

# ULTRASCHALL



## Notwendige Kenntnisse

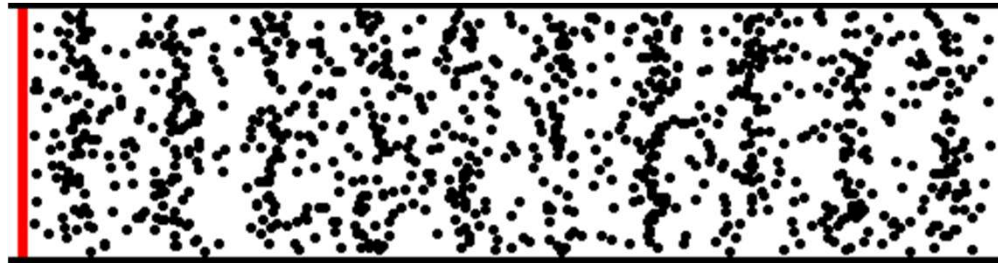
*Damjanovich et al.: Biophysik für Mediziner:*

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

*VIII/4.2.1*

Ausschließlich für den Unterrichtsgebrauch

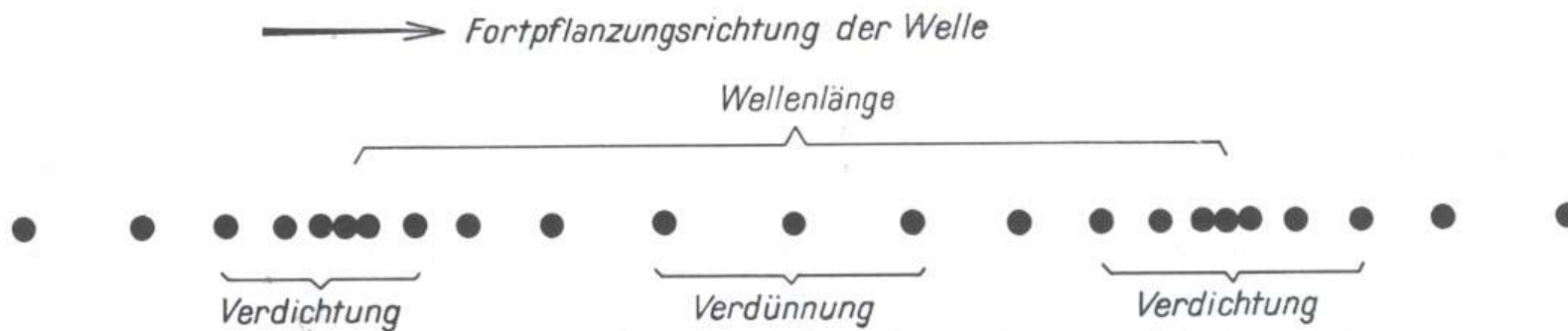
## Einleitung



### 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.



Momentbild einer fortschreitenden Longitudinalwelle

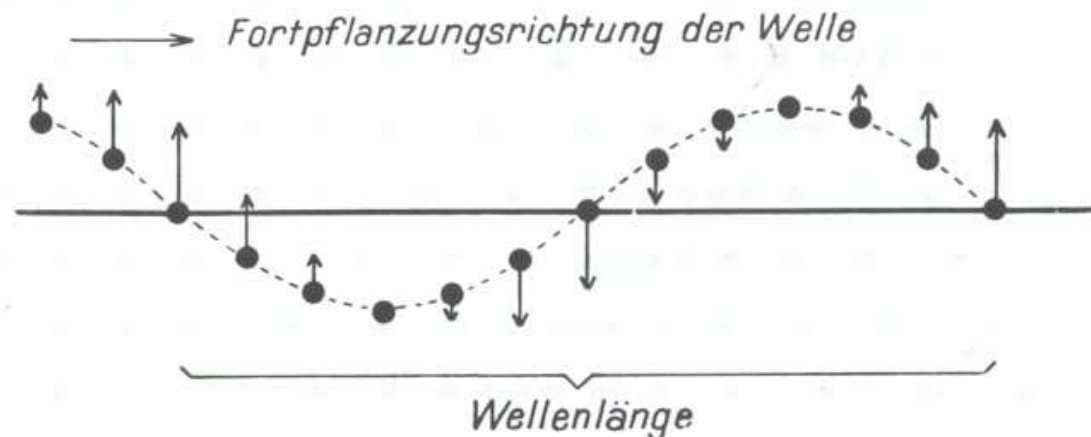
## Einleitung



### *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 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.

## Eigenschaften des Ultraschalls

### Charakteristiken

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

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:

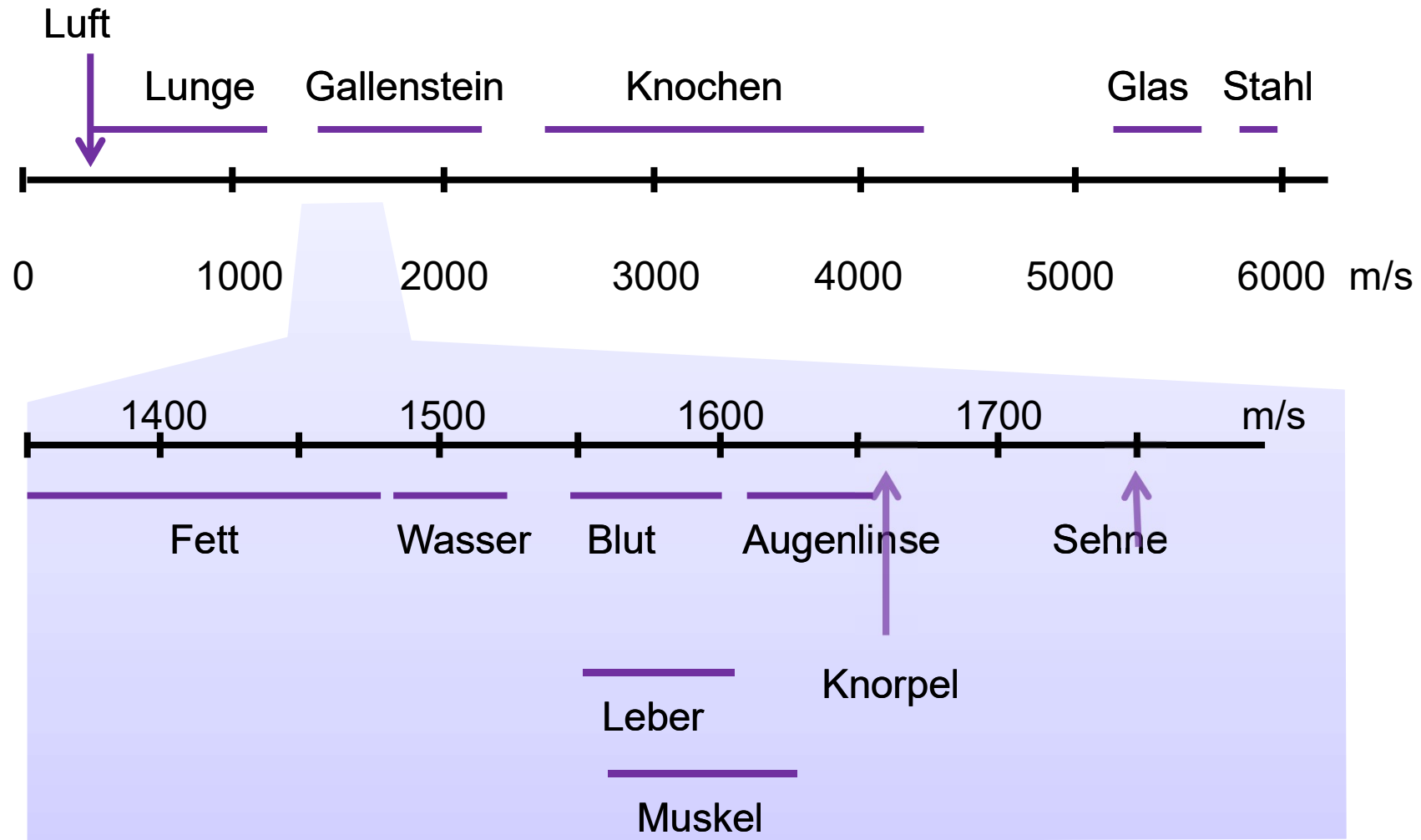
$f = 2 \text{ MHz}$

**$c = 1540 \text{ m/s}$  in Weichteilgeweben**

$\lambda = ?$

Ausbreitungsgeschwindigkeit  $c$  (m/s)

unabhängig von der Frequenz => keine Dispersion



## Eigenschaften des Ultraschalls

Kompressibilität ( $\kappa$ ) und Ausbreitungsgeschwindigkeit ( $c$ )

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

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

$\rho$  - Dichte

Akustische Impedanz ( $Z$ ) und Ausbreitungsgeschwindigkeit

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

Die Schallintensität

$$J = \frac{1}{Z} \Delta p_{\text{eff}}^2$$

$$J = \frac{1}{2Z} \Delta p_{\text{max}}^2$$

## 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  $\sim 0,13$ fache,  
maximum  $\sim 0,2$ fache des Atmospheredruckes

Die Schallintensität bei der Therapie  $\bar{J} = 2,5 \text{ W/cm}^2$

Achte auf die Applikationsdauer!

Druckschwankung in Muskel:  
effektiv  $\sim 2$ fache,  
maximum  $\sim 3$ fache des Atmospheredruckes

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



## Eigenschaften des Ultraschalls

### Die Schwächung

Schwächungsgesetz

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

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

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 (distilliert)	500	180

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)

## 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

optimale Anpassung:

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



**Anpassungsschicht** (Koppelmedium): Wasser, Gel, Parafinöl  
vermindert den Impedanzunterschied zwischen Luft und Haut

## 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)

## 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.

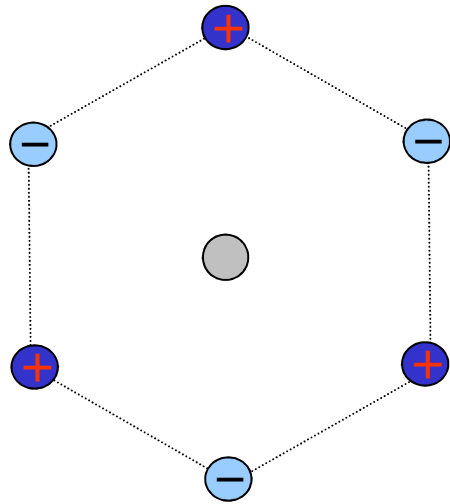
mechanische Schwingung → elektrische Schwingung

piezoelektrischer Effekt

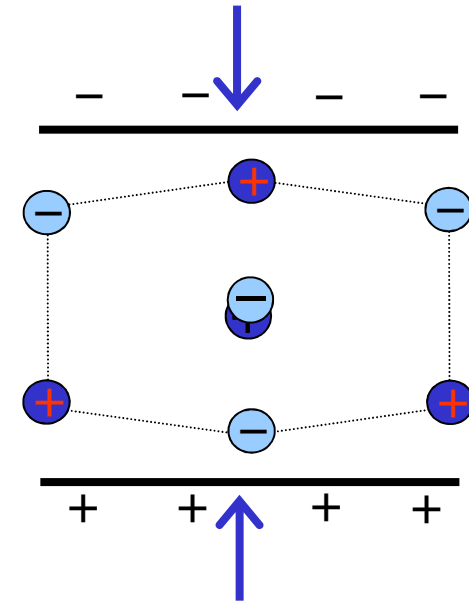
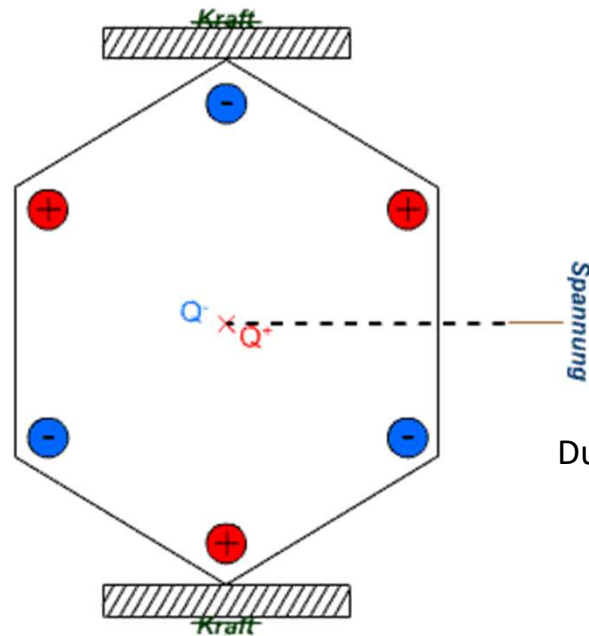
elektrische Schwingung → mechanische Schwingung

reziproker piezoelektrischer Effekt

# „Mechanismus“ des Piezoeffektes :



Die Schwerpunkte der elektrischen Ladungen fallen zusammen.



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

## Wandler: Schwingquarz

elektrische Schwingung → mechanische Schwingung

Bemerkungen:

a.  $f_{elektrische} = f_{mechanische}$

b.  $A_{elektrische} \sim A_{mechanische}$

c. Umwandlung in beiden Richtungen!

Schwingquarz = Sender/Detektor

# ULTRASCHALL IN DER MEDIZIN

1. DIAGNOSTIK
2. THERAPIE

# 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\*

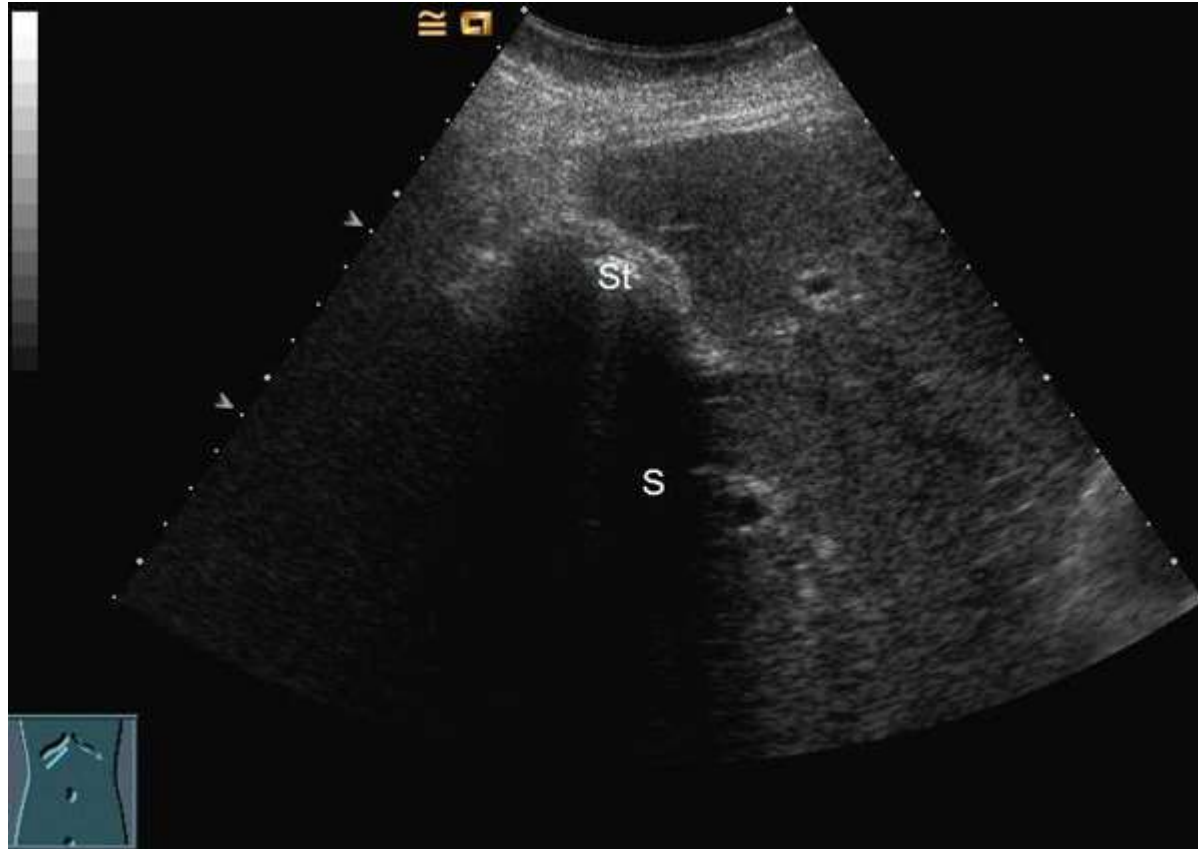
\*Die Menge benötigten Kontrastmittels ist um das ca. 100fache kleiner als bei CT und MRT, die bislang bekannten Nebenwirkungen sind wesentlich seltener .



# 1. DIAGNOSTIK

## Nachteile Ultraschall:

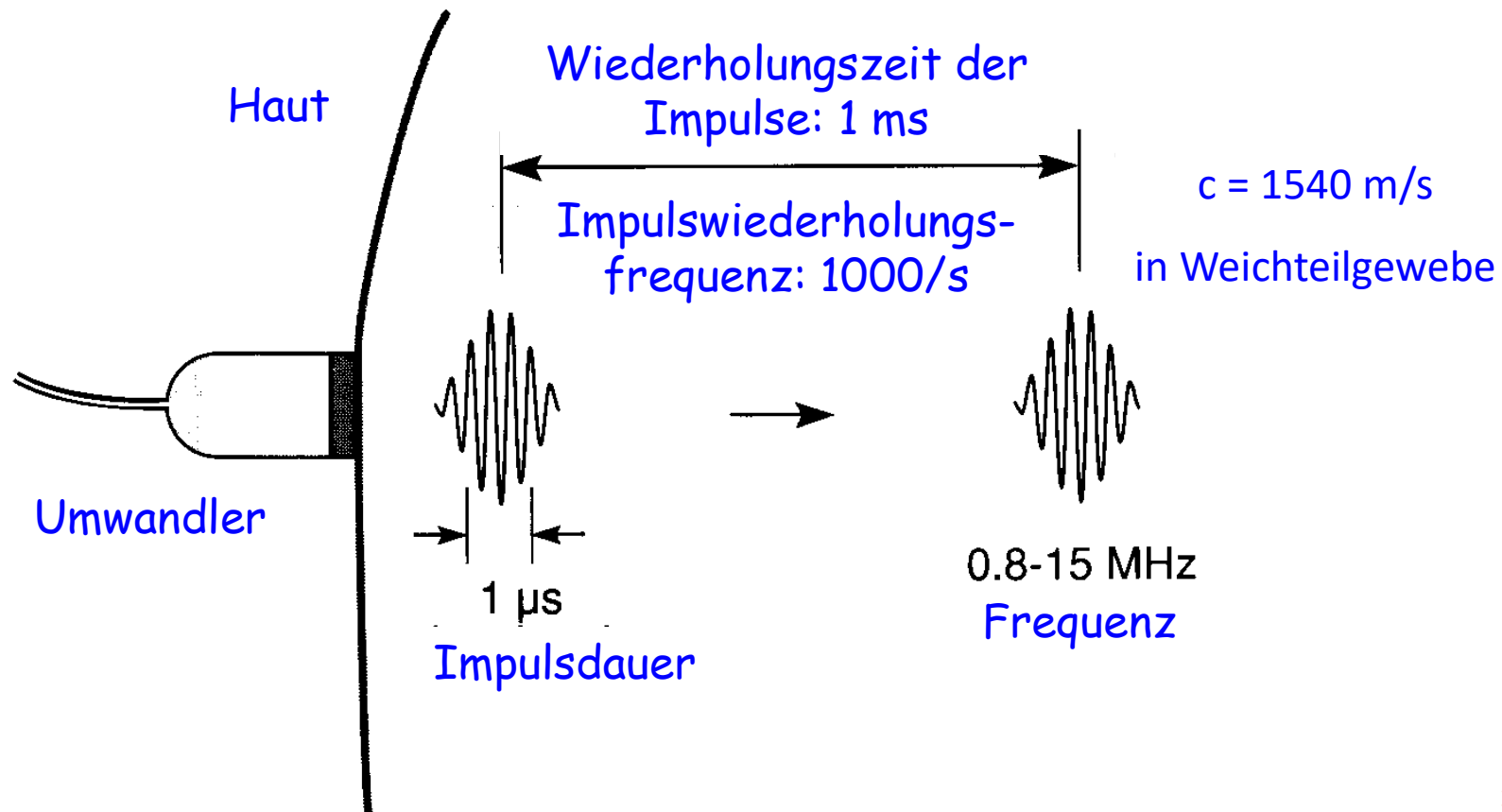
- Geringe Objektivität des Verfahrens
- Qualität der gewonnenen Bilder hängt von vielen Faktoren ab:  
Position des Patienten, Geräteeinstellungen, Handhabung der Sonde
- Hand-Auge-Koordination
- Subjektive Eindruck mit normaler Anatomie vergleichen  $\Rightarrow$  Erfahrung
- Bei der Untersuchung werden Standbilder ausgedruckt
- Geringere Raumauflösung als CT und MRT
- Weichteil-Kontrastauflösung ist der der MRT unterlegen



# Charakteristiken der Ultraschall-Impulse

Transducer/Umwandler: Sender und Empfänger

Zeitliche Trennung → Impulse



# Auflösungsgrenze, Auflösungsvermögen

**Auflösungsgrenze:** der kleinste Abstand zweier noch getrennt detektierbaren Punkten

**Auflösungsvermögen:** Reziprokwert der Auflösungsgrenze

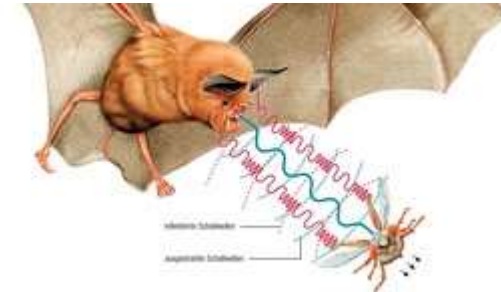
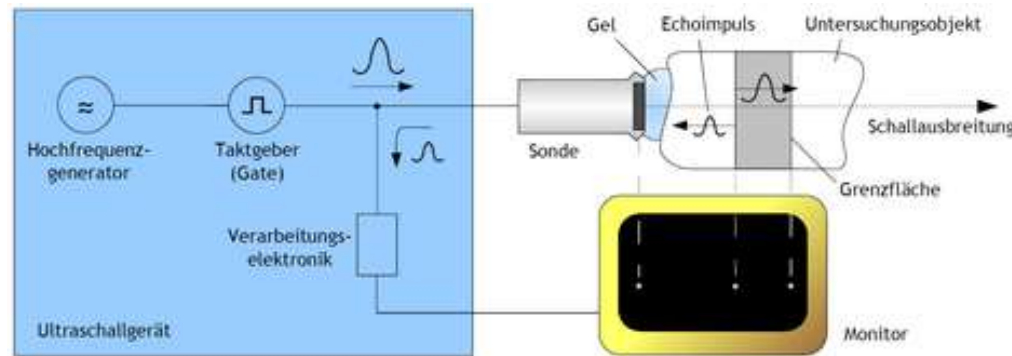
Die axiale Auflösungsgrenze hängt von der Impulslänge. ( $\Delta z \geq \lambda/2$ )

Die Impulslänge ist indirekt proportional zur Frequenz.

Die laterale Auflösungsgrenze hängt von dem Durchmesser des Ultraschallbündels. ( $\Delta x \sim 3 \cdot \lambda$ )

# 1.1 SONOGRAPHIE

## Prinzip des Echoimpulsverfahrens



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

$z$  - Abstand der Grenzfläche  
vom Schallkopf

$t$  - Laufzeit

$c$  - Schallgeschwindigkeit

$$A \sim R$$

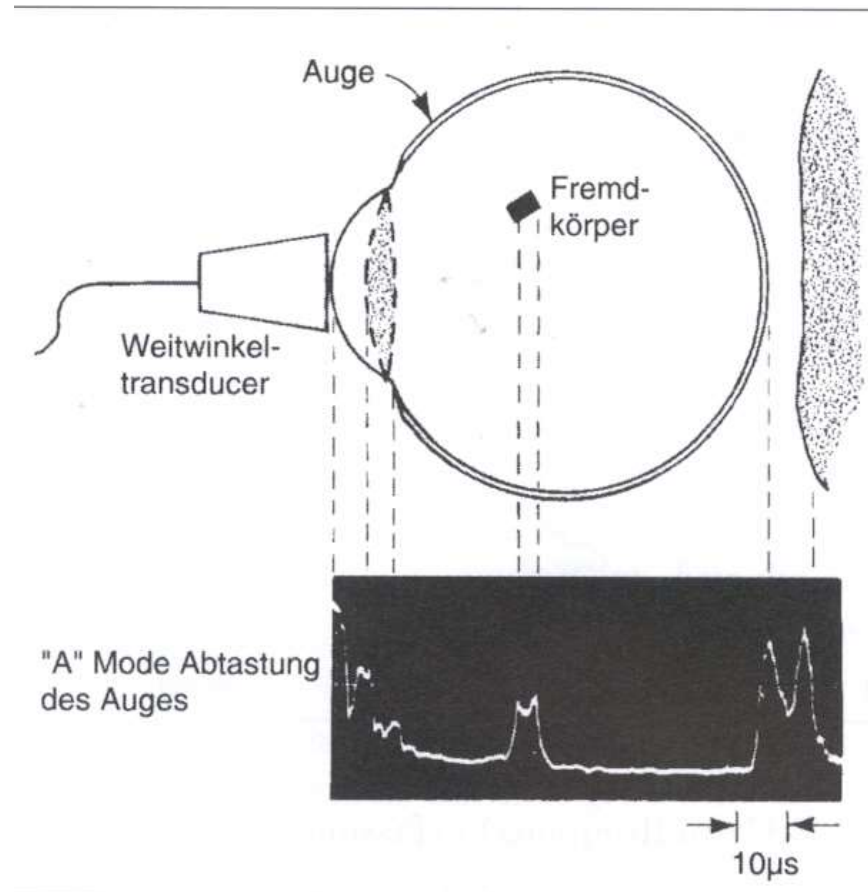
## Bemerkungen:

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.

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

## Das A-Mode Verfahren

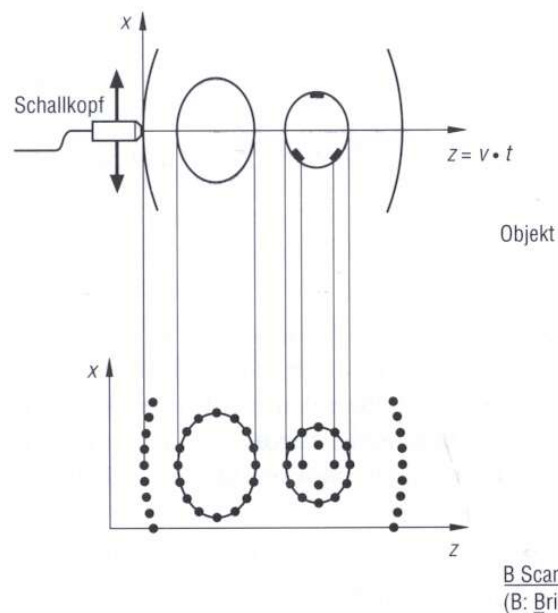


Ultraschallamplitudenmessung zur Bestimmung der Lage eines Fremdkörpers  
aus der Laufzeit des reflektierten Ultraschallsignals

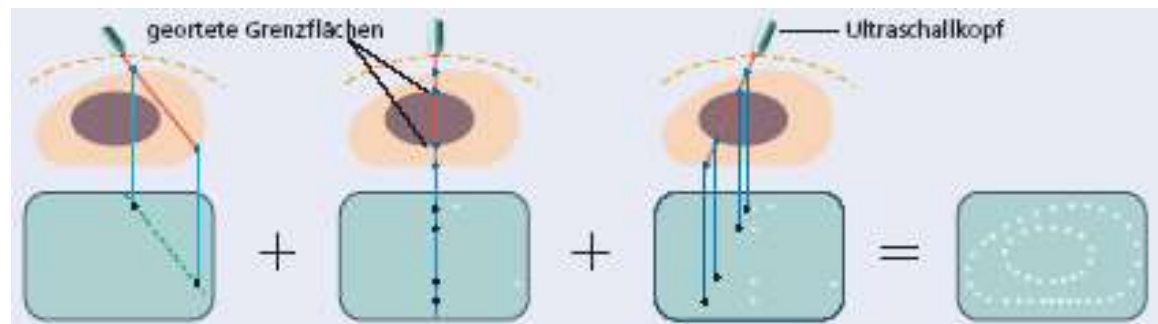


# Das B-Bild Verfahren

Man kodiert die Echoamplitude als Intensität oder Grauwert des Kathodenstrahls.



Grundsätzliche Darstellung der B-Bild-Technik



Der Schallstrahl wird nach jedem Sendeimpuls in der darzustellenden Ebene Senkrecht zur Körperoberfläche verschoben => entsteht ein **2D Schnittbild**.

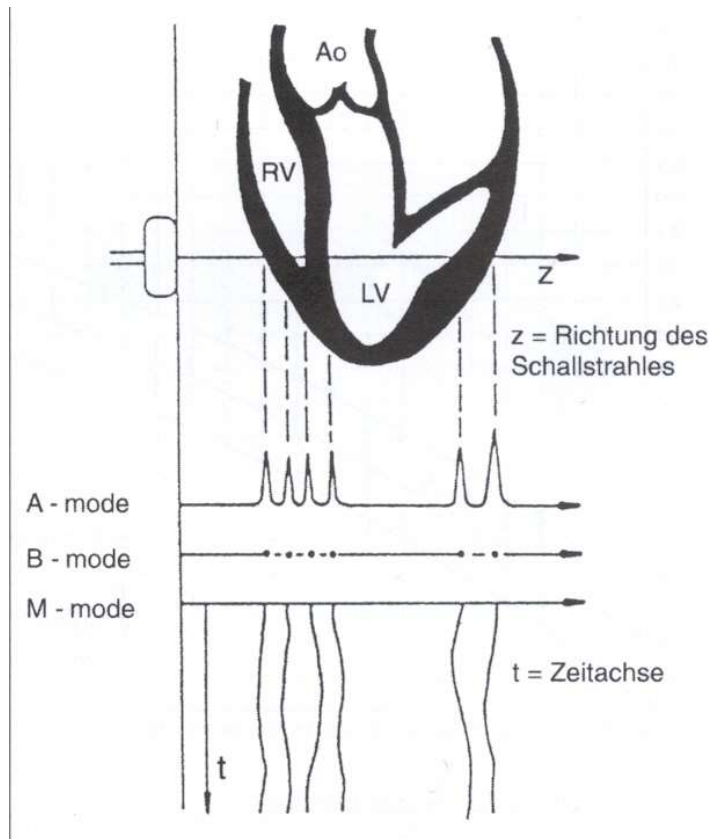
## Das B-Bild Verfahren



2D-Sonogramm eines Menschenfetus von neun Woche

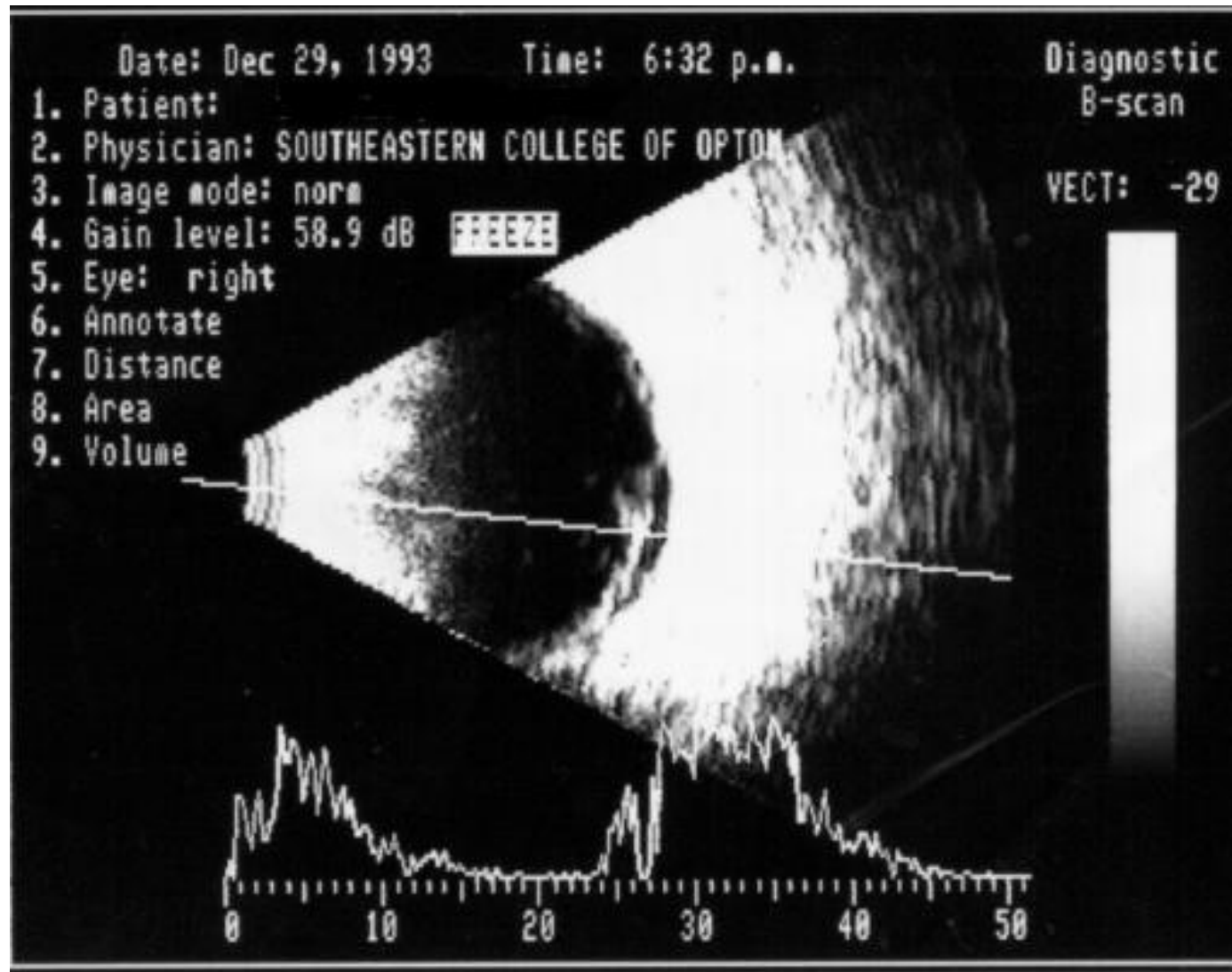
# Das M-Mode Verfahren

Man schreibt die zeitlich aufeinanderfolgenden Echozeilen nebeneinander.

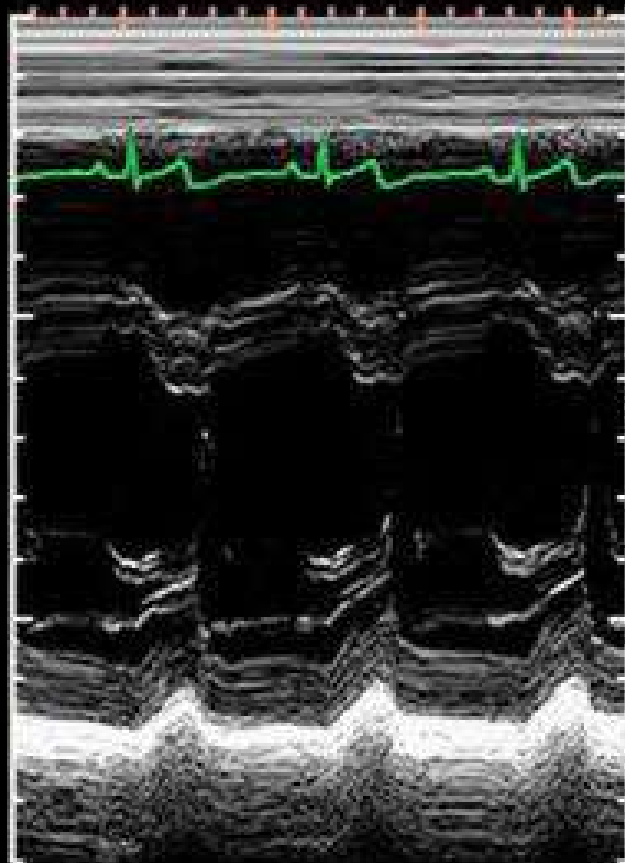


Bewegungsablauf, Amplitude, Geschwindigkeit der Bewegung anatomischer Strukturen lassen sich genau verfolgen.

## Zweidimensionales B-Bild und A-Bild



TM-Bild



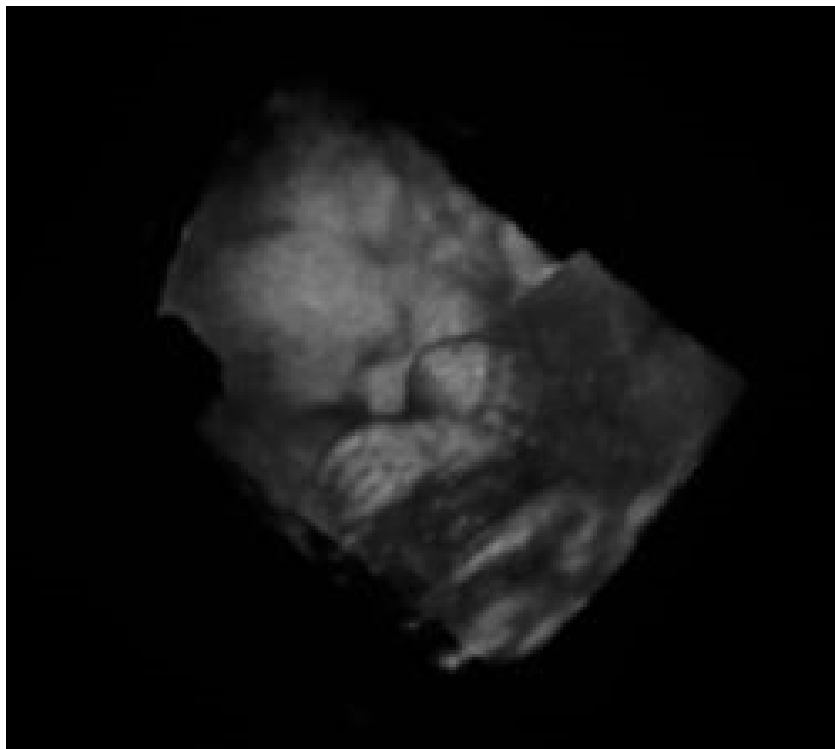
B-Bild



## Mehrdimensionale Anwendung

3D-Ultraschall: produziert räumliche Standbilder

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





## Das High-End-Ultraschallsystem Acuson S3000 von Siemens

29. November 2011

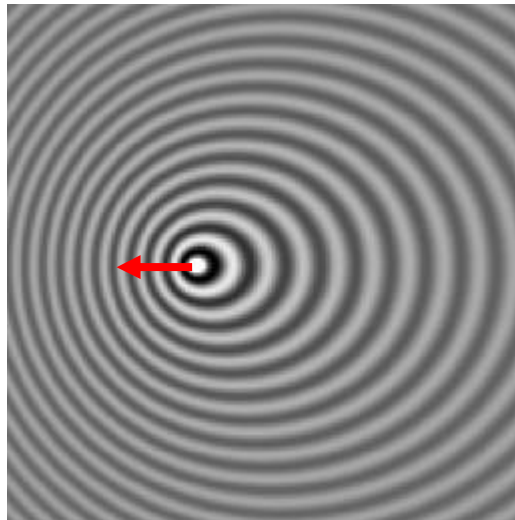
Das Acuson S3000\* ist Siemens' neues Ultraschallsystem der Premiumklasse. In dem System ist erstmals die Bildgebungstechnologie eSie Fusion\*\* integriert. Sie ermöglicht eine automatische Überlagerung von Echtzeit-Ultraschallaufnahmen mit bereits aufgenommenen dreidimensionalen Computertomografie (CT)-Aufnahmen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

# 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.

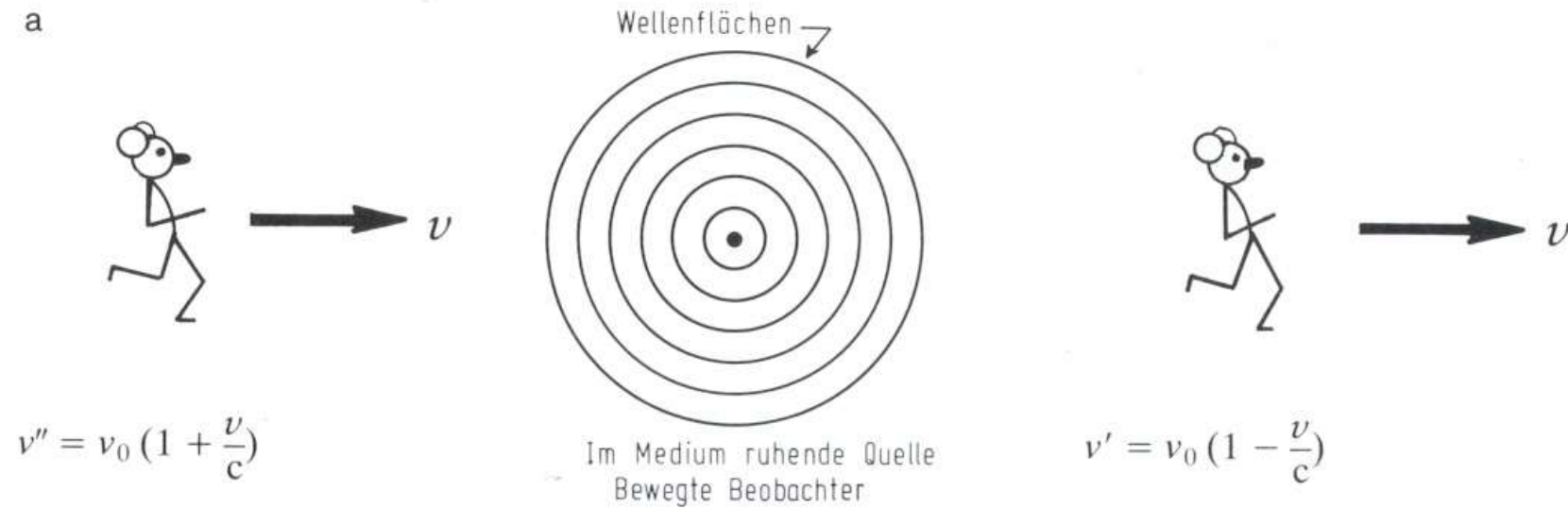
Änderungen treten ebenso auf, wenn der Beobachter ruht und die Quelle sich bewegt.



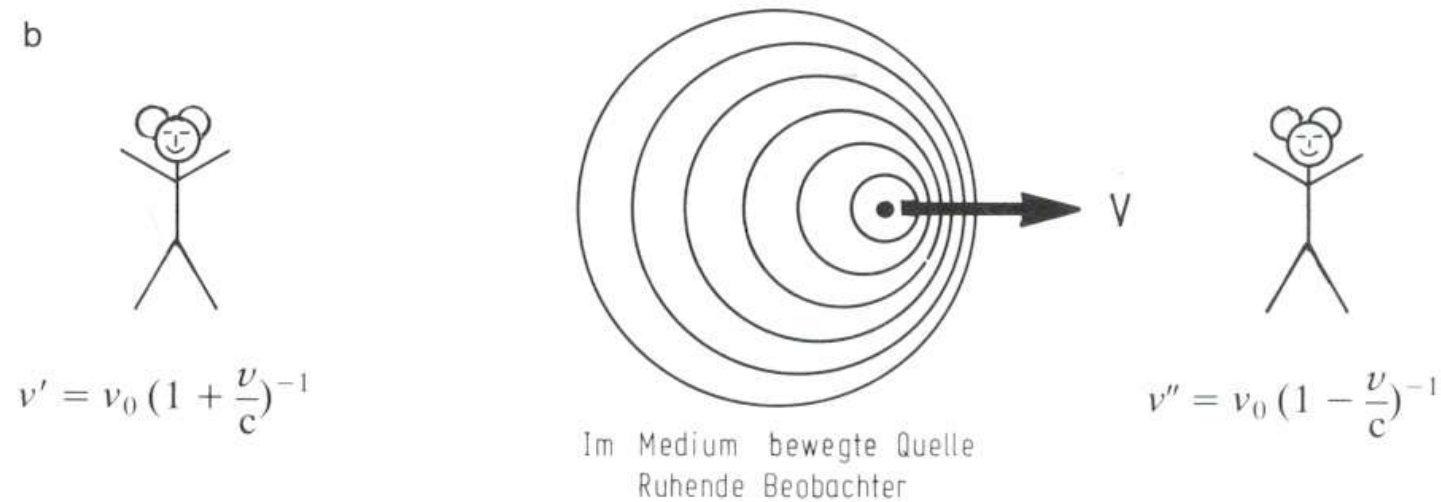


# Der Doppler-Effekt

a



b



## 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

## 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

## Der Doppler-Effekt

wenn:  $v \ll c$

$v$   
 $c$

Geschwindigkeit der Bewegung  
Schallgeschwindigkeit

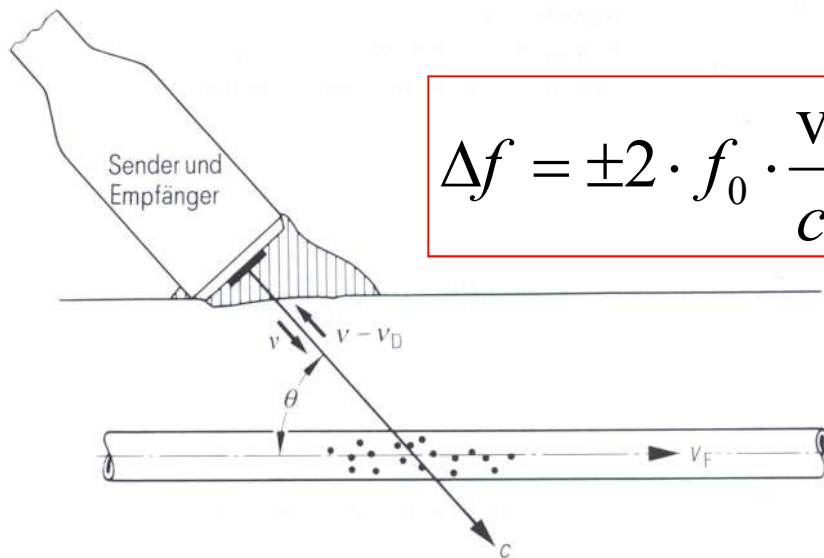
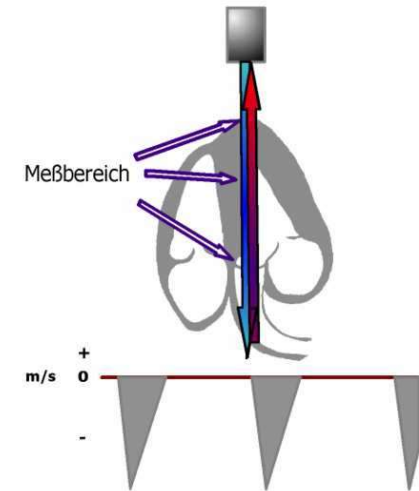
$$f = f_0 \cdot \left(1 \pm \frac{v}{c}\right)$$

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

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

## Doppler-Sonographie (CW - Continuous Wave)

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



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

z.B.  $f = 8 \text{ MHz}$

$v = 12 \text{ cm/s}$

$c = 1600 \text{ m/s}$

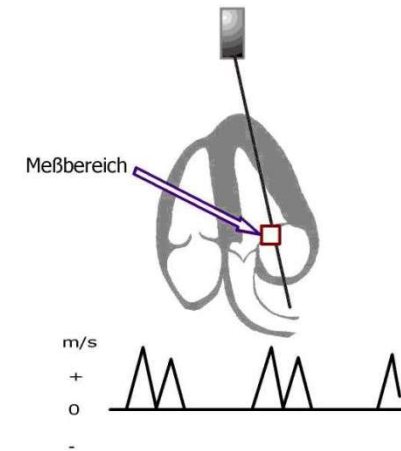
$\Theta = 34^\circ < 40^\circ$

$\Rightarrow f_D = 1 \text{ kHz}$

(Schwebung)

Ultraschall-Doppler-Effekt zur Messung von Strömungsgeschwindigkeiten

## Doppler-Sonographie (PW - Puls Wave)



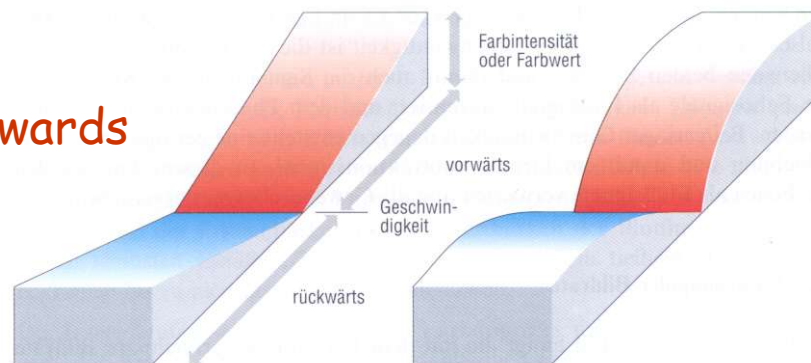
- Information nur aus einem *kleinen vorgebbaren Bereich*  
(Puls-Doppler-Verfahren)
- Entdeckung und Beurteilung angeborener und pathologischer Herz- und Herzklappenfehler
- Beurteilung von Gefäßverengungen (Stenosen) und deren Schweregrad
- Direkte Bestimmung des Volumenflusses im Gefäß

## Farb-Doppler Verfahren

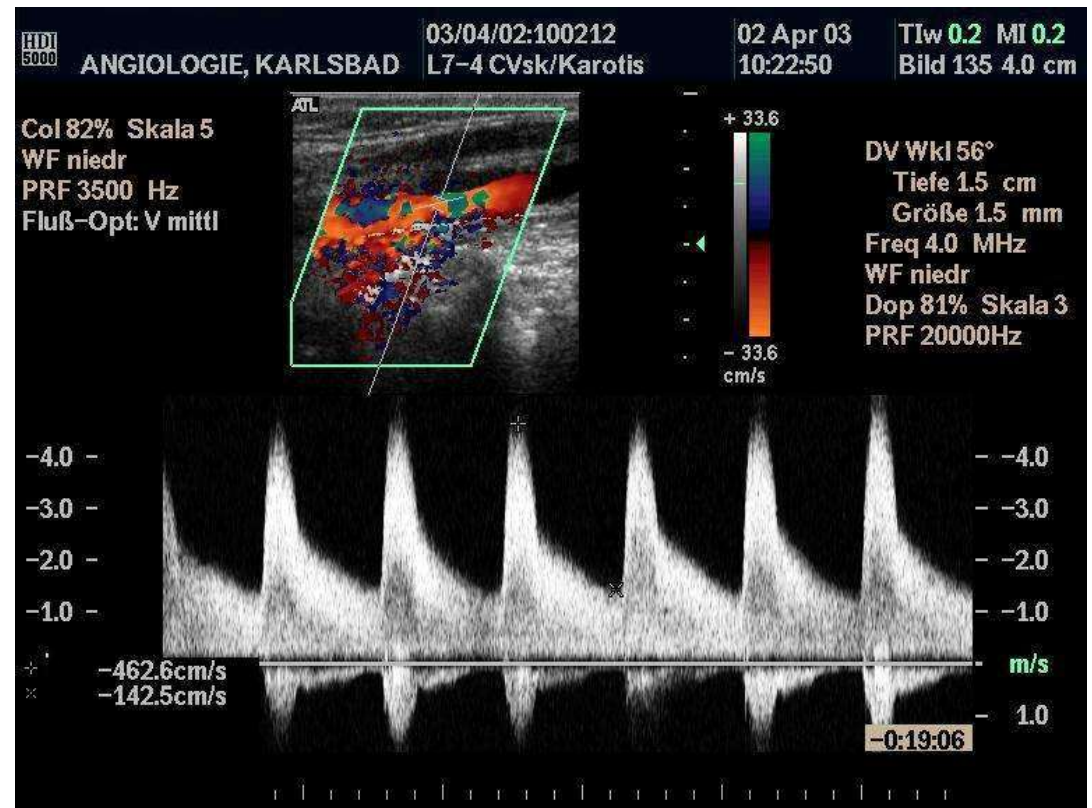
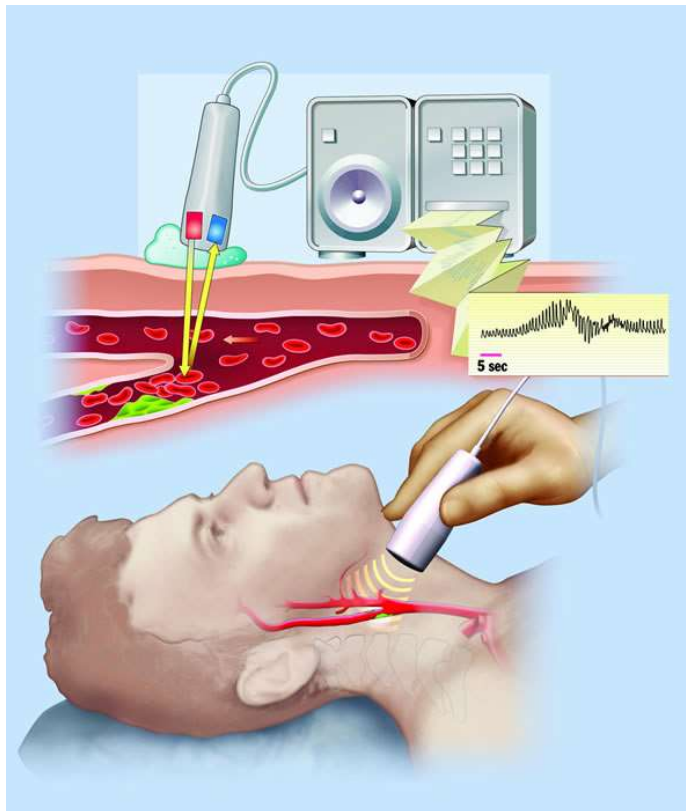
Information wird aus einem *grossen Ausschnitt* erhalten.

Die *Flussgeschwindigkeiten* werden als **Farbton** dem gesamten B-Bild überlagert.

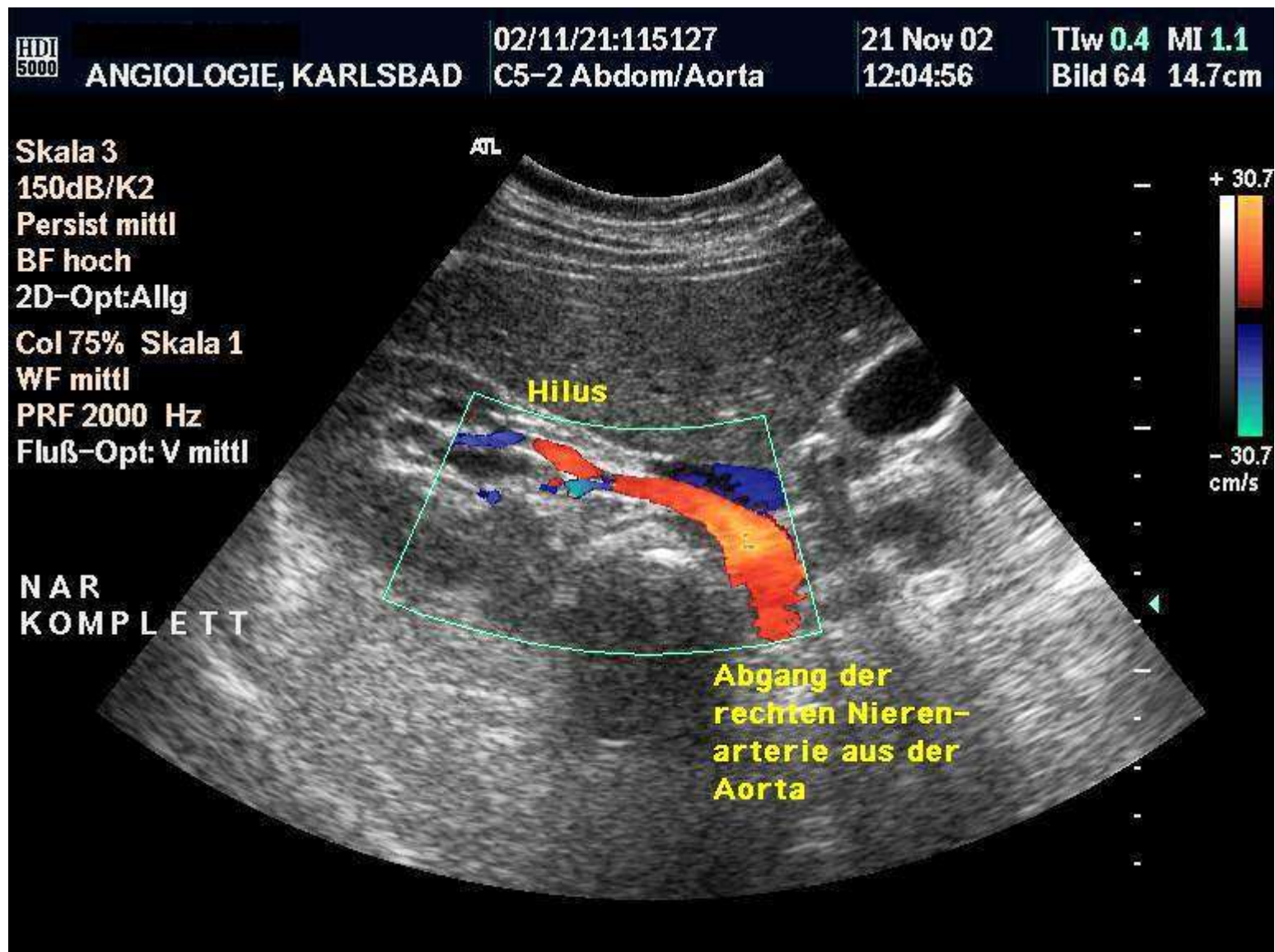
**BART: Blue Away Red Towards**



**Ergebnis:** die *räumliche Verteilung* der mittleren Geschwindigkeit und seiner Richtung im durchströmten Gefäss.

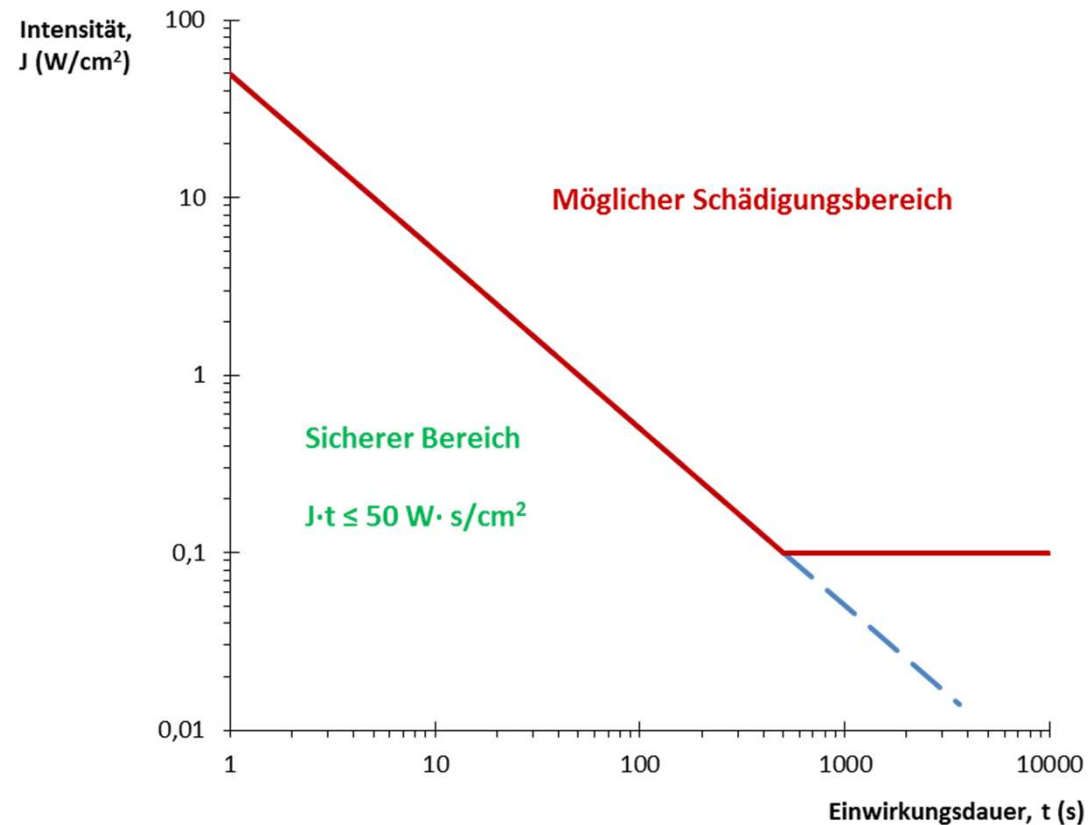






Komplette duplexsonographische Darstellung einer rechten Nierenarterie

# SICHERHEITSASPEKTE



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

## 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)

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

Übliche Werte:

Betriebsfrequenz: 800 kHz,

Maximalintensität: einige W/cm<sup>2</sup>.