispiel 3: sich nähernde Objekte

- Ausgesendet: 8000 kHz
- Empfangen: 8001 kHz
- Schwebung: $8000 + 5 - 8001 = 4 \text{ kHz}$

Bei diesem Verfahren sind die erzeugten Töne beim Näherkommen tiefer und beim Entfernen höher – dies entspricht nicht dem bekannten Beispiel des bewegten Martinhorns.

• Beispiel 2: keine Bewegung

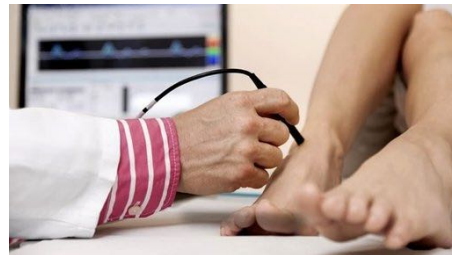
- Ausgesendet: 8000 kHz
- Empfangen: 8000 kHz
- Schwebung: $8000 + 5 - 8000 = 5 \text{ kHz}$

Karim Kouz, Biophysik SS2017

52

Ultraschall-Doppler

- Blutströmung wird hörbar gemacht
- Dadurch können schwer tastbare Pulse gefunden werden und zudem anhand des Geräusches auf pathologische Prozesse geschlossen werden



Karim Kouz, Biophysik SS2017

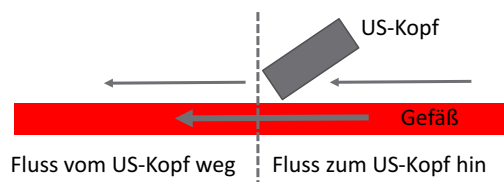
Quelle: <http://www.apotheken-umschau.de/Kerfasen/Video-PWV-Diagnose-So-stellt-der-Arzt-eine-arterielle-Verschlu%C3%9F-anbahn-fest-124145.html>, youtube.de

53

Farb-Doppler-Verfahren

- Kombination eines 2-dimensionalen B-Bildes mit den Doppler-Informationen
- Bewegungen innerhalb eines B-Bildes können so dargestellt werden und durch Falsch-Farben angefärbt werden
- Dabei gilt:
 - Bewegungen zum Ultraschallkopf werden rot dargestellt
 - Bewegungen vom Ultraschallkopf weg werden blau dargestellt
- Problem: Orientierung am Ultraschallkopf

B: Blue
A: Away
R: Red
T: Towards



➔ Ultraschallkopf muss eine „Orientierung besitzen“

Karim Kouz, Biophysik SS2017

54

Ultraschallkopf

- Zur Orientierung ist an jedem Ultraschallkopf eine Markierung, meist in Form einer Kerbe
- Dabei gilt (vom Patienten aus gesehen):
 - Kerbe zeigt zum Kopf: Links auf dem Bild ist kranial
 - Kerbe zeigt zum Fuß: Links auf dem Bild ist rostral
 - Kerbe zeigt nach links: Links auf dem Bild ist links
 - Kerbe zeigt nach rechts: Links auf dem Bild ist rechts



Quelle: Verändert nach <http://www.radiologie.uw.de/sonographie.html>

55

Karim Kouz, Biophysik SS2017

Farb-Doppler-Verfahren

- Das Farb-Doppler-Verfahren ermöglicht:
 - Differenzierung von Gefäßen und umliegendem Gewebe
 - Auffinden kleiner Gefäße, die im B-Bild nicht zu erkennen sind
 - Flussraten-Bestimmung
 - Pathologische Gefäßveränderungen feststellen (Thrombose, Stenose,...)
 - Herzuntersuchungen (z.B. Klappen-Diagnostik)
 - Feststellung akuter Krankheitsbilder
 - ...

Der anzufärbende Bereich wird meist manuell nach dem „region of interest“ Prinzip ausgewählt, sodass dadurch nur ein gewünschter Bereich angefärbt wird und nicht das ganze Bild.



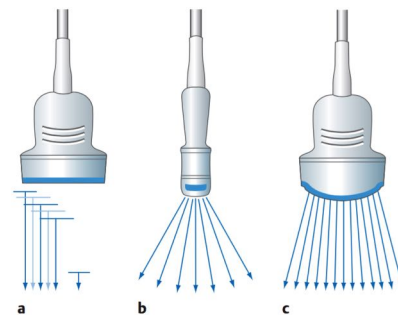
Quelle: <http://www.siemens.com/press/de/pressebilder/index.php?view=detail&sheet=0&search=acuson&type=0&tag=&hit=27>

56

Karim Kouz, Biophysik SS2017

Schallköpfe

- Linearscanner: Sonographie oberflächennaher Strukturen (Schilddrüse, Halsgefäße, Muskulatur,...)
- Sektorscanner: v.a. Echokardiographie
- Konvexscanner: v.a. Abdomen-Sonographie



a Linearscanner.
b Sektorscanner.
c Konvexscanner.

Karim Kouz, Biophysik SS2017

Quelle: Duale Reihe Radiologie 3. Auflage; M. Reiser, F.-P. Kuhn; Thieme Verlag

57

Zusammenfassung

- Als Dopplereffekt bezeichnet man das Phänomen, dass sich die detektierte Frequenz aus einer Schallquelle ändert, sofern sich der Beobachter relativ zu dem Detektor bewegt bzw. der Detektor relativ zu dem Beobachter
- Die Frequenz wird größer, sofern man sich der Schallquelle nähert, sie wird kleiner, wenn man sich von der Schallquelle entfernt
- In der Sonographie wird der Doppler-Effekt vielfach genutzt, z.B. um Bewegungen innerhalb eines Bildes sichtbar zu machen (Blutströmungen,...)
- Bei der Überlagerung zweier nahezu gleich-frequenter Schwingungen tritt das Phänomen der Schwebung auf, mit deren Hilfe man die Richtung von z.B. einer Strömung bestimmen kann
- Beim Ultraschall-Doppler werden Strömungen hörbar gemacht
- Bei dem Farb-Doppler werden die Strömungen entsprechend ihrer Strömungsrichtung mit Falsch-Farben angefärbt, wobei das „BART-Prinzip“ gilt
- Jeder Ultraschallkopf besitzt eine Markierung, die der richtigen Positionierung des Kopfes bzw. Interpretation des Bildes dient – vor jeder Diagnose oder invasiven Maßnahme sollte man noch einmal die Positionierung überprüfen

Karim Kouz, Biophysik SS2017

58