

Schallwellen

Wellengleichung:
$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = c^2 \cdot \frac{\partial^2 p}{\partial x^2}$$

Schallgeschwindigkeiten:		c [m/s]
	Luft	331
	Wasser	1492
	Fett	1470
	Hirn	1530
	Muskel	1568
	Knochen	3600

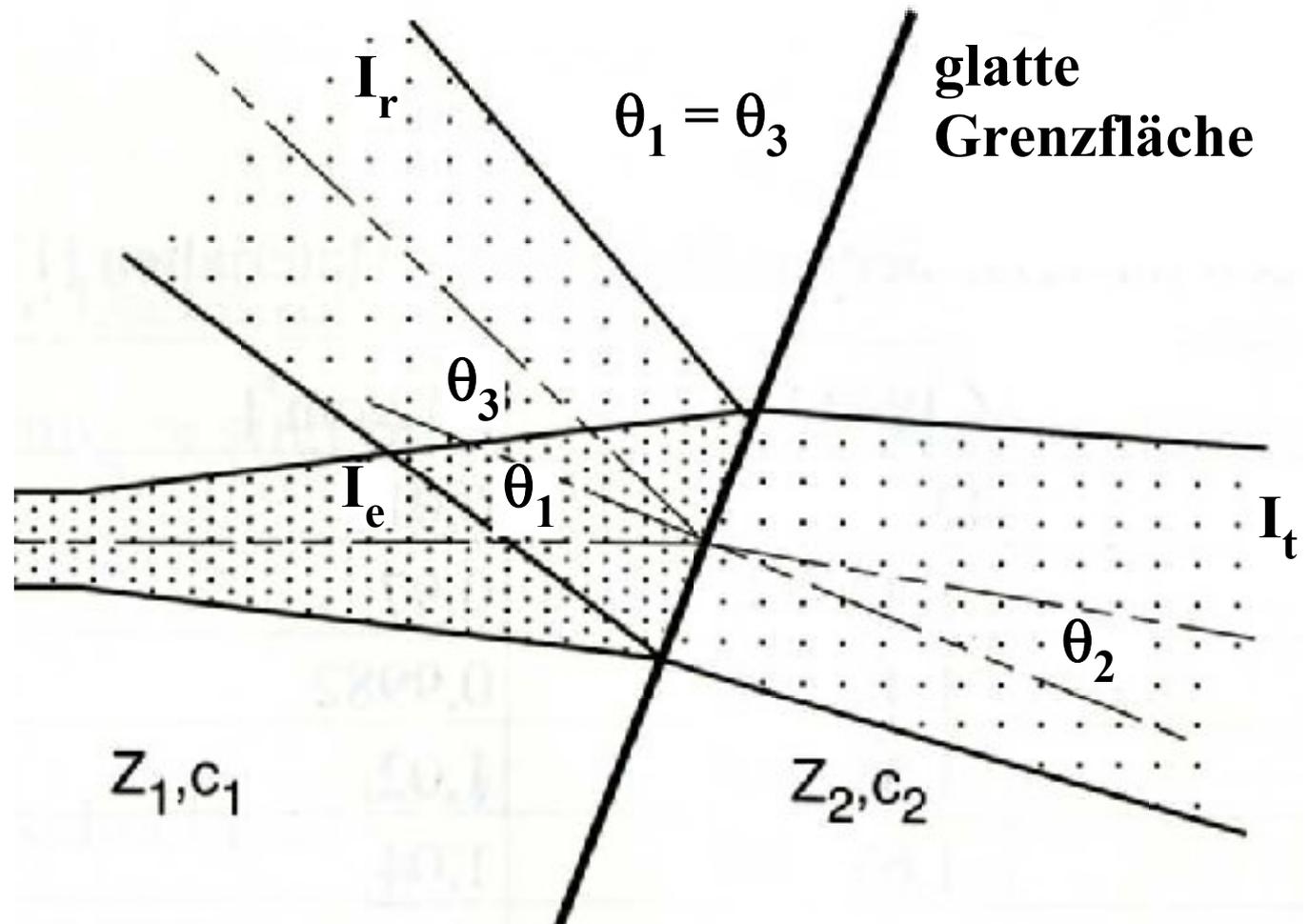
Typische Werte für Diagnostik:	v	1 MHz ... 40 MHz
	j	100 mW/cm²
	p	< 0.6 Pa
	A₀	< 2 μm
	v₀	< 3.5 cm/s

Schallimpedanz

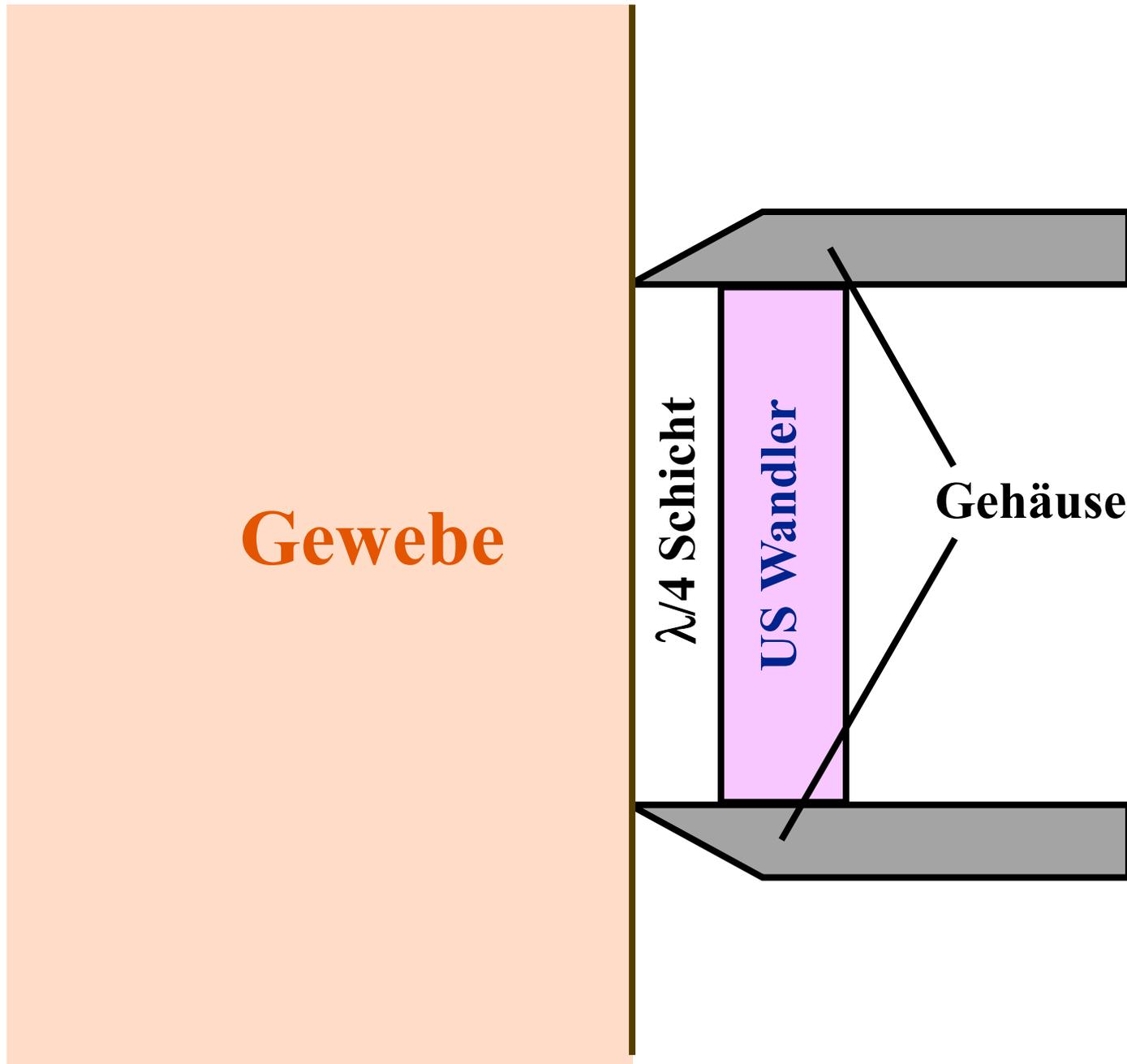
Typische Zahlenwerte:

	c [m/s]	Z [g cm⁻² s⁻¹]	ρ_0 [g/cm³]
Luft	331	43	0.0013
Wasser	1492	$1.48 \cdot 10^5$	0.9982
Fett	1470	$1.42 \cdot 10^5$	0.97
Hirn	1530	$1.56 \cdot 10^5$	1.02
Muskel	1568	$1.63 \cdot 10^5$	1.04
Knochen	3600	$6.12 \cdot 10^5$	1.7

Reflexion und Brechung

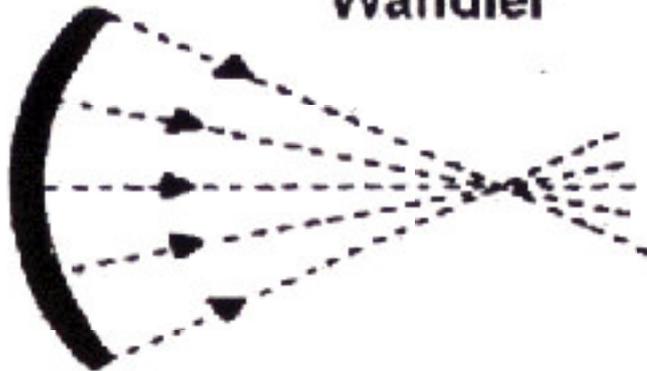


Anpassung Ultraschallwandler

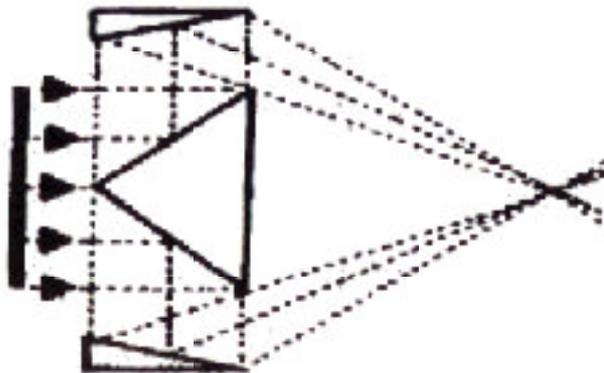
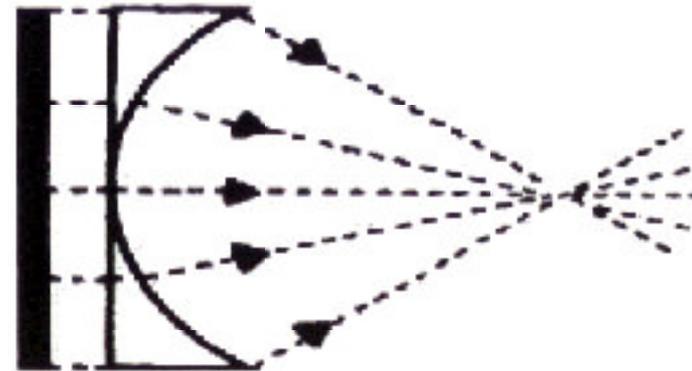


Fokussierung

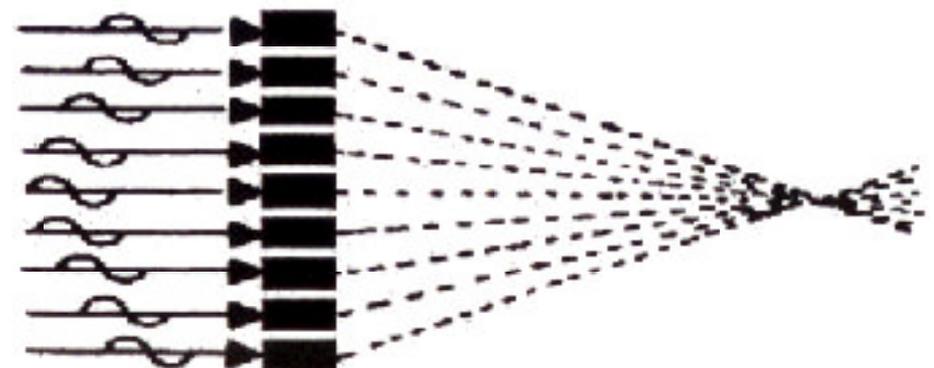
Spärischer
Wandler



Linse



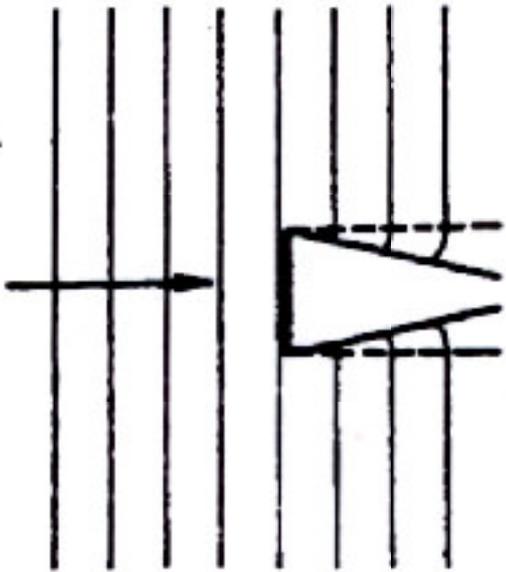
Reflektor



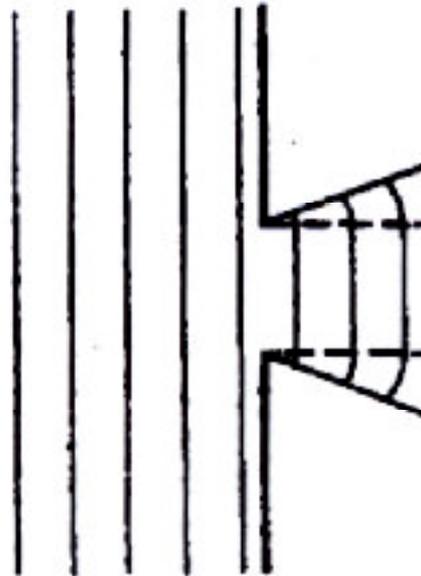
elektrische
Fokussierung

Beugung

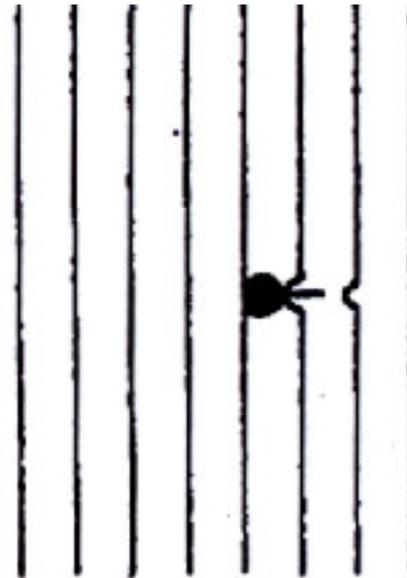
Hindernis



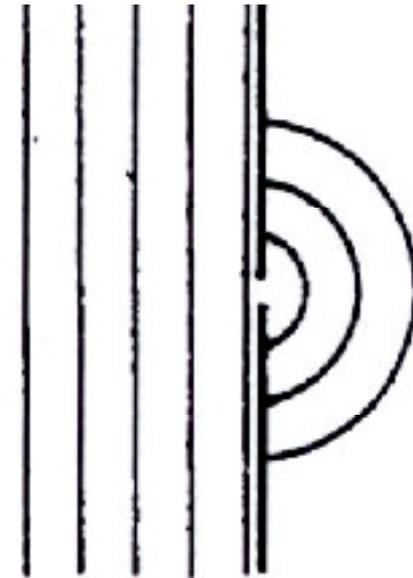
Spalt



Draht

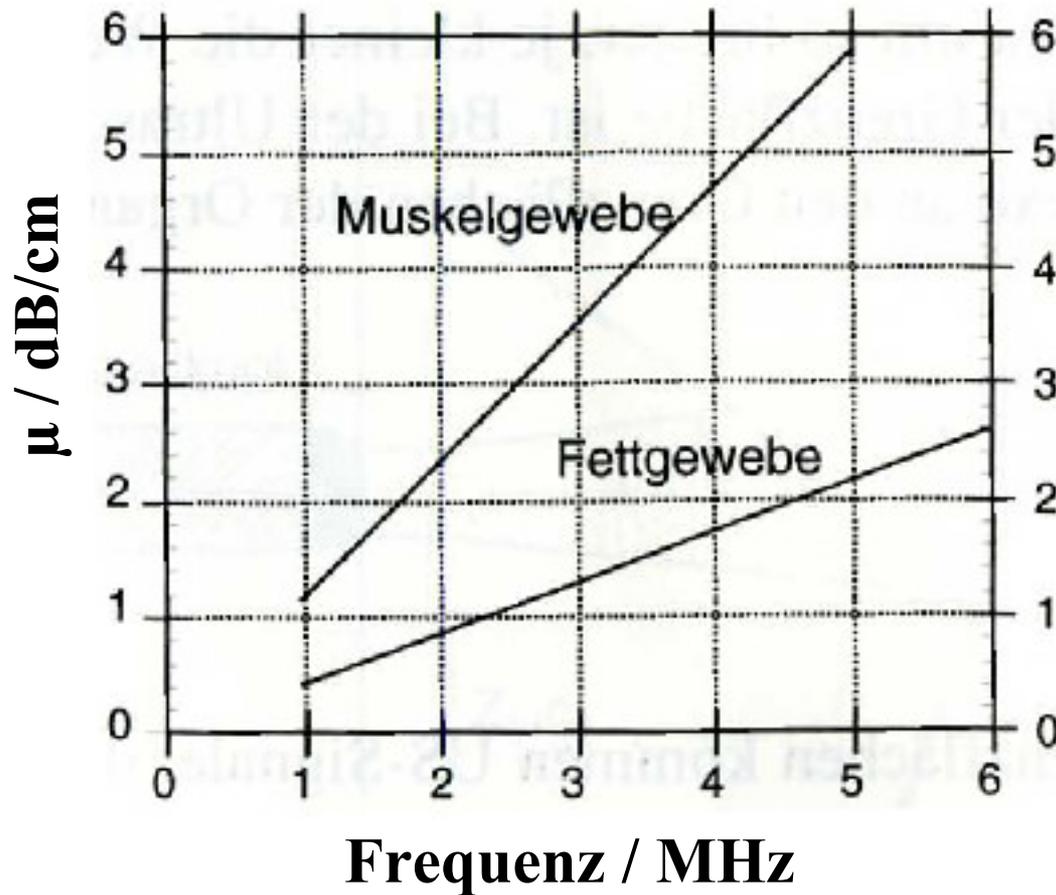


Elementarwelle

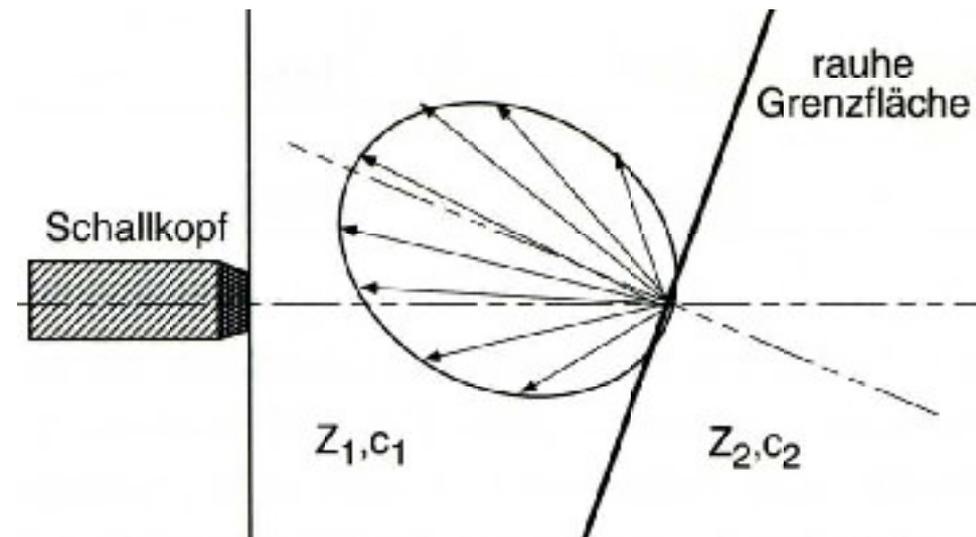


Absorption

Schwächung (Absorption + Streuung)



Streuung an Rauigkeiten

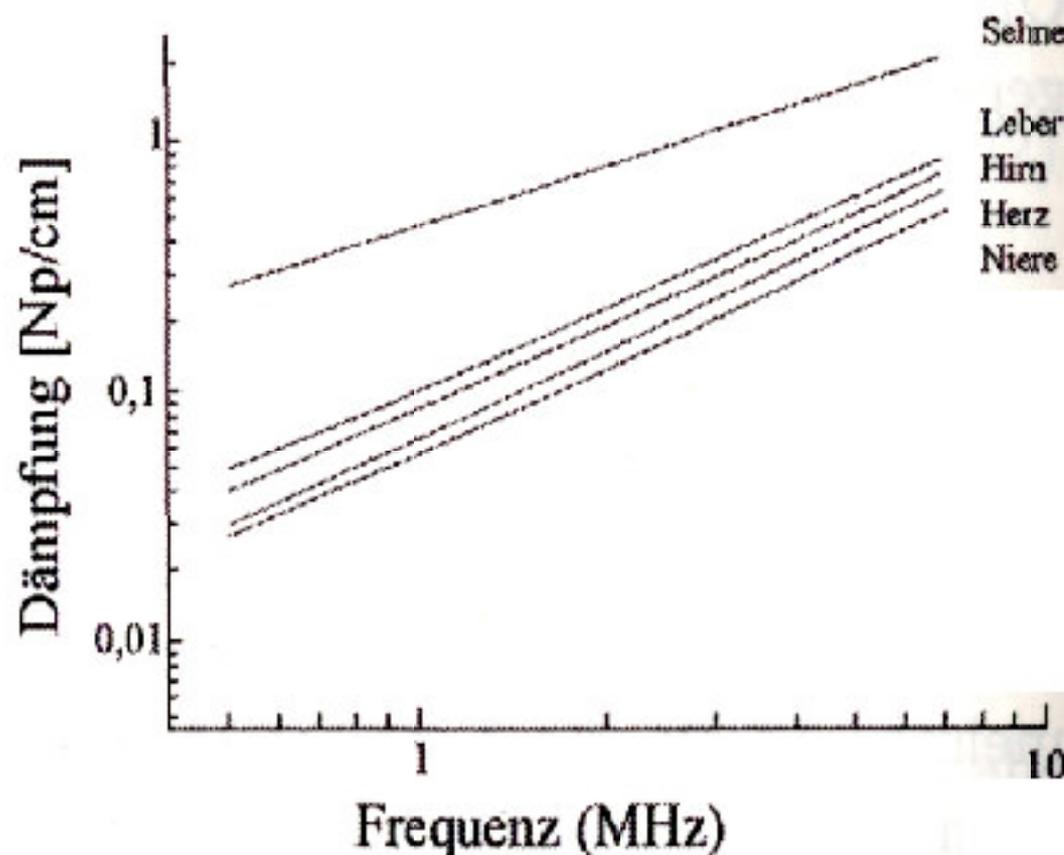


Frequenzabhängigkeit

Bereich	ν -Abhängigkeit	Stärke der Streuung	Beispiel
Geometr. $a \gg \lambda$	ν^α	stark	Gefäße
Stochast. $a \approx \lambda$	unterschiedlich	mittel	Leber
Rayleigh $a \ll \lambda$	ν^4	schwach	Blut

ν [MHz]	Eindring- tiefe [cm]	Anwendung
1	50	
3.5	15	Fötus, Leber
5	10	Gehirn
7.5	7	Prostata
10	5	Pankreas
20	1.2	Auge, Haut
40	0.6	Intravaskulär

Auflösung $\sim 1/\nu$



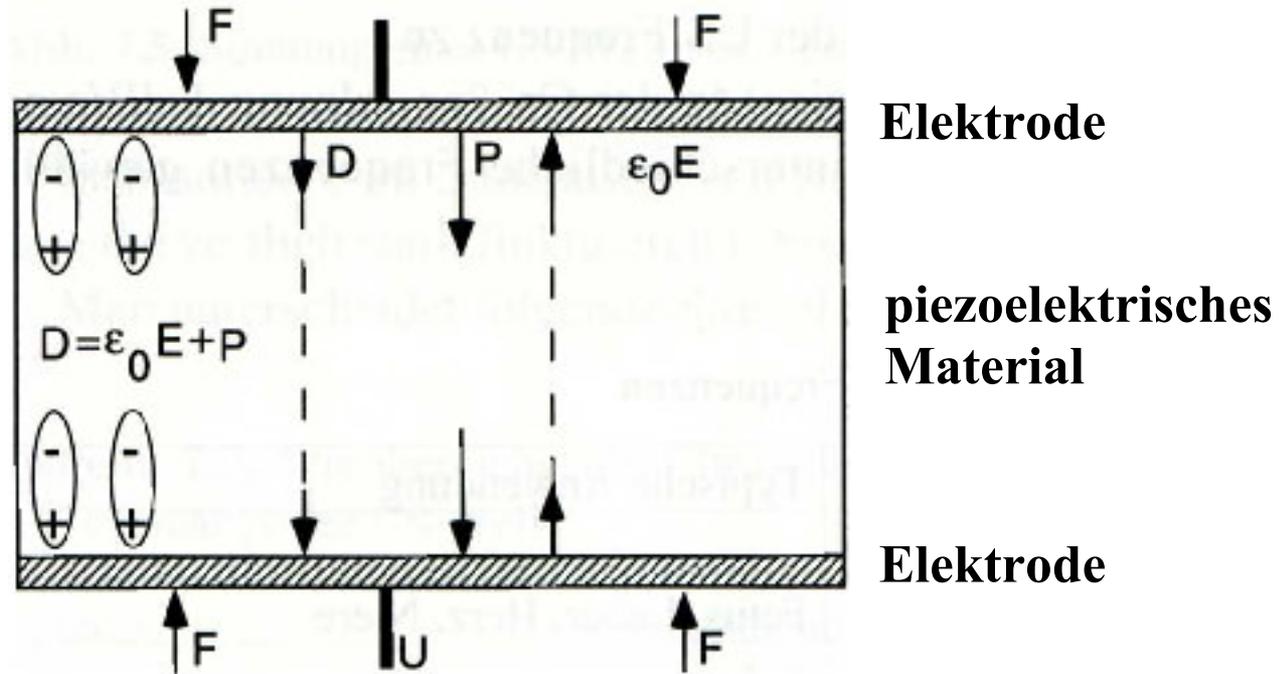
Erzeugung von Ultraschall

Ultraschallwandler = Sender und Empfänger

Sender
elektrisches Feld \vec{E}
erzeugt Dehnung

$$\frac{\Delta L}{L} = d|\vec{E}|$$

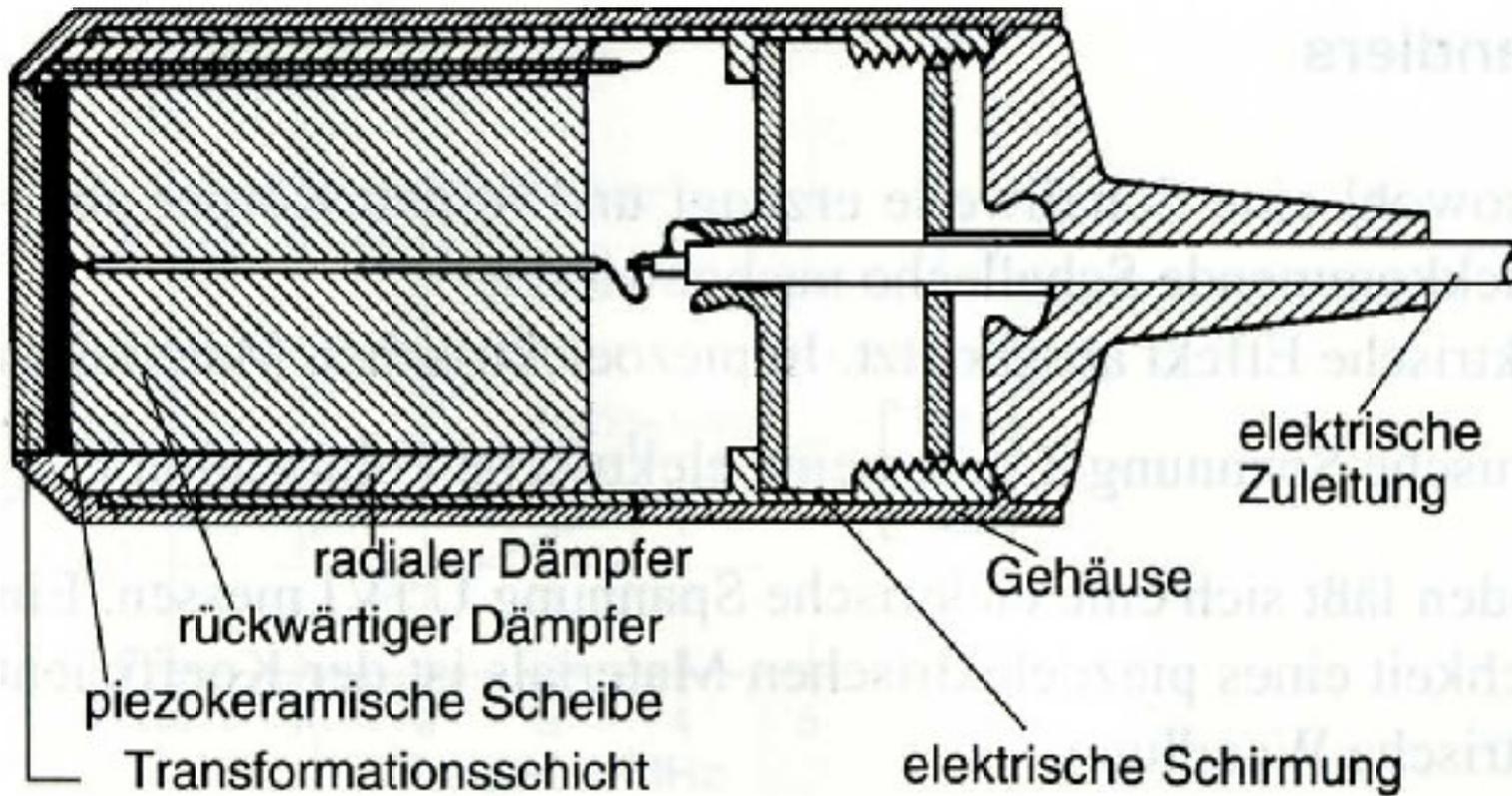
Empfänger:
mechanische Spannung S
erzeugt Polarisation P .
Daraus Spannung $U = gS$



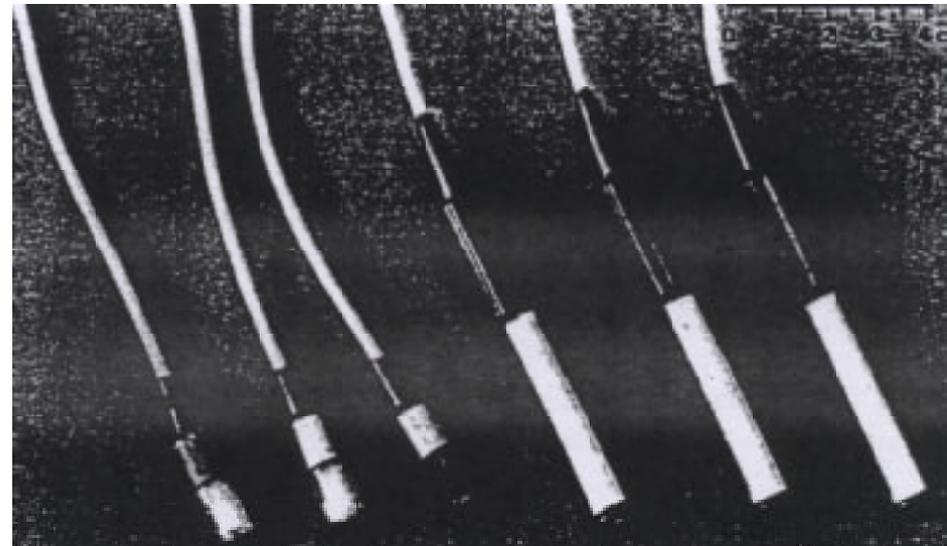
g = elektroakustischer Wandlungskoeffizient

	d [m/V]	g [Vm ² /N]
Quarz	$2.3 \cdot 10^{-12}$	$57 \cdot 10^{-3}$
Bariumtitanat	$150 \cdot 10^{-12}$	$17 \cdot 10^{-3}$
Blei-Zirkon-Titanat	$150 \dots 600 \cdot 10^{-12}$	$20 \dots 40 \cdot 10^{-3}$

Aufbau eines Wandlers



unterschiedliche Messköpfe
links: Biometrie-Messköpfe
rechts: Normalschallköpfe



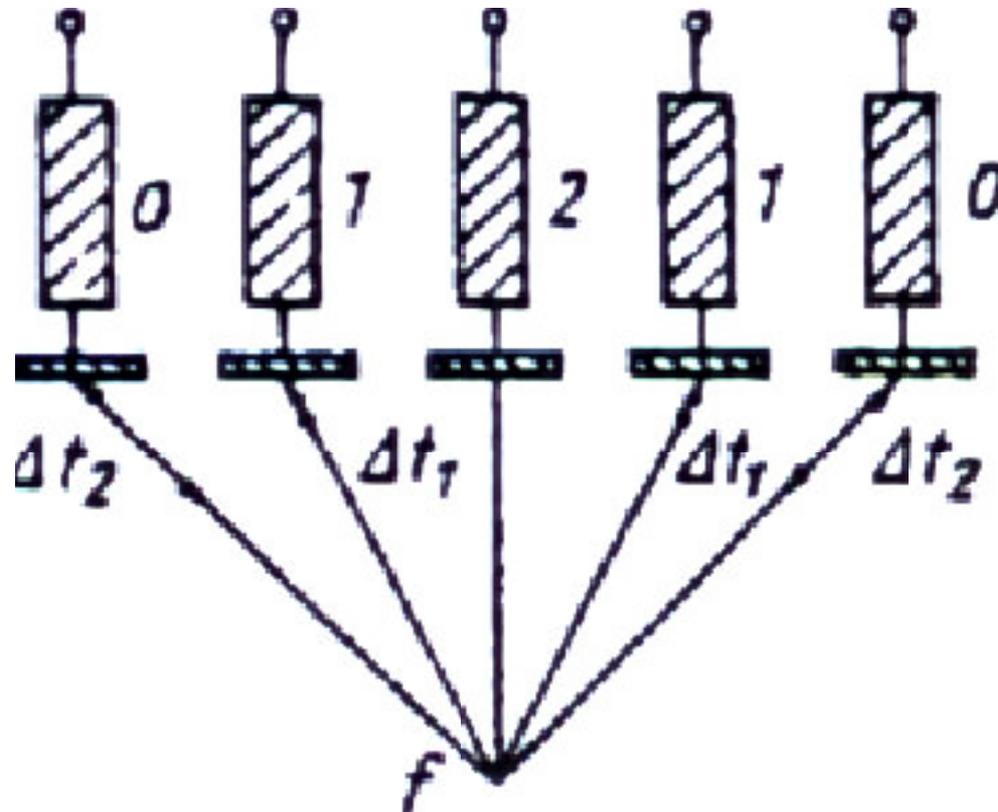
Multiementwandler

Phasenarray: Steuerung in 1 Dimension

Anregungsimpulse

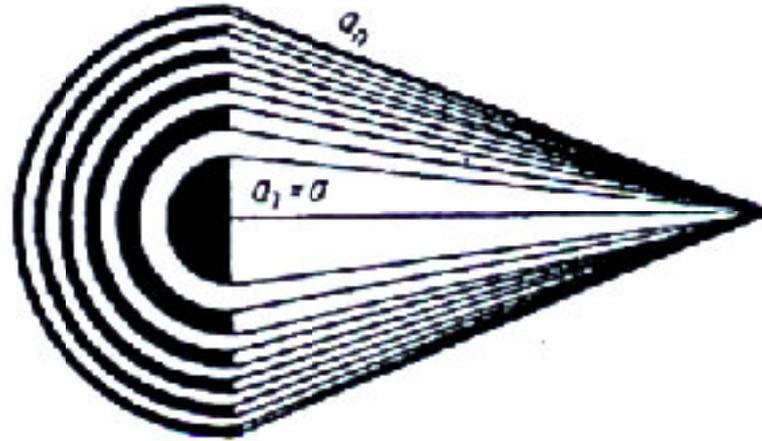
Verzögerungsleitungen

Wandler



Die einzelnen Elemente werden phasenverzögert angeregt.
Durch die Wahl der Verzögerung wird der Fokus festgelegt.
Fokussierung senkrecht zur Ebene kann mit Linsen erfolgen.

Fresnelsche Zonenplatte



Radius der Ringe zur Schallabstrahlung:

$$r_n = \sqrt{nb\lambda}$$

b = Fokusabstand

λ = Wellenlänge

Bsp.:

$$r_1 = 6,1;$$

$$r_2 = 8,7;$$

$$r_3 = 10,6;$$

$$r_4 = 12,2;$$

$$r_5 = 13,7;$$

$$r_6 = 15,0;$$

$$r_7 = 16,2;$$

$$r_8 = 17,3;$$

$$r_9 = 18,4;$$

$$r_{10} = 19,36;$$

$$r_{11} = 20,3;$$

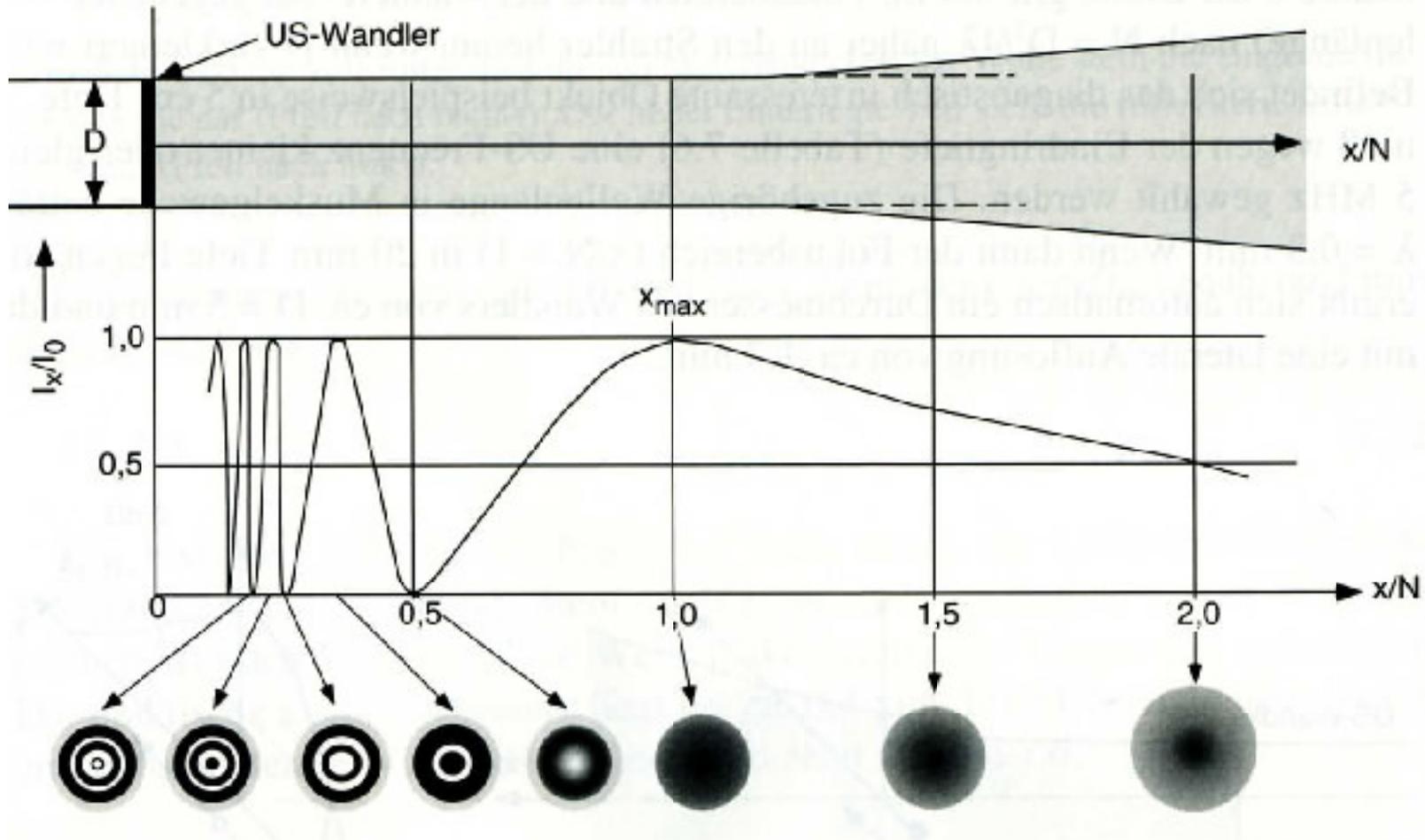
$$f = 50 \text{ mm},$$

$$\lambda = 0,75 \text{ mm},$$

$$f = 2 \text{ MHz}$$

Schallfeld des Wandlers

Schallfeld eines kreisförmigen Wandlers



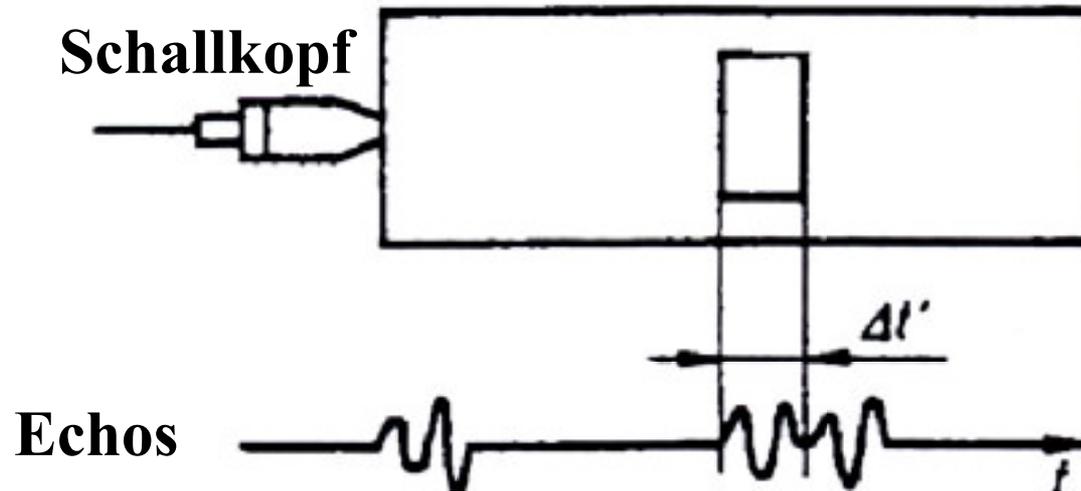
Nahbereich

Formbereich

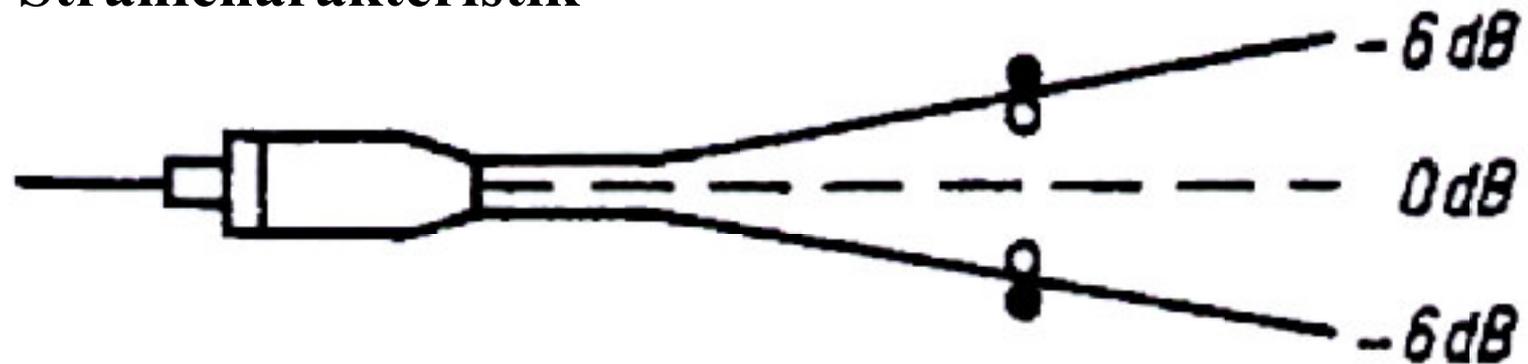
Fokusbereich

Auflösung

Axiale Auflösung



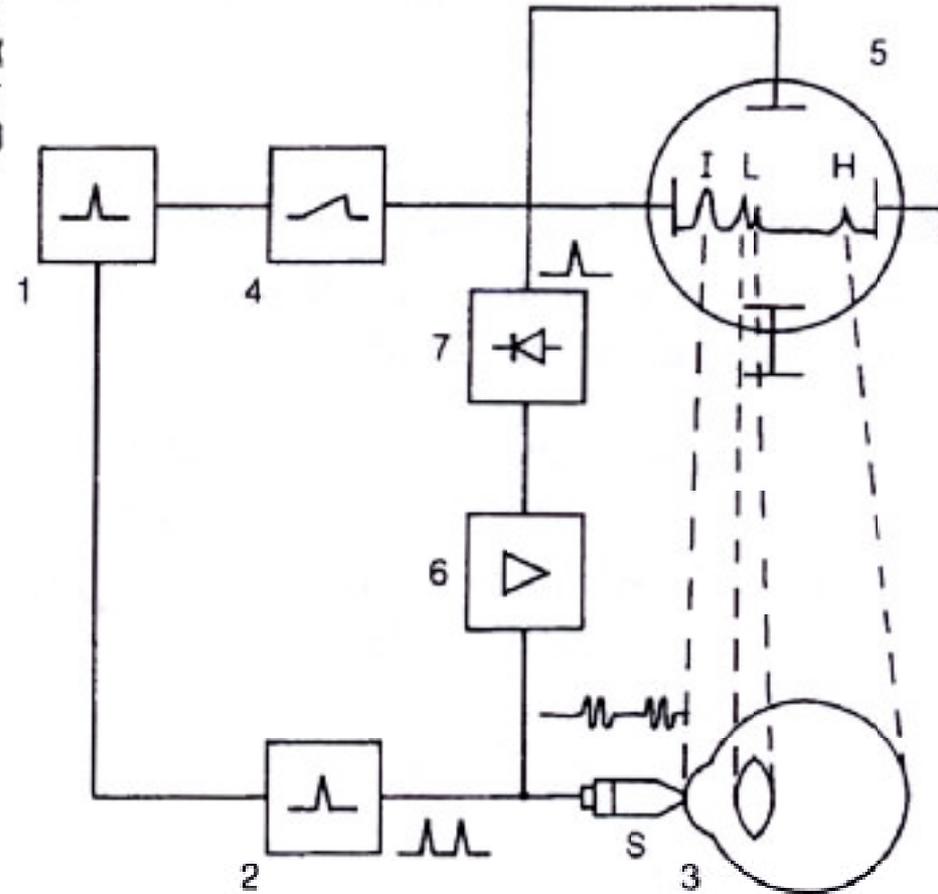
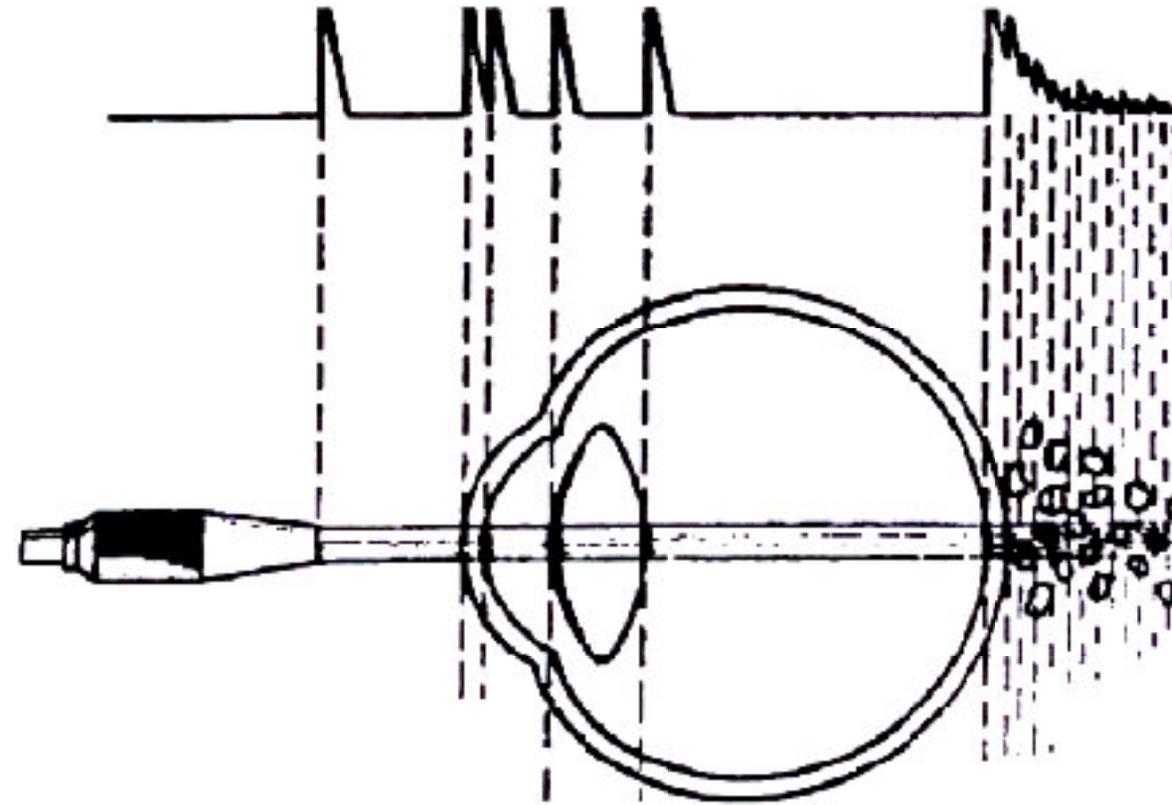
Laterale Auflösung: Strahlcharakteristik



Eindringtiefe

ν [MHz]	$\lambda(\text{Muskel})$ [mm]	Eindringtiefe [cm]	Ortsauflösung [mm]	
			lateral	axial
2	0,78	12	3	0,8
5	0,31	5	1,2	0,4
10	0,16	2,5	0,6	0,2
15	0,1	1,6	0,4	0,15

Sonogramm des Auges



2D Sonogramm

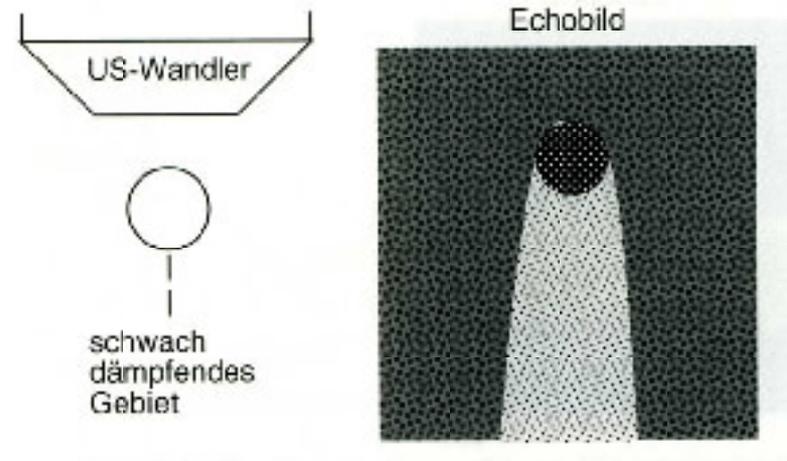


US Tomgraphie

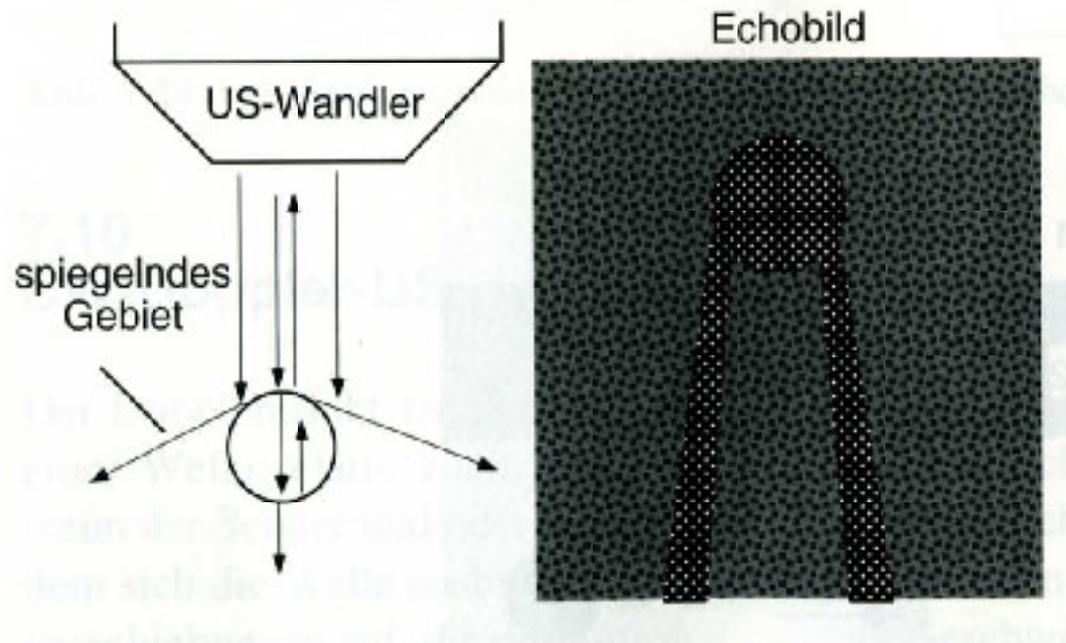


Bildfehler

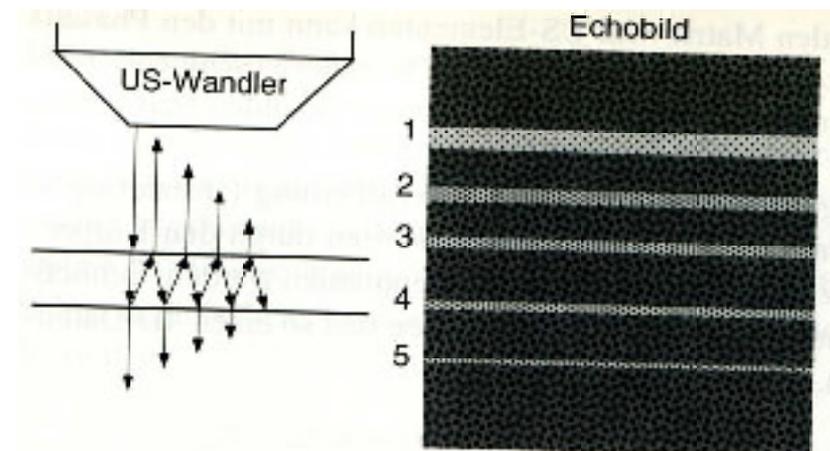
Signalerhöhung hinter schwach dämpfenden Gebieten



Abschattung hinter schrägen Kanten, die stark spiegeln

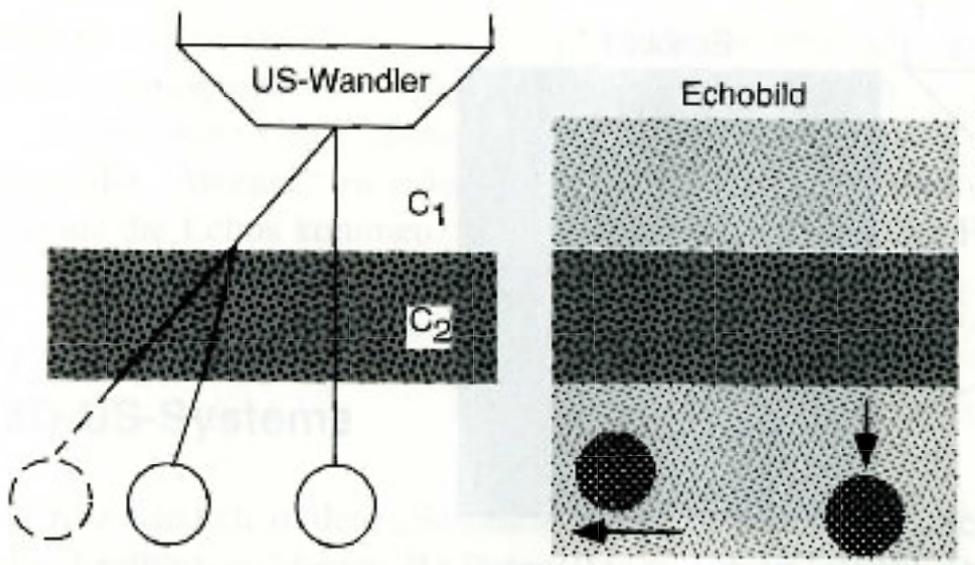
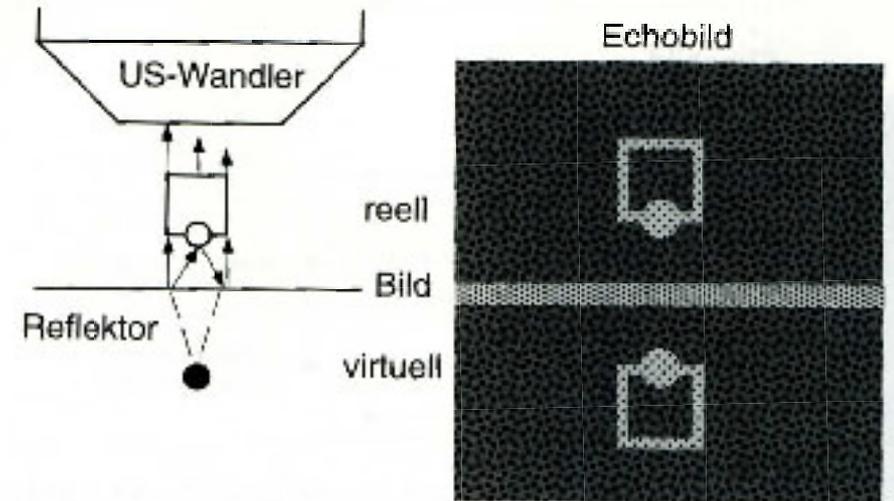


Zwei stark reflektierende, nahezu parallele Ebenen: mehrfach reflektiert



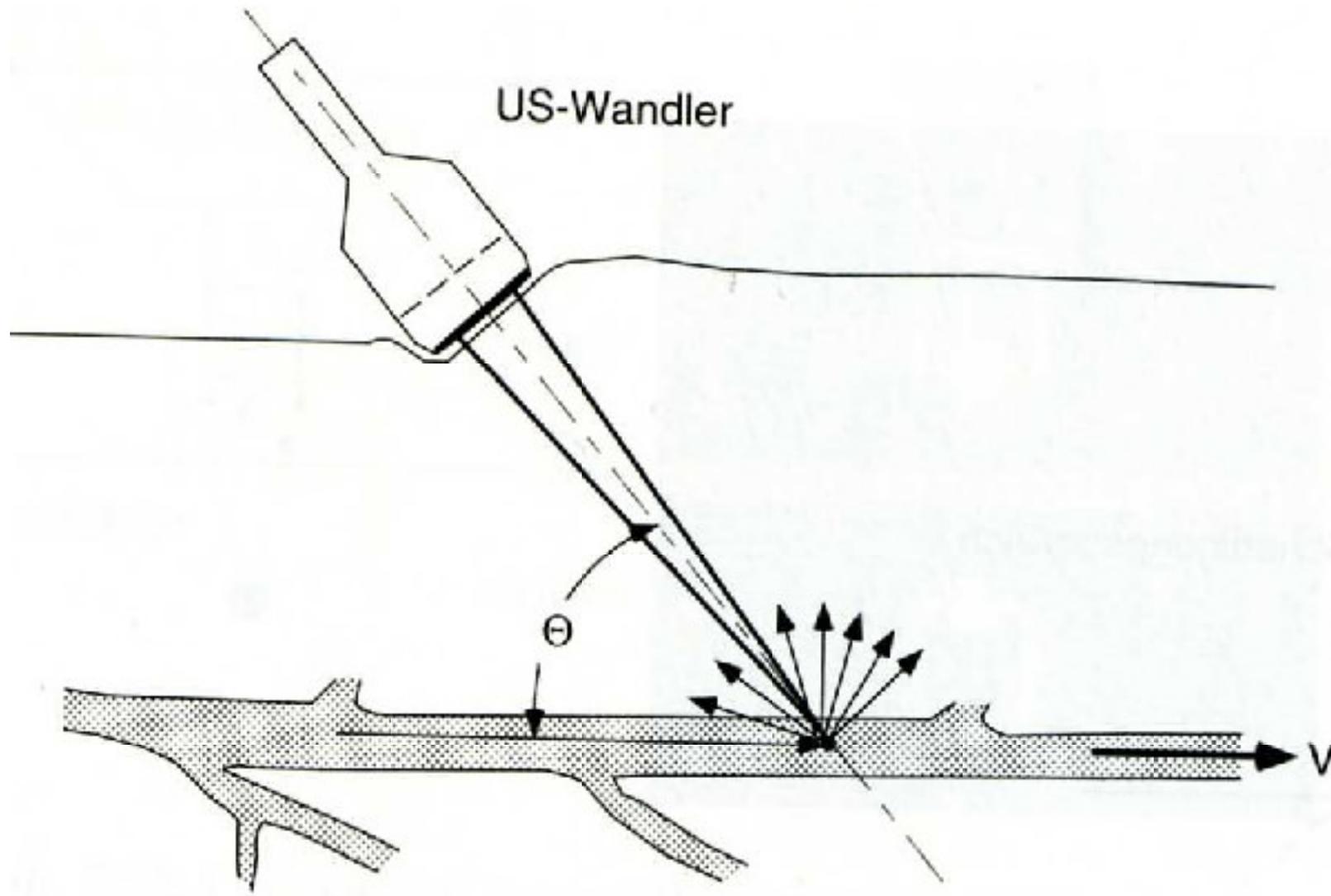
Bildfehler

**Objekte vor stark reflektierenden Flächen
-> virtuelle Bilder**



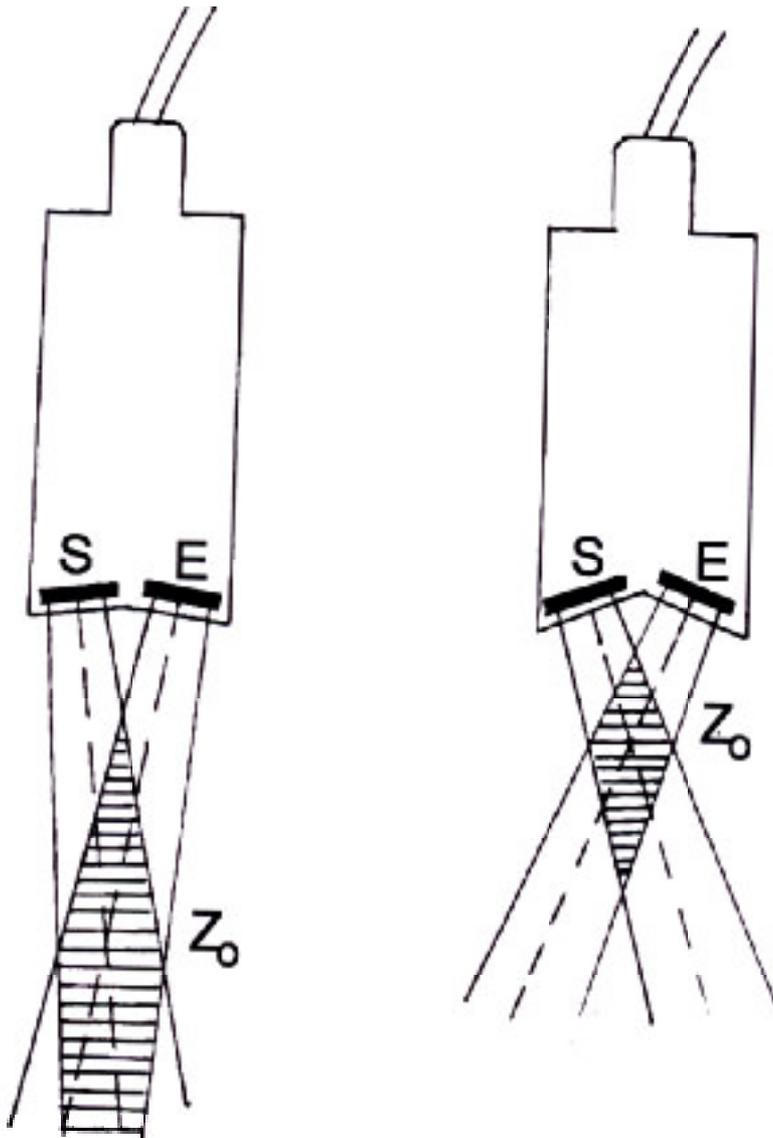
**Objekte hinter Gebiet mit
abweichender Schallgeschwindigkeit:
Verschiebung der Bilder**

Doppler - US



CW Doppler - US

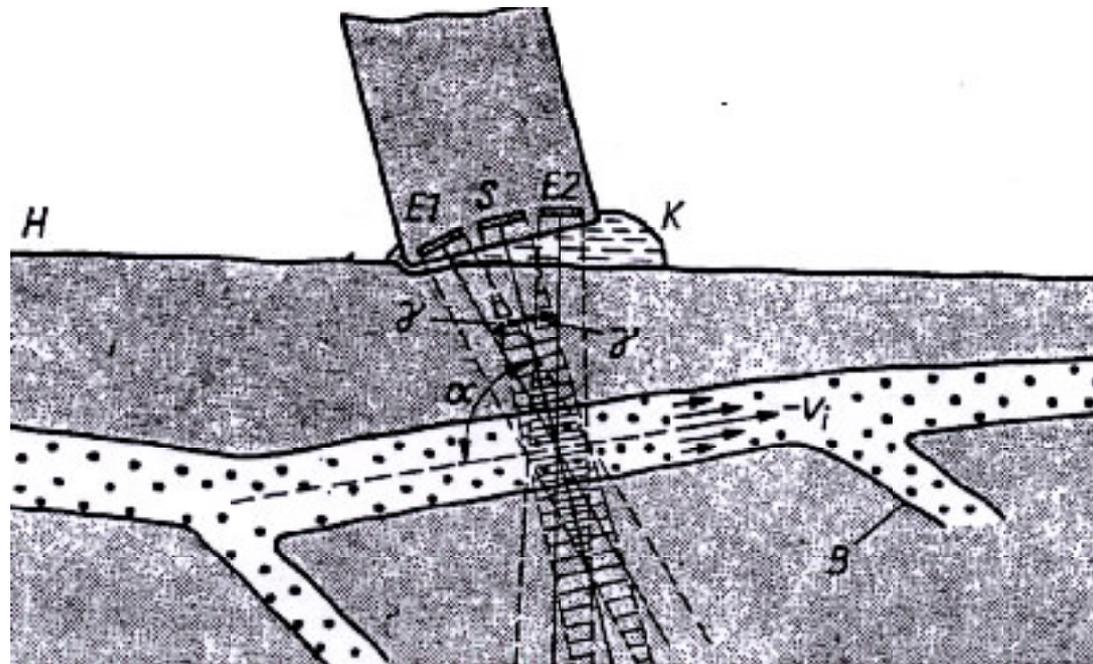
Messkopf für CW Doppler US



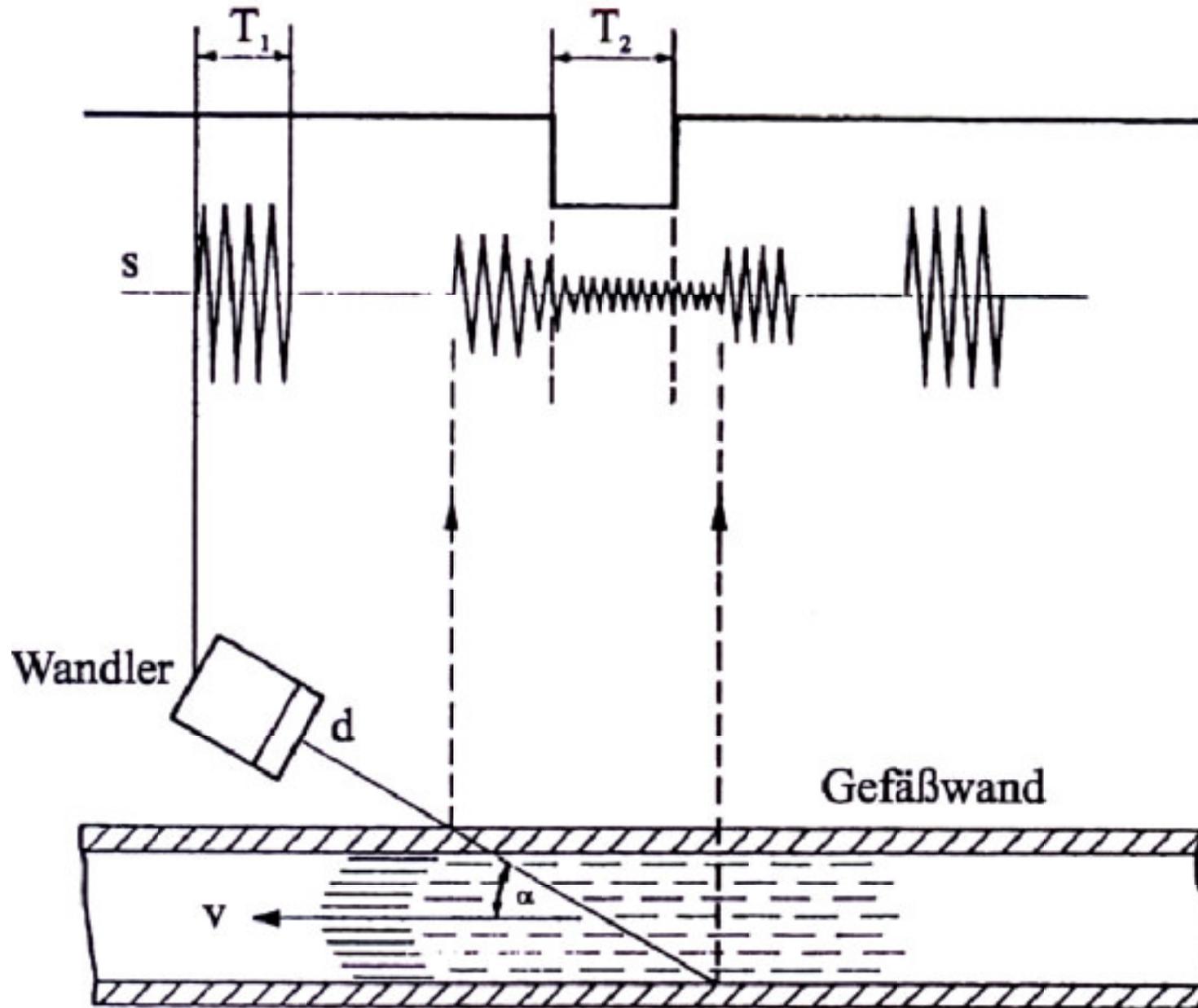
Berechnung der Geschwindigkeit:

$$v_i = \frac{c}{2f_0} \sqrt{(|\Delta f_1 + \Delta f_2|)^2 + k^2 (|\Delta f_1 - \Delta f_2|)^2}$$

mit $k = \frac{1 + \cos\gamma}{\sin\gamma}$

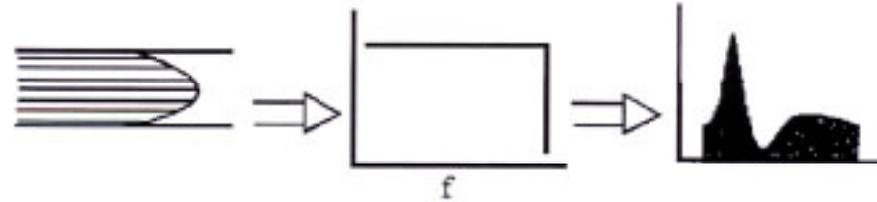


Impuls Doppler - US

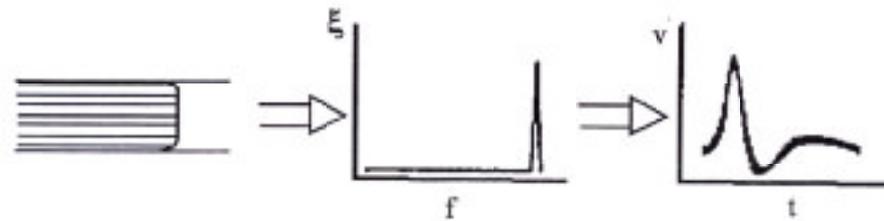


Strömungsprofile

parabolisches Profil



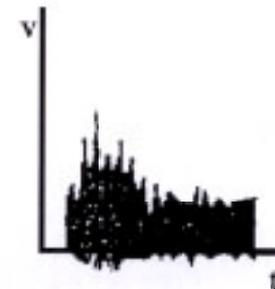
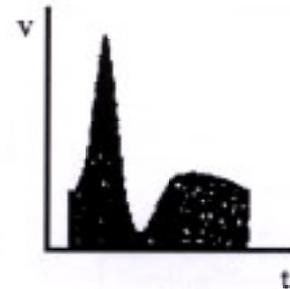
abgeflachtes Profil



Strömungsprofile

FFT

spektrale Geschwindigkeitsverteilung

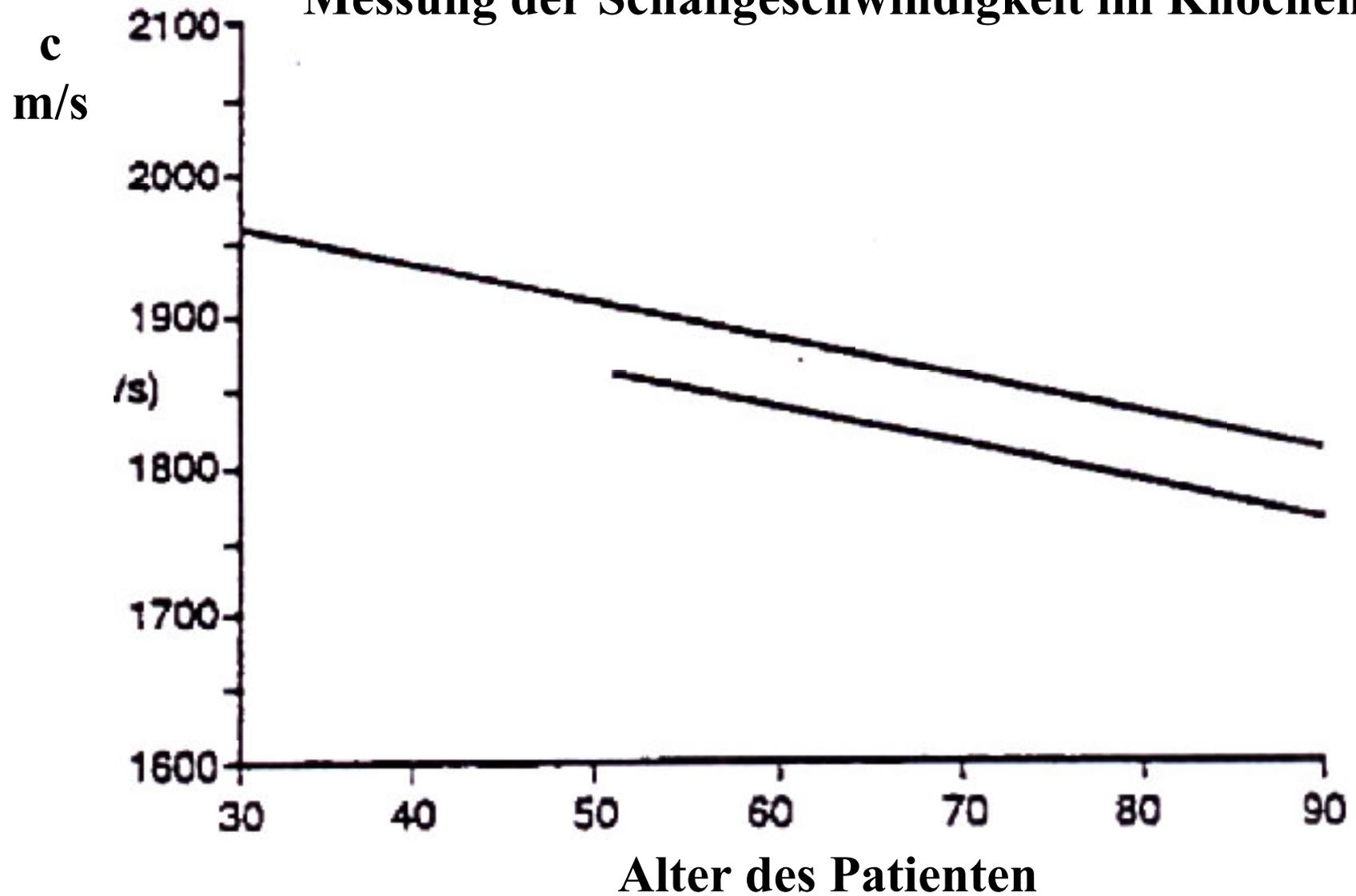


Einengung

Turbulenz

Transmissionsmessung

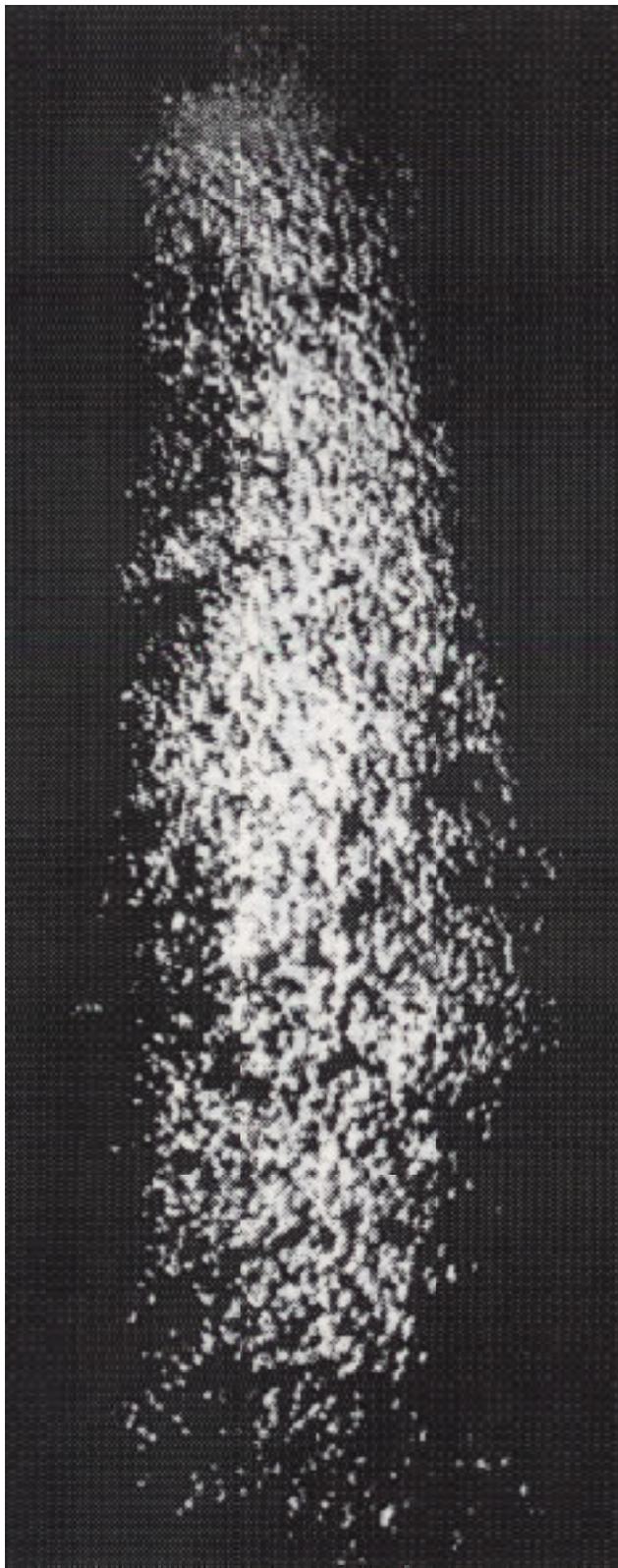
Messung der Schallgeschwindigkeit im Knochen



**Kavitationsblasen in
einem US Strahl**

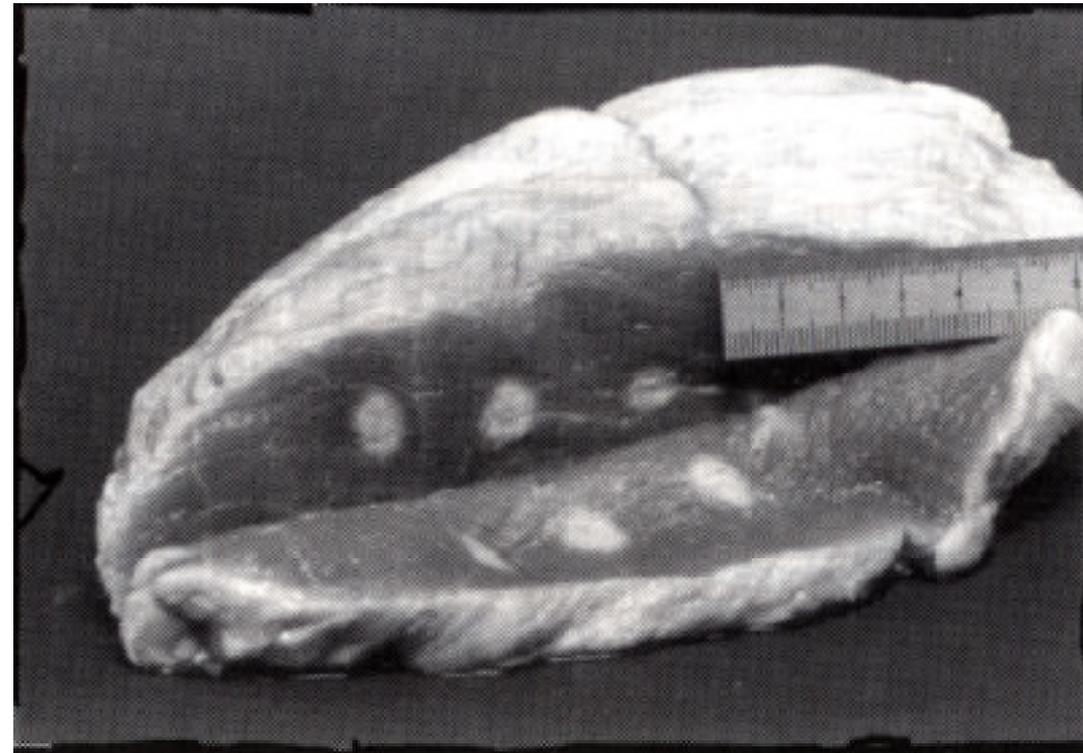
Kavitation

Kavitationan bei einer Schiffsschraube

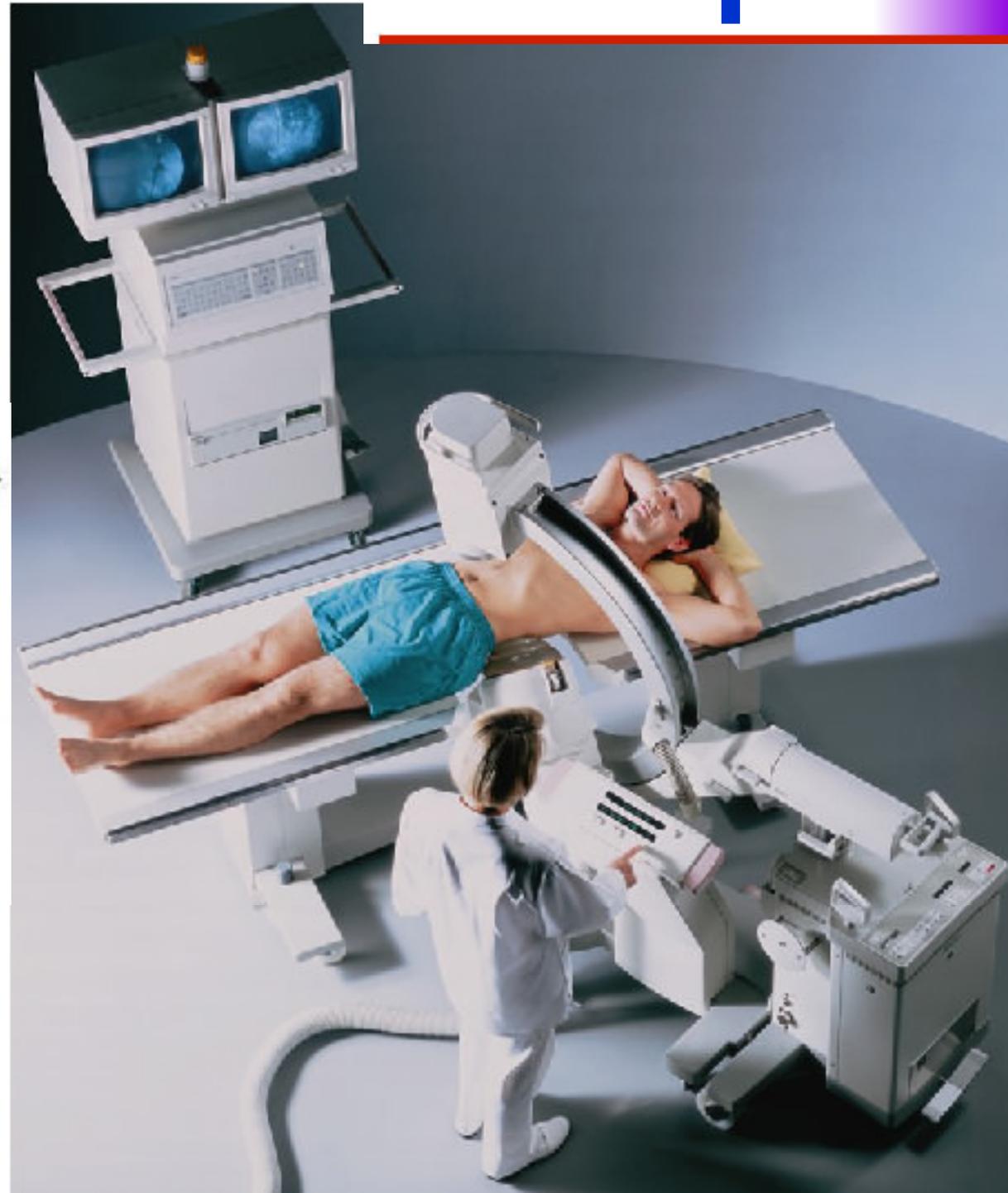
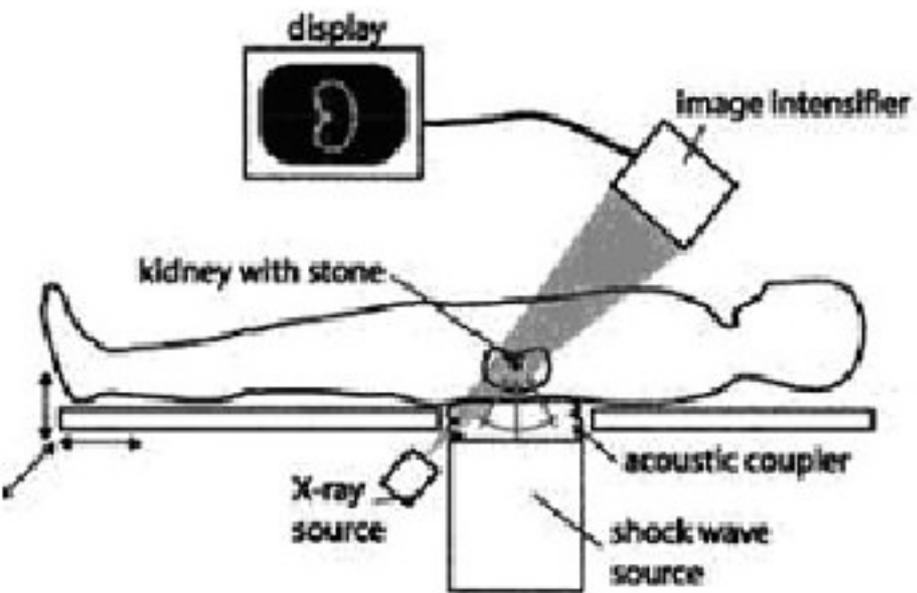


Thermische Effekte

Gewebe	Dämpfung in dB/cm
Blut	0,18
Fett	0,6
Niere	1,0
Muskel _{in Faserrichtung}	1,2
Muskel _{quer z. Faserrichtung}	3,3
Gehirn	0,85
Leber	0,9
Lunge	40,0
Knochen	20,0



Lithotripsie



Sicherheit

