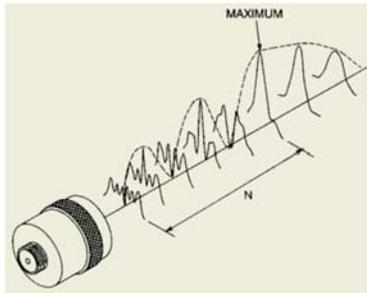
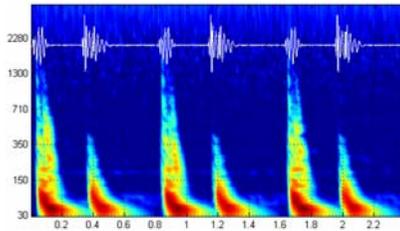


# Physik der Sonographie



KAD 2018.04.23

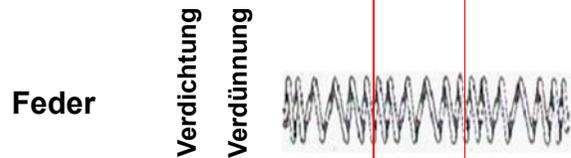


Frage in einer Kneipe: Wieviel wein befindet sich in dem Fass? Ist es bis zum rand voll, halb gefüllt oder fast leer? Medizinische Frage: Wieviel Luft befindet sich in der Lunge?

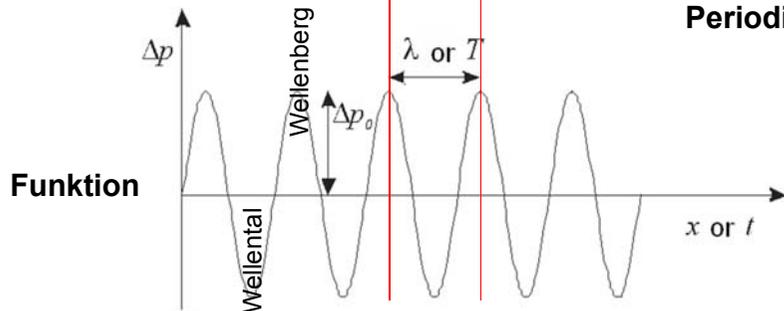
Auenbrugger (Mediziner, Sohn eines Gastwirtes, Graz, 1761): **Perkussion:** Untersuchung von Luftgehalt der hohlen Organe



## Schall: mechanische Welle (Model)



Räumliche und zeitliche Periodizität



Longitudinalwelle (keine Scherkräfte in Gasen und Flüssigkeiten → nur dieses Typ)



Transversalwelle

hydrostatischer Druck + Druckveränderung, Schalldruck

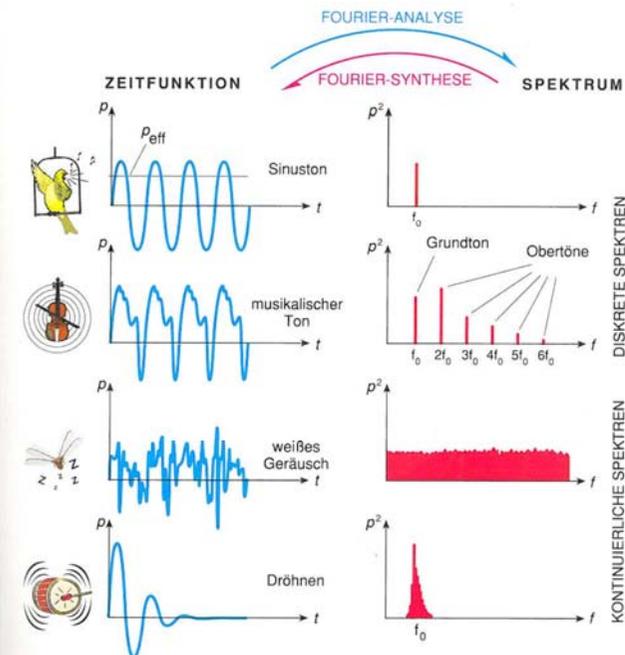
$$p_{\text{total}} = p_{\text{hydrostat}} + \Delta p$$

Druck DC + AC Amplitude Phase

$$\Delta p(t, x) = \Delta p_{\text{max}} \sin \left[ 2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right) \right]$$

$$c \cdot T = \lambda, \quad c = f \cdot \lambda$$



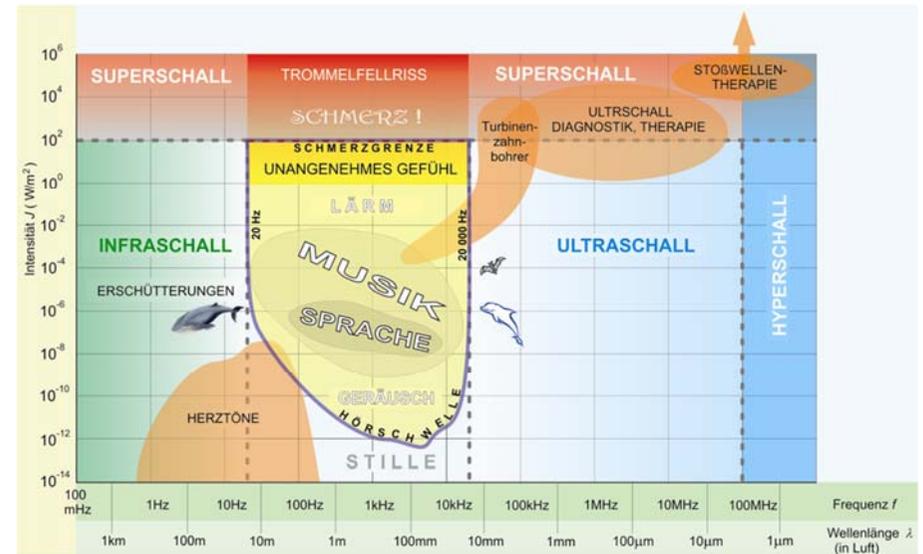


Lehrbuch, Abb. IV.23.

**Tonhöhe:**  
Frequenz der  
Grundschiwingung

**Klangfarbe:**  
Verhältnis der  
Obertöne  
(Spektrum)

## Frequenz und Intensitätsbereiche der Schallwellen



Prakt.Buch, Audiometrie.

## Die Rolle des elastischen Mediums

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

**Kompressibilität,**  
relative Volumen-  
verminderung geteilt durch Druck



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

Fortpflanzungsgeschwindigkeit

$$Z = \frac{\rho}{v} = \frac{\rho_{\max}}{v_{\max}}$$

akustische **Impedanz,**  
Wellenwiderstand  
(Definition)

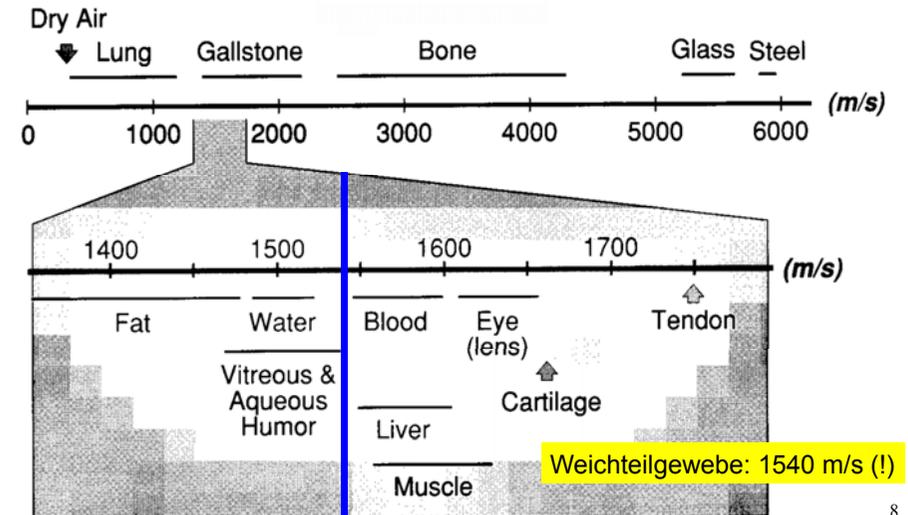
$$Z_{el} = \frac{U}{I}$$

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

akustische **Impedanz**  
(nützliche Form)



## Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Ultraschalls in verschiedenen Medien (Organen, Geweben)



## Intensität des Ultraschalls

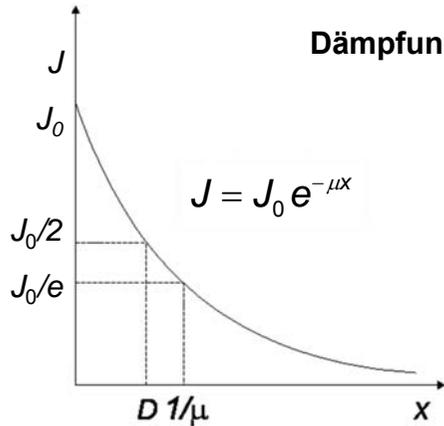
$$J = \frac{1}{Z} \Delta p_{\text{eff}}^2$$

Intensität =  
Energie-Strom Dichte

$$P_{\text{el}} = \frac{1}{Z_{\text{el}}} U_{\text{eff}}^2$$

elektrische Analogie

## Energieverlust während der Fortpflanzung (Absorption)



**Dämpfung:**  $\alpha = 10 \cdot \lg \frac{J_0}{J}$  dB

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

$\mu$  ist in dem diagnostischen Frequenzbereich proportional der Frequenz

**spezifische Dämpfung:**  $\frac{\alpha}{f \cdot x}$

9

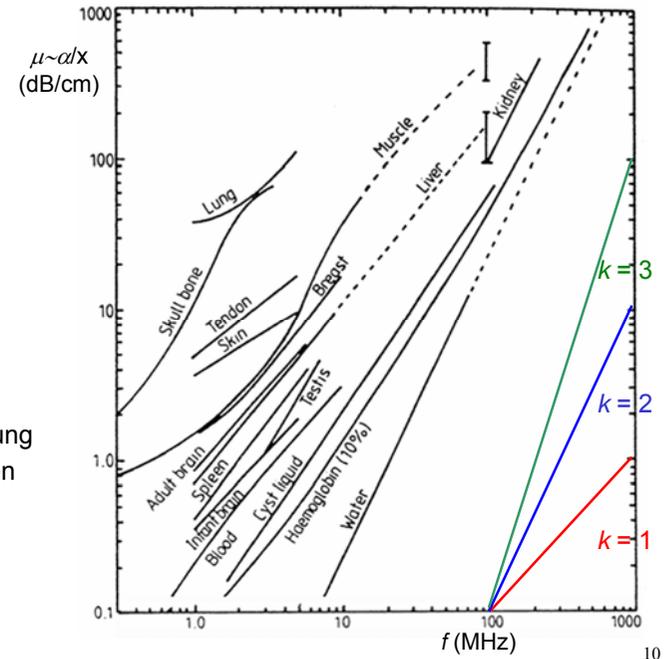
$\mu$  ist in dem diagnostischen Frequenzbereich proportional der Frequenz

$$\mu \sim f^k, \quad k \sim 1(?)$$

$$\log \mu \sim k \log f$$

spezifische Dämpfung in Weichteilgeweben (homogenes Gewebemodell):

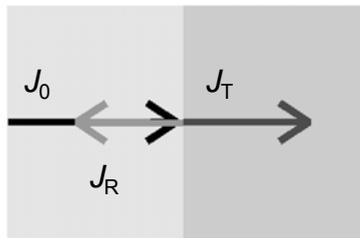
$$\frac{\alpha}{f \cdot x} \sim 1 \frac{\text{dB}}{\text{cm MHz}}$$



10

## Erscheinungen an der Grenzflächen

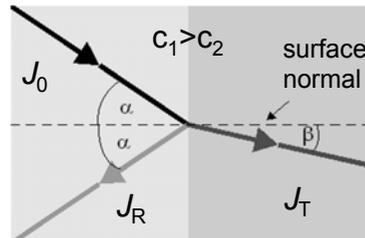
senkrechter Einfall



$$J_{\text{einfallende}} = J_t + J_{\text{reflektierte}}$$

Reflexion und Transmission

schräger Einfall



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

Snellius-Descartes

11

## Reflexion (für senkrechten Einfall)

**Reflexionskoeffizient:**

$$R = \frac{J_{\text{reflektierte}}}{J_{\text{einfallende}}} = \left( \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \right)^2$$

“totale” Reflexion:

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

optimale Kopplung:

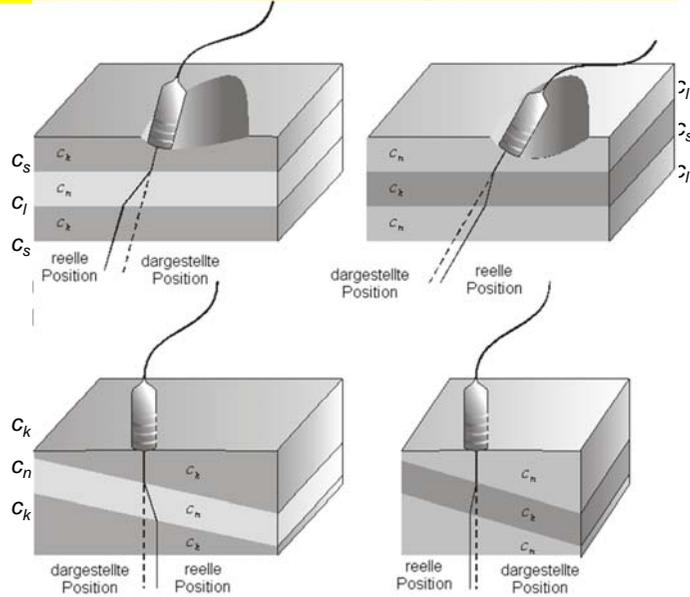
$$Z_{\text{Kopplungsm}} \approx \sqrt{Z_{\text{Quelle}} \cdot Z_{\text{Haut}}}$$



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

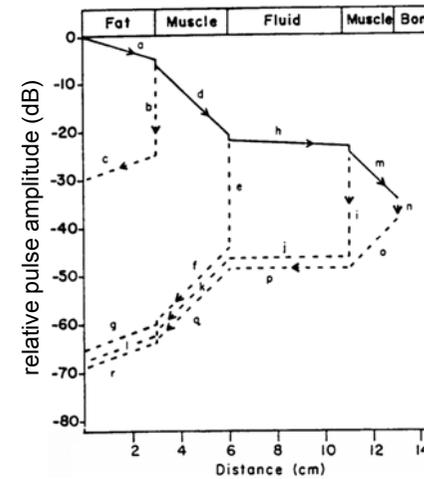
12

## Schräger Einfall bzw. schräge Grenzfläche



13

## Absorption und reflexion



je später/tiefer kommt die Reflexion zurück, desto schwächer ist die Reflektierte Intensität

reflexionszeitabhängige/ bildtiefenabhängige elektronische Verstärkung

TGC: time gain compensation  
DGC: depth gain compensation (Tiefenausgleich)

boundary surface	$R$	$10\lg R$ (dB)	$T$	$10\lg T$ (dB)
fat/muscle	0.01	-20.0	0.990	-0.044
muscle/blood	0.001	-30.0	0.999	-0.004
muscle/bone	0.41	-3.9	0.590	-2.291

14

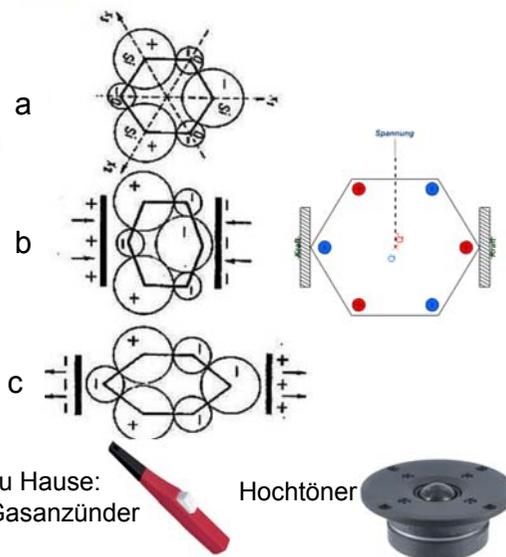
## Erzeugung des Ultraschalls. Piezoelektrischer Effekt

elektrische Signalquelle (Sinusoszillator)+ Wandler (Piezoelektrischer Kristall)

(a) Die Schwerpunkte der negativen und positiven Ladungen zusammenfallen.

(b) und (c) Wegen des Druckes die Schwerpunkte wird getrennt, entsteht eine Spannung.

Erzeugung: reziproker ~  
Detektierung: direkter ~



zu Hause:  
Gaszünder

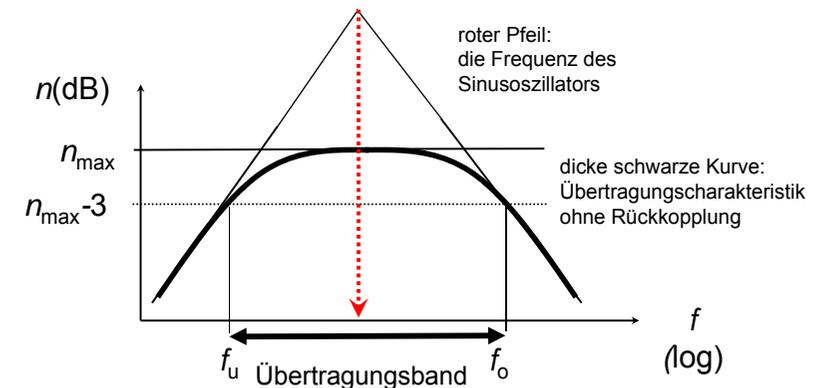
Hochtöner

## Elektrische Signalquelle: Sinusoszillator

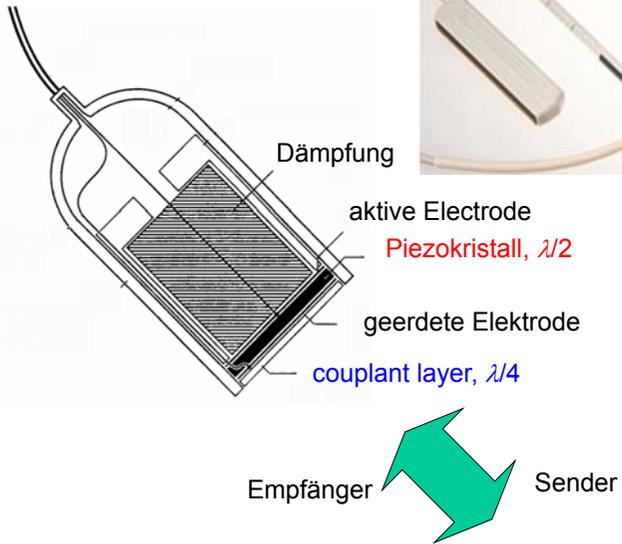
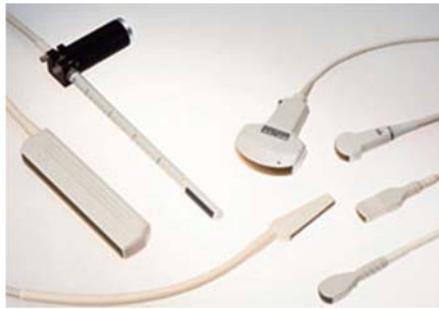
Mitkopplung (positiv rückgekoppelter Verstärker)

$$A_{U, \text{Rückkopplung}} = \frac{A_U}{1 - \beta A_U}$$

$\beta A_U = 1$ , Verstärkung: „unendlich“ – Sinusoszillator  
kein Eingangssignal, Ausgangssignal: Sinuswelle



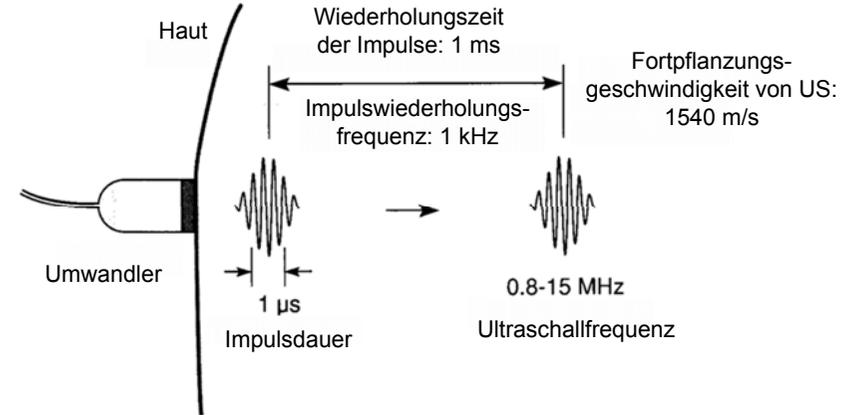
## Aufbau des Ultraschall-Wandlers



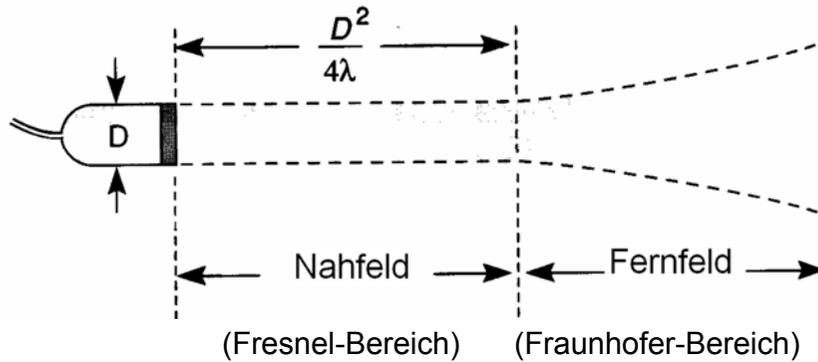
17

## Charakteristiken der Ultraschall-Impulse

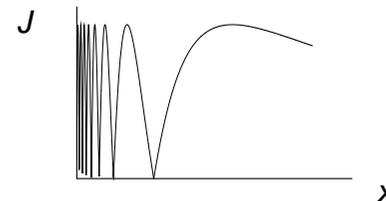
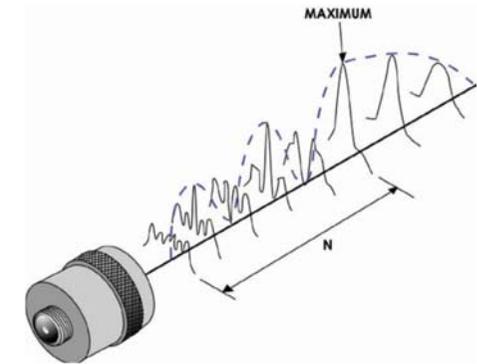
Transducer/Umwandler:  
 Sender und Empfänger dieselbe Einheit  
 zeitliche Trennung – anstatt der kontinuierlichen Welle nur  
 Impulse



## Bündelform des Ultraschalls (vereinfachtes Bild)

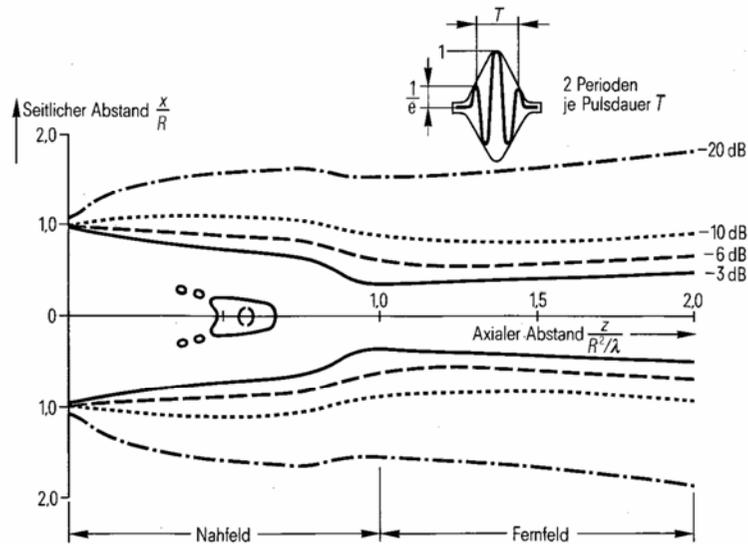


perspektives Bild des Ultraschall-Bündels



Intensitätsverteilung in axialer Richtung

Konturlinien gleicher Druckamplituden  
für einen ebenen, runden Wandler bei pulsformiger Anregung



**Auflösungsgrenze:** die kleinste auflösbare Entfernung  
**Auflösungsvermögen:** Kehrwert der Auflösungsgrenze

Die axiale Auflösungsgrenze  
(in Richtung der Strahlachse)  
hängt von der Impulslänge.

Die laterale Auflösungsgrenze  
(in Richtung senkrecht zur  
Strahlachse)

Die Impulslänge ist umgekehrt  
proportional zur Frequenz.

hängt von dem Durchmesser  
des Ultraschallbündels.

### Übliche Werte

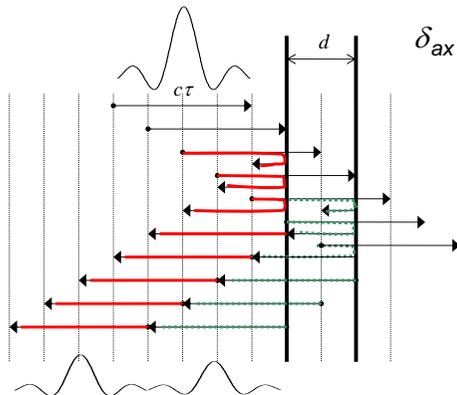
Frequenz (MHz):	2	15
Wellenlänge (in Muskulatur) (mm):	0.78	0.1
Eindringtiefe (einfach) (cm):	12	1.6
laterale Auflösungsgrenze (mm):	3.0	0.4
axiale Auflösungsgrenze (mm):	0.8	0.15

### Axiale Auflösungsgrenze

$\tau$ : Impulsdauer

$c_1 \tau \cong c_2 \tau = c \tau$  Impulslänge

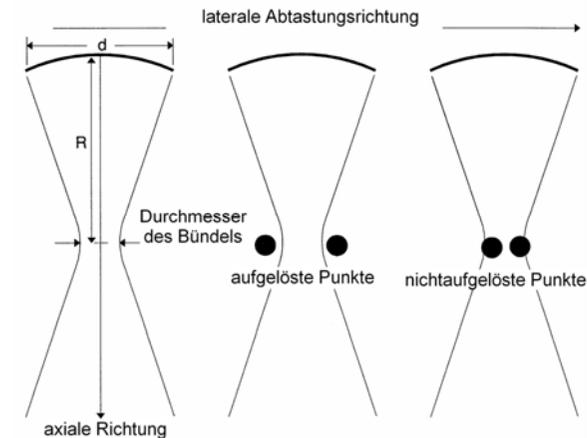
$\delta_{ax} = d = \frac{c \tau}{2}$  Auflösungsgrenze



Die Auflösungsgrenze  
ist gleich der Hälfte der  
Impulslänge, weil es  
keine Überlappung der  
Echosignale (roter Pfeil  
und grüner Pfeil) gibt.

$$\tau \sim T = \frac{1}{f}$$

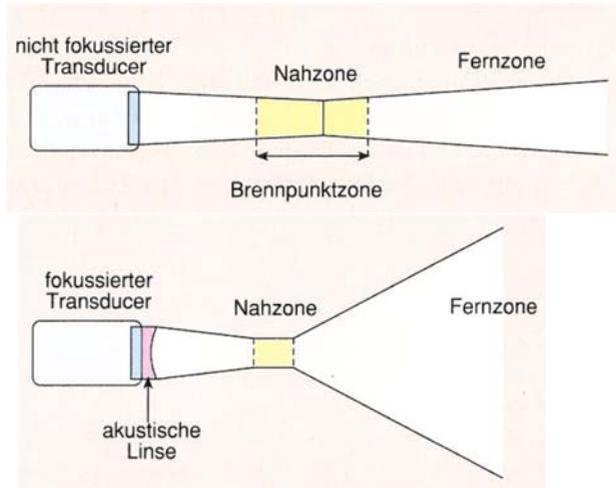
### Laterale Auflösungsgrenze



$$\delta_{lat} \sim \frac{R}{d} \cdot \lambda = f\# \cdot \lambda$$

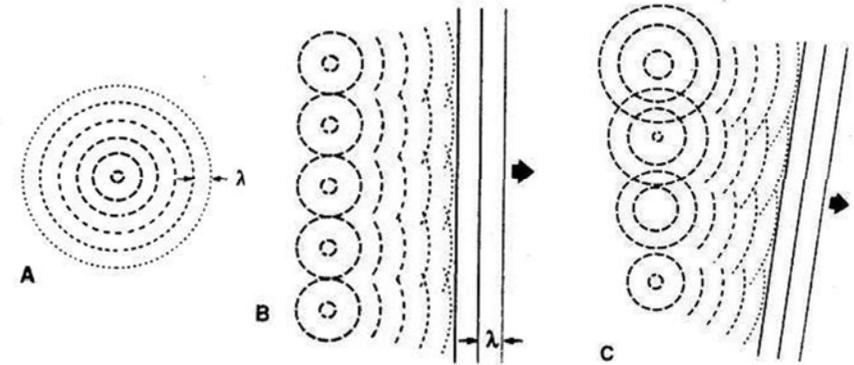
$f\#$  = f-Zahl: Verhältnis der  
Brennweite und des  
Durchmessers von Wandler

## Fokussierung



Bei der Fokussierung vergrößert sich die Divergenz des Bündels im Fernfeld und die **Schärfentiefe** verschlechtert.

## Huygens Prinzip



## Elektronische Fokussierung beim Senden

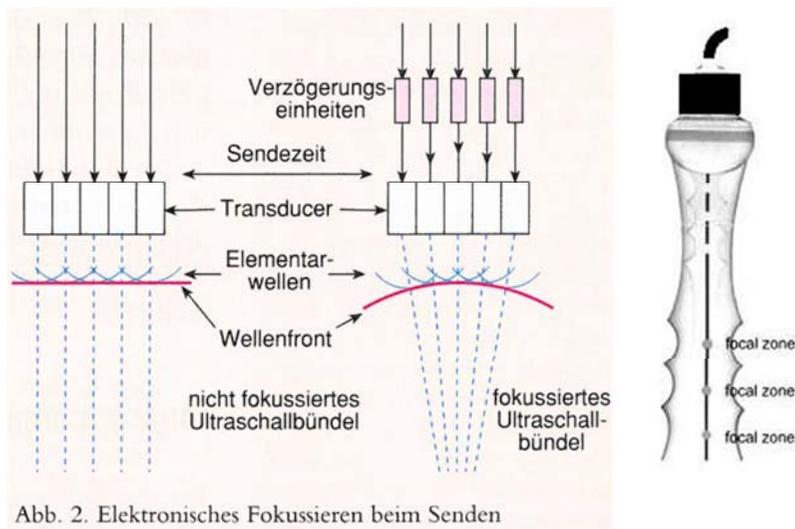


Abb. 2. Elektronisches Fokussieren beim Senden

## Elektronische Abtastprinzipien

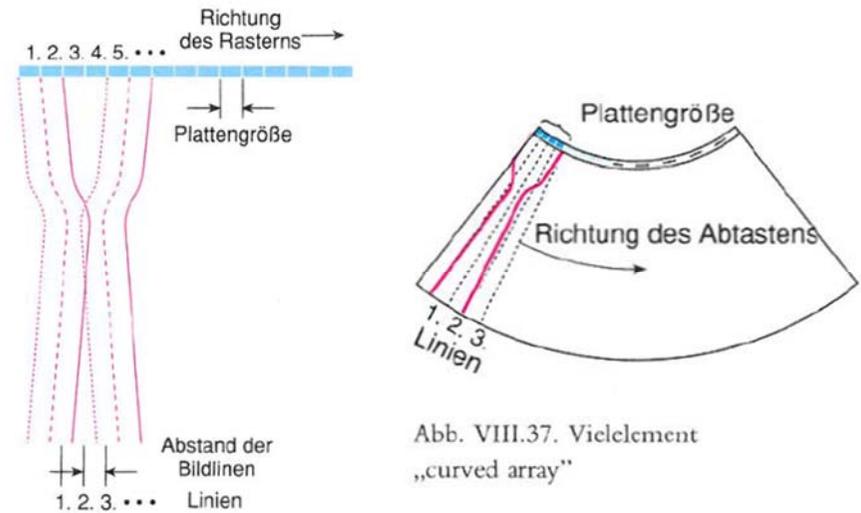
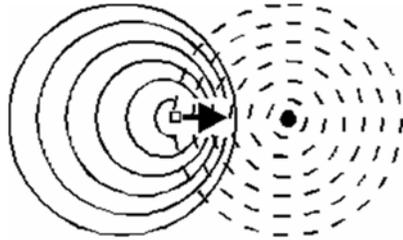
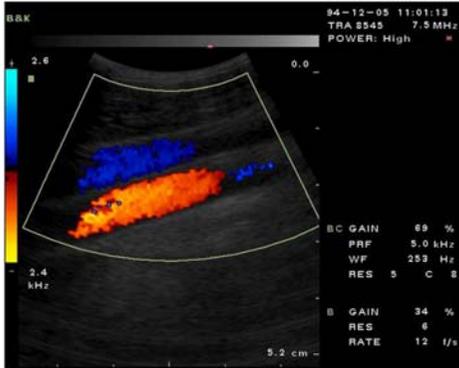


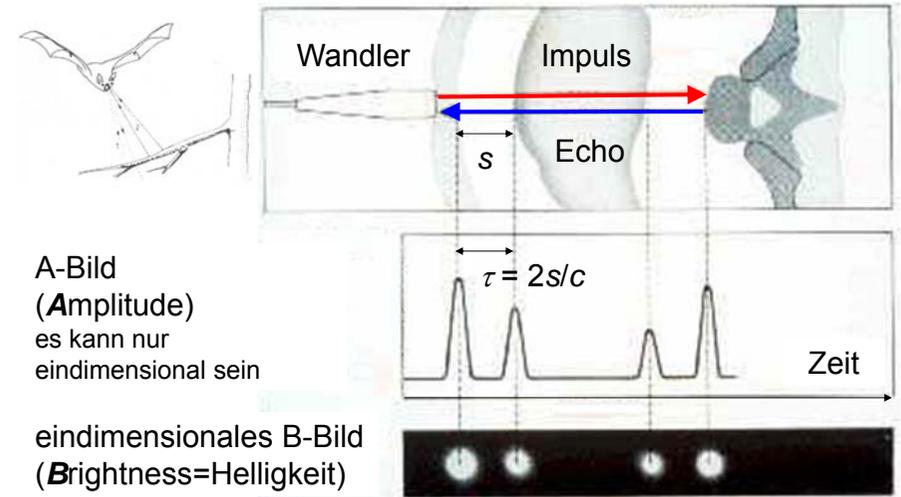
Abb. VIII.36. Vielelement „linear array“

Abb. VIII.37. Vielelement „curved array“

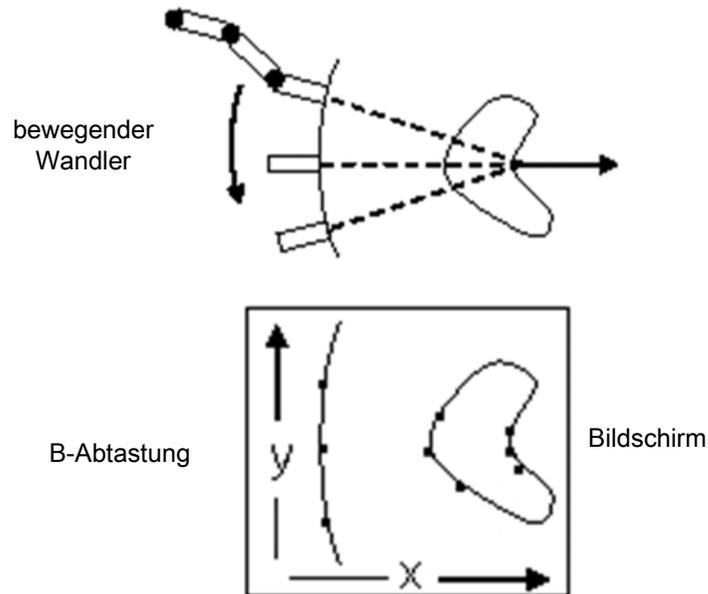
# Sonographie, A-, B- und M-Bilder. Doppler-Methode



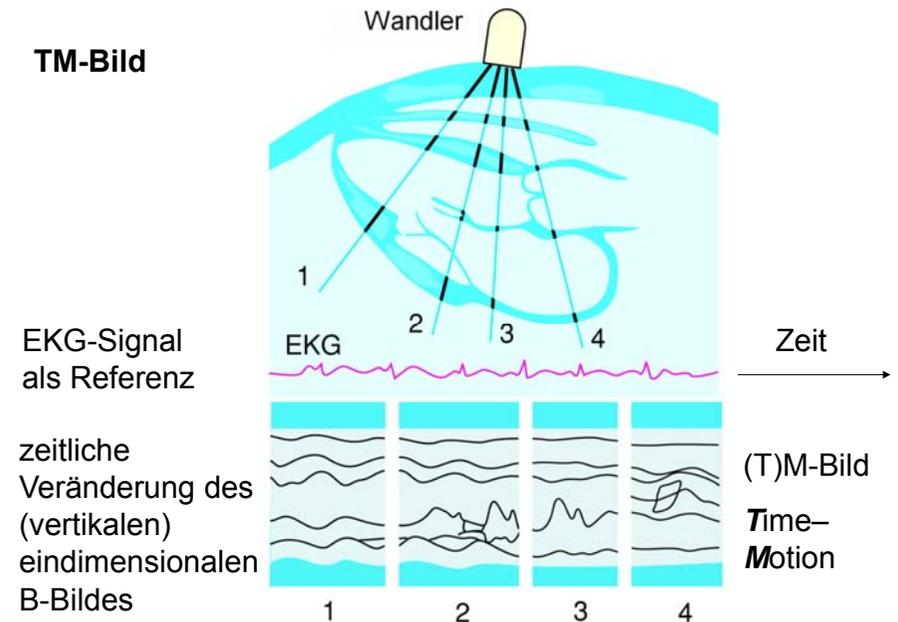
## Echo-Prinzip, US-Bilder



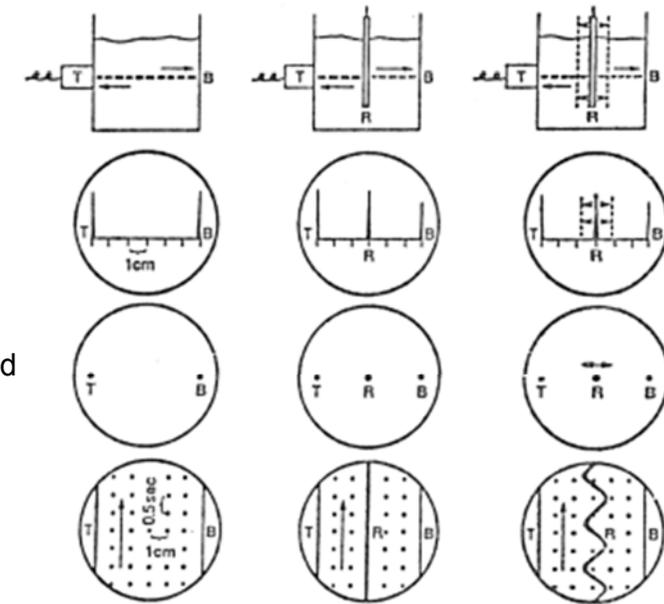
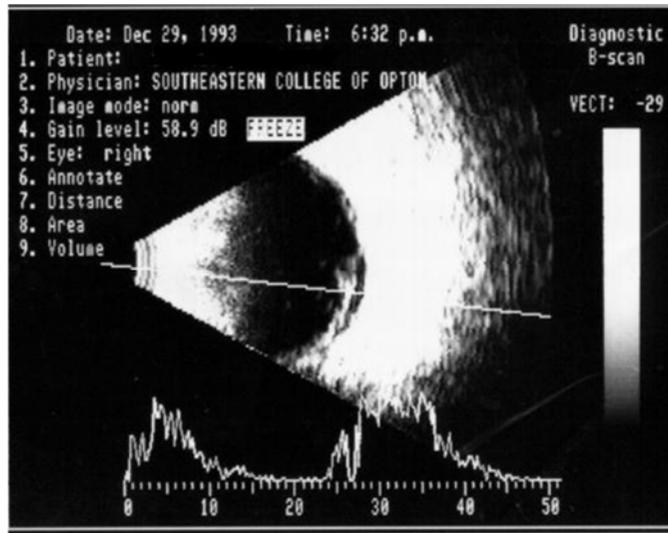
## Zweidimensionales B-Bild



## TM-Bild



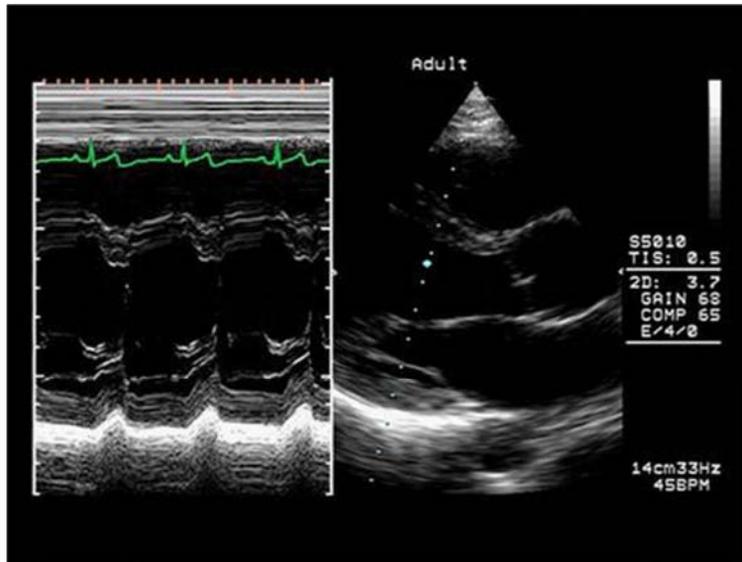
## Zweidimensionales B-Bild und A-Bild (ophtamologische Anwendung)



TM-Bild

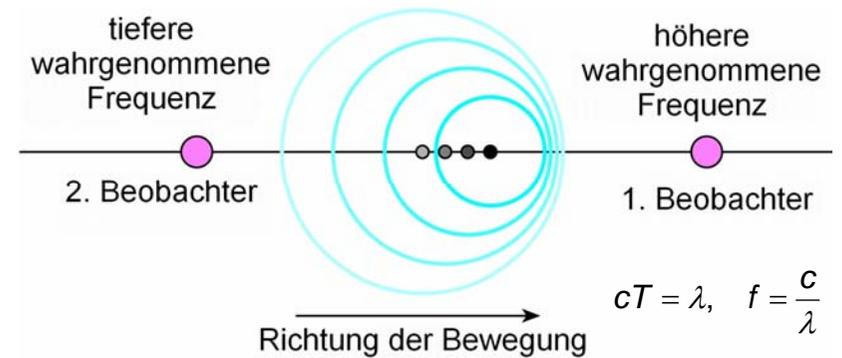
Echokardiographie

B-Bild



## Der Doppler Effekt

Nähern sich Beobachter und Quelle einander, so erhöht sich die Frequenz, im umgekehrten Fall verringert sich die Frequenz. Ein Beispiel ist die Tonhöhenänderung des Martinshorns eines Krankenwagens. (C. Doppler, 1842)



- (a) Signalquelle in Ruhe, Beobachter bewegt  
 +: Beobachter annähert sich zur Quelle  
 -: Beobachter entfernt sich von der Quelle

$$f' = f \left( 1 \pm \frac{v_B}{c} \right)$$

$$f' = \frac{f}{1 \pm \frac{v_Q}{c}}$$

- (b) Signalquelle bewegt, Beobachter in Ruhe,  
 (wenn  $v_Q \ll c$ , dann gleich wie (a))

$$f' = f \frac{1 \pm \frac{v_B}{c}}{1 \pm \frac{v_Q}{c}}$$

- (c) Signalquelle bewegt, Beobachter bewegt

- (d) bewegende Reflexionsobjekt/-fläche,  
 (wenn  $v_R \ll c$ )

$$f' = f \left( 1 \pm \frac{2v_R}{c} \right)$$

wenn  $v_i, v_R \ll c$  (i=B oder Q)

Umformung von (a)  
 die Doppler-Frequenzverschiebung  
 (Doppler-Frequenz,  $f_D$ )

$$\Delta f = f_D = \pm \frac{v_i}{c} f$$

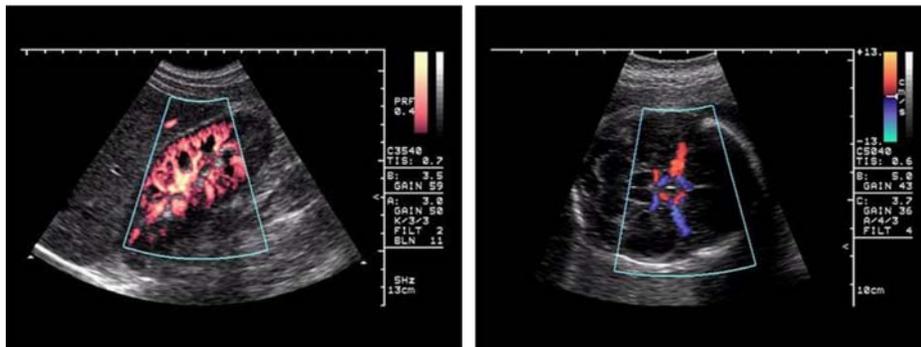
Umformung von (d)  
 die Doppler-Frequenzverschiebung  
 (Doppler-Frequenz,  $f_D$ )

$$\Delta f = f_D = \pm 2 \frac{v_R}{c} f$$

wenn  $v$  und  $c$  sind nichtparallele, dann anstatt von  $v$  die Projektion der Geschwindigkeit  $v \cos \theta$  ist gültig

### Farbkodierung

rot: Blutströmung mit Richtung auf den Wandler hin  
 blau: Blutströmung vom Schallwandler weg

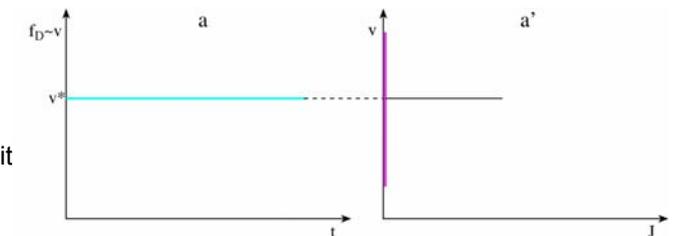


BART: Blue Away Red Towards

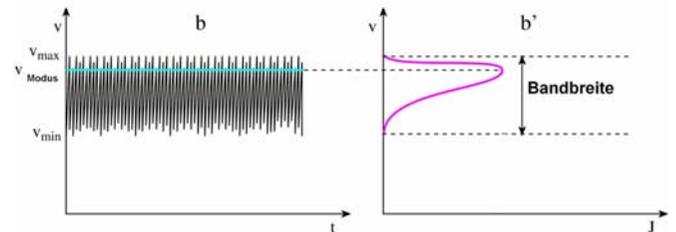
### Ergänzungsmaterial

### Doppler-Kurven

eine konstante Geschwindigkeit ( $v^*$ )



eine Geschwindigkeitsverteilung



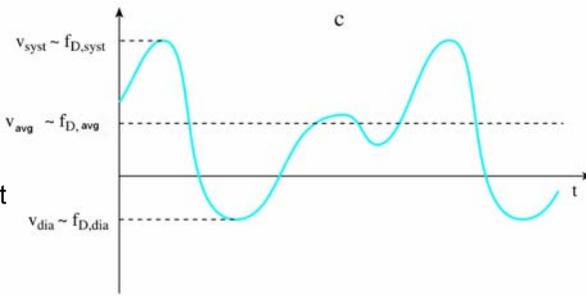
TM-Bild der Geschwindigkeitsverteilung

Verteilungsfunktion bei einer bestimmten Zeit

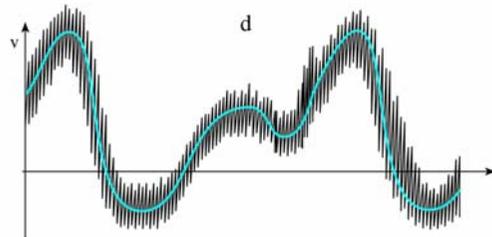
## Ergänzungsmaterial

### Doppler-Kurven

Strömung charakterisierbar bei allen Zeitpunkten mit einer Geschwindigkeit

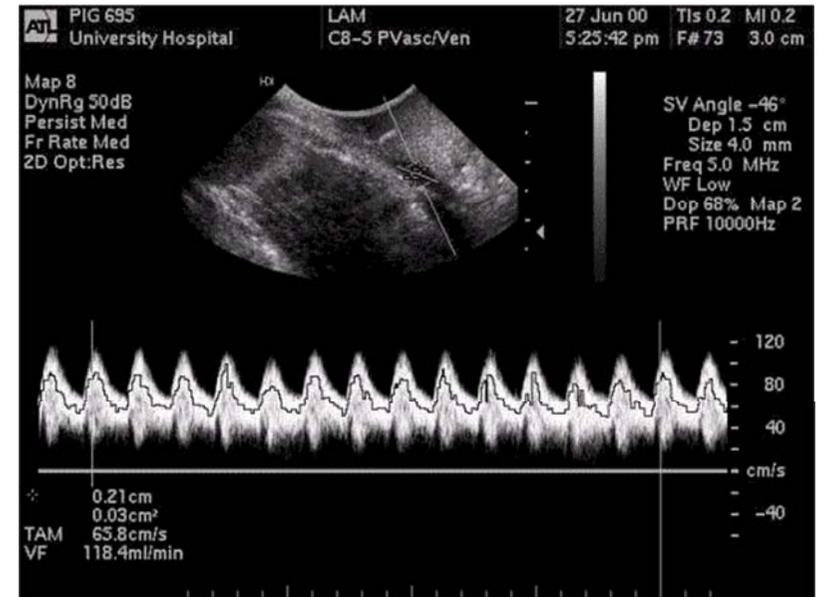


Strömung charakterisierbar bei allen Zeitpunkten mit einer Geschwindigkeitsverteilung

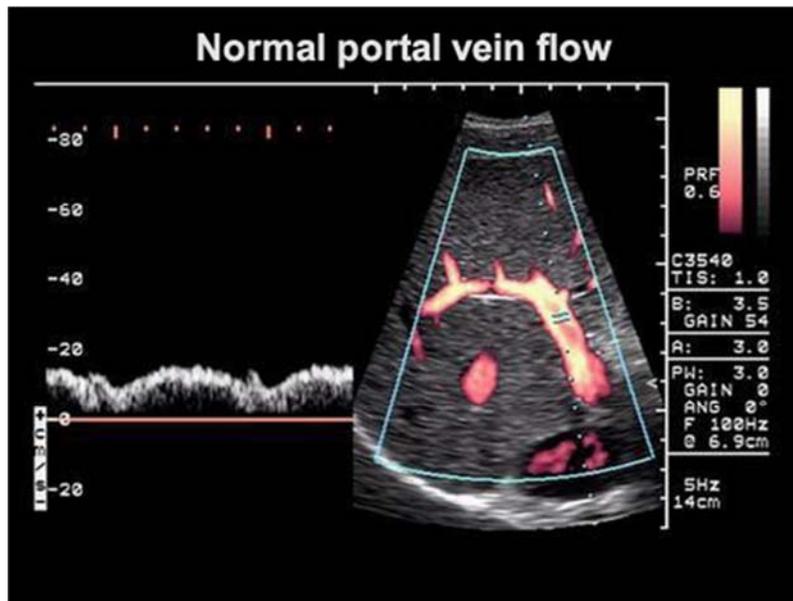


TM-Bild der Geschwindigkeitsverteilung

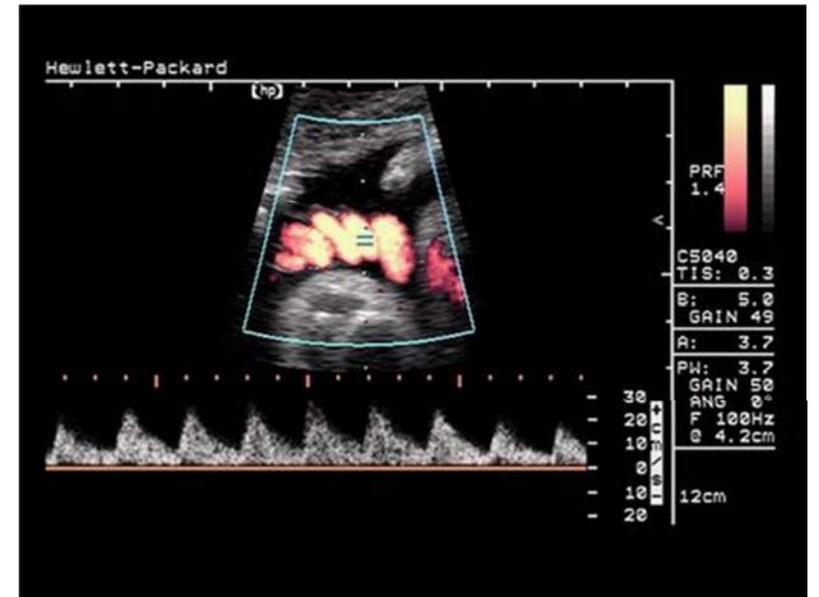
## Ergänzungsmaterial



## Ergänzungsmaterial

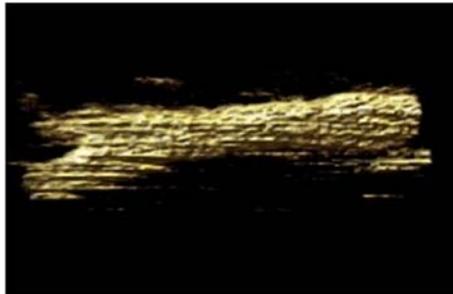


## Ergänzungsmaterial

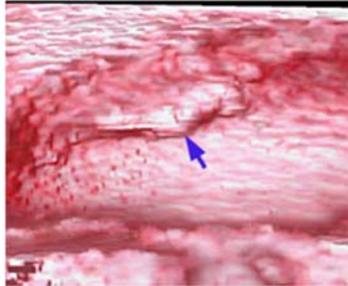


### 3D Rekonstruktion

Halsarterie



### Harnblase



### Sicherheit

in der Diagnostik:

$$10 \text{ mW/cm}^2 = 100 \text{ W/m}^2$$

vgl. Schmerzgrenze:  $10 \text{ W/m}^2$

in der Therapie:  $1 \text{ W/cm}^2$

- spatial average temporal average (SATA) intensity;
- spatial peak temporal peak (SPTP) intensity;
- spatial peak temporal average (SPTA) intensity;
- spatial peak pulse average (SPPA) intensity;
- spatial average pulse average (SAPA) intensity

