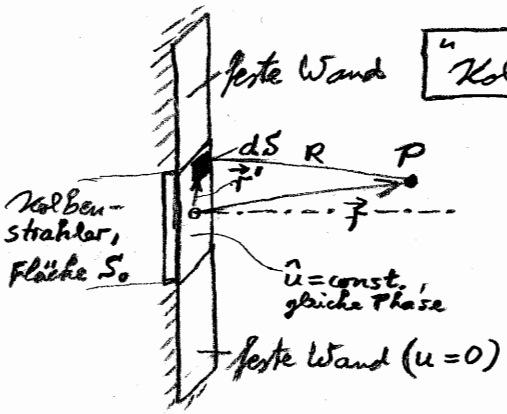
2014

# Schallabstrahlung und Ausbreitung

ges: Strahlungscharakteristik : - geometrische Begrenzung
- Energieverteilung des Schallfeldes




$\boxed{\text{"Kolbenstrahler":}}$ ≙ Dickenschwinger wird betrachtet:

- Jedes Flächenelement dS der schwingenden Oberfläche ist als Ausgangspkt. einer Kugelwelle (Huygens - Fresnel - Prinzip) betrachtbar! Diese "Elementarwellen" erzeugen die Schallfeldstruktur
- ↳ Gesamtschalldruck in beliebig. Pkt. P des Strahlungsfeldes folgt aus Überlagerung aller Beiträge aus der Strahlerebene.

Dh: Beiträge aller Elementarwellen der schwingenden Oberfläche (Kolbenstrahler) $S_0$ werden im Punkt P phasenrichtig aufintegriert. Damit wird d. Schalldruck in Abhäng. von $\vec{r}$:

$$p(\vec{r},t) = \frac{\varrho}{2\pi} \iint_{S_0} \dot{u}\left(\vec{r}\,', t - \frac{R}{c}\right) \cdot \frac{dS}{R}$$

nur 1 Halbraum ! betr.

$\dot{u} = \frac{du}{dt}$

[allg: $\partial p = \varrho \cdot \dot{u} \cdot \partial x$
$p = \frac{\varrho}{2\pi} \int_{S_0} \dot{u} \cdot \frac{dS}{R}$
gerechnet wird mit dem infinitesimalen Volumenfluß $dq = u(t) \cdot dS$ je Flächenelement]

wobei

Vektor $\vec{r}$ ≙ Koordinaten des Empfangspkts. P

Vektor $\vec{r}\,'$ ≙ Lage des Flächenelements dS auf dem Schwinger

"Kolbenstrahler" schwingt innerhalb einer ruhenden Umrandung in harmonischer Schwingung mit Schallschnelle $\hat{u}$ = const. und gleicher Phasenlage in allen Elementen dS der Kolbenfläche,

dann wird mit $\underline{u}(t) = \hat{u} \cdot e^{j\omega t}$ oben eingesetzt, mit $\frac{\omega}{c} = k$

$$\curvearrowright p(\vec{r},t) = \frac{\overset{\text{wg. diff. } u}{j\omega}\,\varrho}{2\pi} \underbrace{\hat{u} \cdot e^{j\omega t}}_{\text{Eingangssignal}} \iint_{S_0} e^{-jkR} \cdot \frac{dS}{R} \qquad (*)$$

damit $p(\vec{r},t) = \underline{u} \cdot G(\omega)$, dh. Rest der Glng. ist die Übertragungsfunktion $G(\omega)$ des Systems (Ampl.-, Phasengang)

⟹ allg. numerische Auswertung erforderlich!

(!) Allerdings sind geschlossene Lösungen nach Vereinfachungen möglich:

- Empf.pkt. P liegt in großer Entfernung vom Schwinger (≙ Fernfeld)
  dh. ≈ Parallelität aller Linien R von den einzelnen dS zu P.
- Empf.pkt. P liegt auf der Mittelachse des Schwingers
  dh. gleichphasige Addition aller Einzelbeiträge von $S_0$ mit gleichem Radiusabstand R (wg. Rotationssymmetrie) einfach mgl.

**Bem.:** zur stationären Abstrahlung eines sin-förmig schwingenden Wandlers:

Die Übertragungsfktn. kann auch aus der Fouriertransformation der Sprungantwort gewonnen werden:

für Schnellesprung $u(t) = u \cdot 1(t)$ Einheitssprung

wird, da $\frac{d\,1(t)}{dt} = \delta(t)$ Diracfktn.

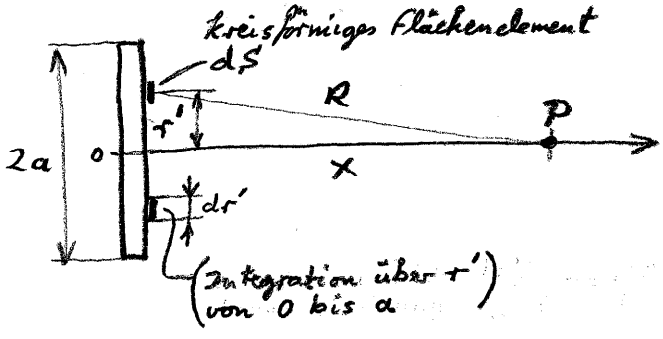
$$\rightsquigarrow p(\vec{r},t) = \frac{\varrho \cdot u}{2\pi} \iint_{S_0} \delta\left(t - \frac{R}{c}\right) \cdot \frac{dS}{R}$$

dh. alle Flächenelemente erzeugen Dirac-Impulse, die aber mit verschieden langen Laufwegen $R$ nicht gleichzeitig im Pkt. $P$ ankommen!

Der Faktor für $u$ ist für einen bei $\vec{r}$ gelegenen Empfangspkt. $P$ die Sprungantwort des Kolbenstrahlers:

$$h(\vec{r},t) = \frac{\varrho}{2\pi} \iint_{S_0} \delta\left(t - \frac{R}{c}\right) \cdot \frac{dS}{R}$$

## Stationäres Schallfeld auf Mittelachse eines Kreiskolbenstrahlers




- Integration über diff. dünne kreisförmige Flächenelemente $dS = \underbrace{2\pi r'}_{\text{Umfang}} \cdot \underbrace{dr'}_{\text{Dicke}}$
- günstig, statt $r'$ die Entfernung $R$ als Integrationsvariable einzuführen:

$$R = \sqrt{r'^2 + x^2}$$

$\rightsquigarrow$ für (*) entsteht nun: $p(x,t) = \hat{u} \cdot Z_0 \cdot \left(e^{-jkx} - e^{-jk\sqrt{x^2+a^2}}\right) \cdot e^{j\omega t}$

dh.: 2 Anteile gleicher Amplitude, aber unterschiedl. Phase! entstehen

$\hat{=}$ Vorstellung von 2 ebenen Wellen, die eine scheint von der Mitte, die andere vom Rand des Kreiskolbenschwingers auszugehen! Daraus ergeben sich...

**Nahfeldbereich: $\Delta s_i$ groß**

Beide Wellen interferieren; es entsteht eine räuml. Interferenz-Struktur
- bei Gleichphasigkeit ⇝ Maximum
- bei Gegenphasigkeit ⇝ Nullstelle

**Fernfeldbereich: $\Delta s_i \to 0$**

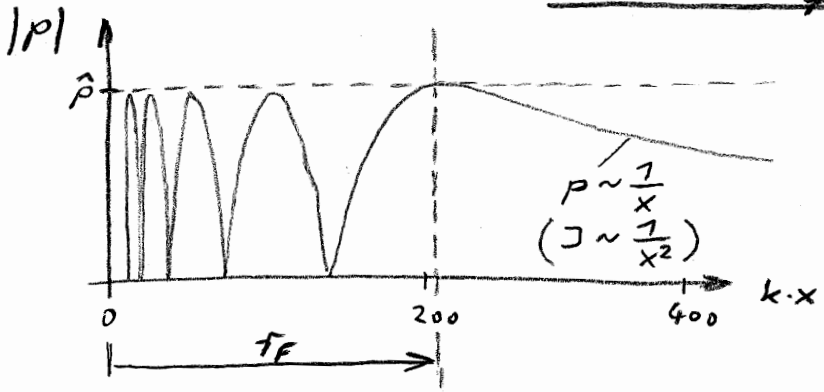
Für $x \gg a$ ist $\sqrt{x^2+a^2} \approx x + \frac{a^2}{2x}$

wenn außerdem $\frac{k a^2}{2x} \ll 1$

So folgt unter Einsetzen der Strahlerfläche $S_0$ für den Fernfeldbereich:

$$p(x,t) \approx \frac{j\omega \varrho S_0}{2\pi x} \cdot \hat{u} \cdot e^{j(\omega t - kx)}$$

Diese Gleichg. beschreibt das Schallfeld einer halbseitig abstrahlenden Punktschallquelle (auf der Mittelachse)




**Betrag des Schalldrucks Verlauf auf Mittelachse**
(für $k \cdot a = 40$)

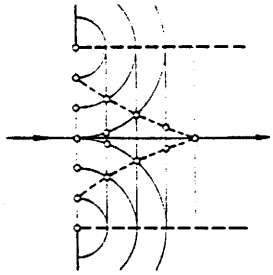
| Nahfeld-Bereich | Fernfeld-Bereich |
|---|---|
| • Je größer a gegenüber λ desto mehr Interferenzschwankungen (gilt für gesamten Nahfeldraum) | • $p$ fällt mit $\frac{1}{x}$, wie bei Kugelwelle ($J \sim \frac{1}{x^2}$) → ≙ "geometrischer Schallschwächung"<br>• keine Interferenzen mehr: → Einhüllende ≙ Kugelkalotte |

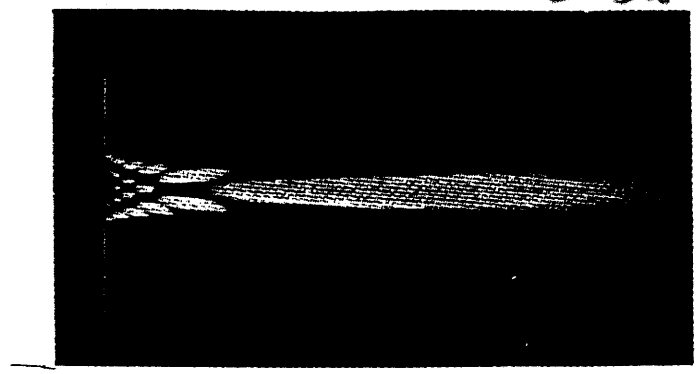
**Fernfeldgrenze $r_F$** liegt dort, wo $p$ auf der Mittelachse "zum letzten Mal" $\hat{p} = \hat{u} \cdot Z_0$ wird (dh. Übergang zum $\frac{1}{x}$-Verlauf):

dh. bei $\boxed{r_F \approx 3\frac{a^2}{\lambda}}$ ⇝ $\boxed{\text{Faustformel: } r_F \approx \frac{S_0}{\lambda}}$

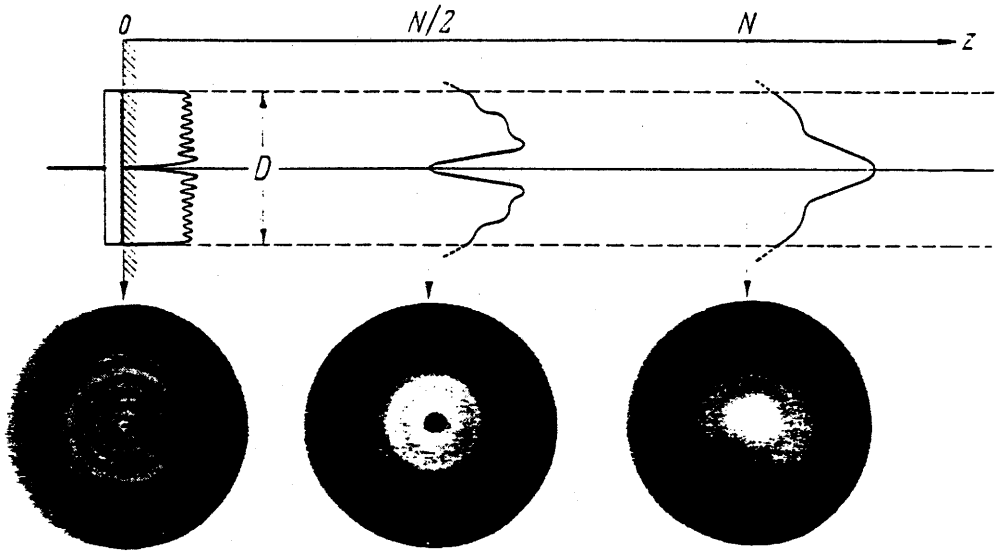
gilt unter Voraussetzung, daß Strahlerabmessung $\gg \lambda$ ist!

Interferenzfeld eines Schwingers

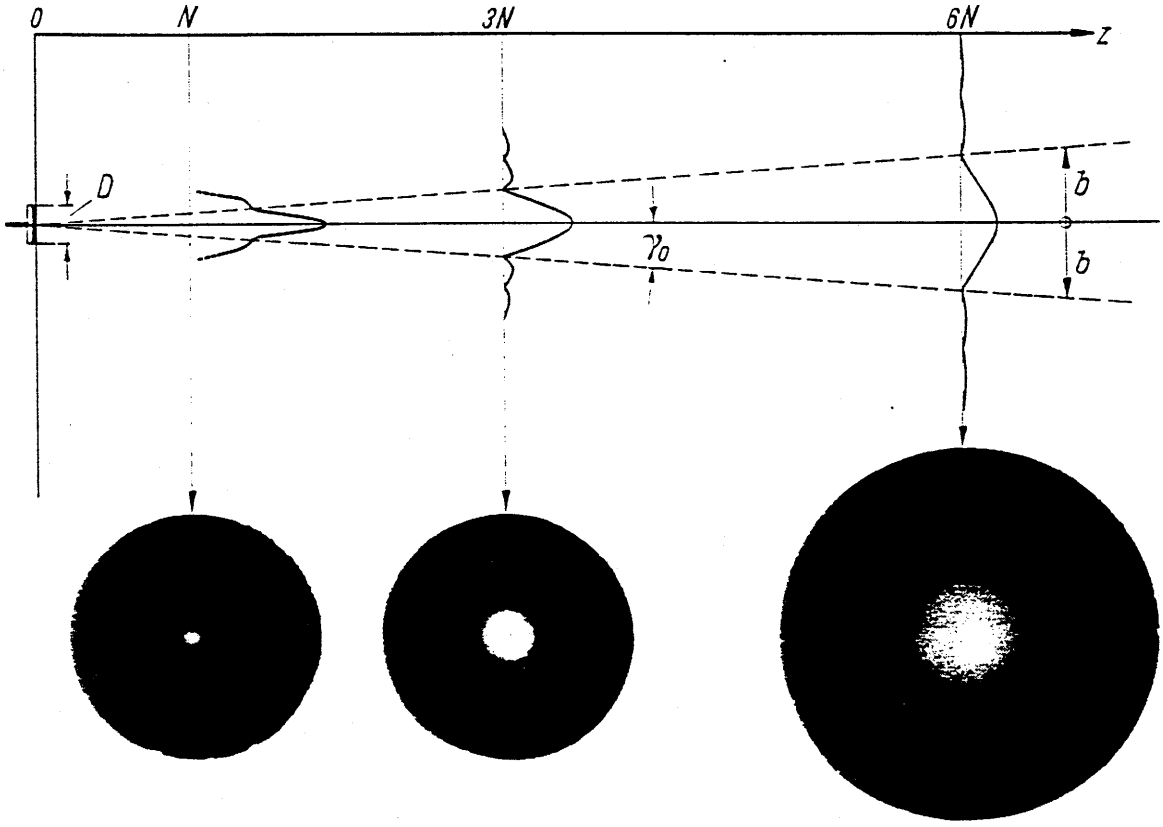




Interferenzstruktur des Schallfelds hinter der Blende nach dem Huygensschen Prinzip.



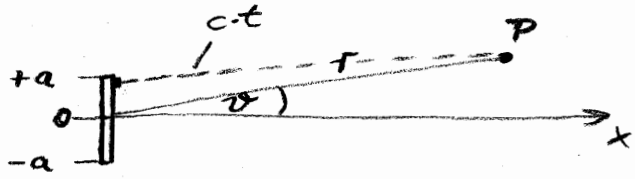

Nahfeld vor einem idealen Kolbenschwinger




Übergang vom Nah- zum Fernfeld mit Schalldruckverteilungen im Querschnitt

# Betrachtung des Fernfeldes ⇝ Richtcharakteristik

jetzt keine Beschränkung auf Mittelachse mehr: Betrachtungspkt. $P = P(r, \vartheta)$




Integration längs einer Linie mit dem Abstand $c \cdot t$ auf dem Wandler.
(s. Kuttruff S. 62 ff)

$a$ – Wandlerradius
$\vartheta$ – Abstrahlwinkel bez. auf Mittelachse

Die Frequenzübertragungsfunktion $G(\omega)$ folgt aus Sprungantwort $h(t)$ mit
$G(\omega) = j\omega \int_{-\infty}^{\infty} h(t) \cdot e^{-j\omega t} \cdot dt$ (Fouriertransformierte von $h(t)$)

zu:
$$G(r, \vartheta, \omega) = \frac{j\omega\varrho}{\pi r} e^{-jkr} \int_{-a}^{a} \sqrt{a^2 - x'^2}\, e^{jkx' \sin\vartheta} \cdot dx'$$

wobei: $x' = \dfrac{r - ct}{\sin\vartheta}$

$k = \dfrac{\omega}{c}$

Lösung: das Integral ist eine $\boxed{\text{Bessel fktn. 1. Ordnung, Zylinderfktn.}}$

damit wird
$$G(r, \vartheta, \omega) = \frac{j\omega\varrho S_0}{2\pi r} e^{-jkr} \cdot \left( 2 \cdot \frac{J_1(k \cdot a \cdot \sin\vartheta)}{k \cdot a \cdot \sin\vartheta} \right)$$

Der Schalldruck folgt hieraus nach Multiplikation mit Schnelle $\hat{u} \cdot e^{j\omega t}$:

$$\curvearrowright \quad \boxed{p(r, \vartheta, t) = \underbrace{\frac{j\omega\varrho \cdot S_0 \cdot \hat{u}}{2\pi r} e^{j(\omega t - kr)}}_{\hat{=}\ \text{Kugelwellen-abstrahlung mit } p \sim \frac{1}{r} \text{ (richtungsunabhängig)}} \cdot \underbrace{\left( 2 \cdot \frac{J_1(ka \cdot \sin\vartheta)}{ka \cdot \sin\vartheta} \right)}_{\text{Richtfaktor } T(\vartheta) \text{ des Kreiskolbenstrahlers}}}$$

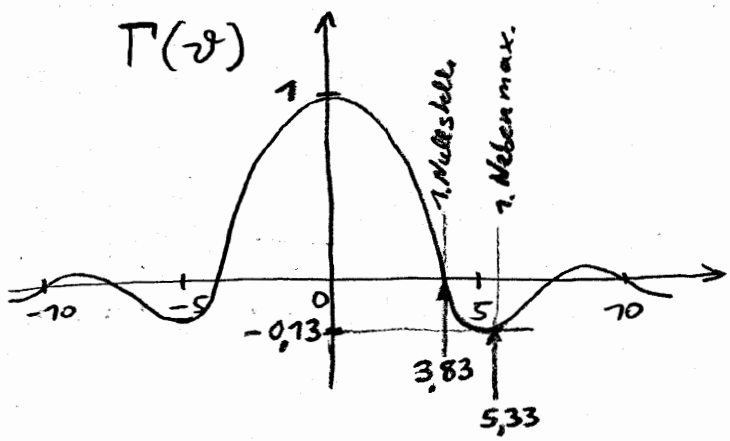
In $T(\vartheta)$
beachte Parameter $k \cdot a$ ! $\left(= \frac{2\pi}{\lambda} \cdot a\right)$

Der Klammerausdruck mit der Besselfktn. $J_1$ ist der Richtfaktor $T(\vartheta)$.

Die Darstellung des Betrages des Richtfaktors $|T(\vartheta)|$ in Polarkoordinaten liefert die Richtcharakteristik!

⇒
- i.a. liegt praktisch $k \cdot a \gg 1$ vor (dh. $a \gg \lambda$)
  ⇝ ausgeprägte Richtwirkung der Abstrahlung!
- für Extremfall $a \ll \lambda$ (dh. "atmende Kugel")
  ⇝ Abstrahlung einer (Halb)kugelwelle!, dh. ungerichtete Abstrahlung

## Darstellung des Richtfaktors $\Gamma(\vartheta)$ für den Kreiskolbenschw.




$\Gamma(\vartheta) = 1$ für $\vartheta = 0°$
dh. in Achsenrichtung

$\vartheta$ – Abstrahl ∡ (i.a. $-90° \ldots +90°$)
bezogen auf Mittelachse

$k a \cdot \sin\vartheta$

Wandlerradius
Wellenzahl

$k \cdot a = 2\pi \cdot \frac{a}{\lambda}$

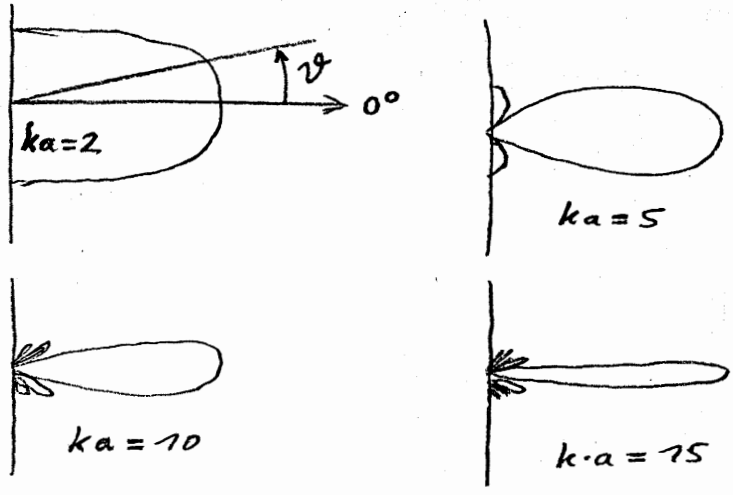
Durch die Nullstellen der Richtfaktorfunktion wird das Schallbündel in eine Hauptkeule und mehrere Nebenkeulen gegliedert.

z.B. Öffnungswinkel der Hauptkeule bestimmbar aus der 1. Nullstelle der Besselfunktion

$$\sin\vartheta_0 = \frac{3{,}83}{k \cdot a} = 0{,}61 \frac{\lambda}{a}$$

## Darstellung der Richtcharakteristik $|\Gamma(\vartheta)|$

eingetragen in Polarkoordinaten-Diagramm, dargestellt ist der Schalldruck $p$ bezogen auf dessen Maximalwert (bei $\vartheta = 0°$) als $f(\vartheta)$:
(auch Intensitäts-Darstellung üblich, dh. Leistungsgröße)




$\Gamma(\vartheta)$ mit Parameter $k \cdot a$:

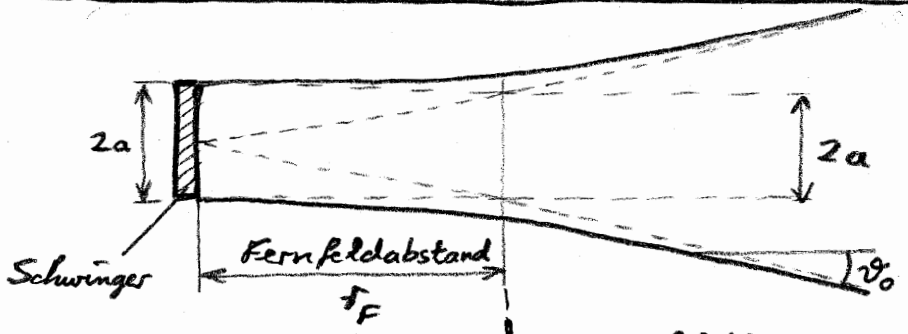
Hauptkeule,
Nebenkeulen,
dazwischen Nullstellen erkennbar

↓ Je größer der Parameter $k \cdot a = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot a = \frac{\text{Strahlerumfang}}{\lambda} \gg 1$
desto stärkere Schallbündelung auf die Richtung der Mittelachse mit kleiner werdenden Nebenkeulen!

Die Schärfe der Bündelung charakterisiert der Öffnungswinkel $\vartheta_H$ (Halbwertsbreite der Leistung), dies entspricht einem Absinken von $|\Gamma(\vartheta)|$ auf $\frac{1}{\sqrt{2}}$ (dh. $-3\,dB$ für $p(\vartheta_H)$),

näherungsweise gilt: $\boxed{\vartheta_H \approx \frac{\lambda}{a} \cdot 75^\circ}$ bei nicht zu kleinen Werten $k \cdot a$

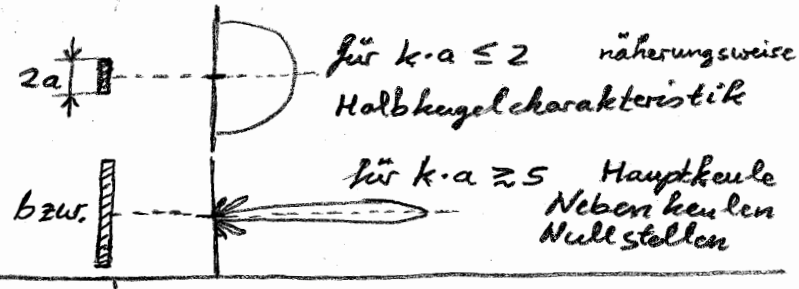
## Angenäherte Ausdehnung des Schallfeldes des Kreiskolbenstr.




unter Nutzung der 1. Nullstelle der Besselfunktion (s.S. 3-5) gilt für $k \cdot a \gg 1$ dh. $a \gg \lambda$

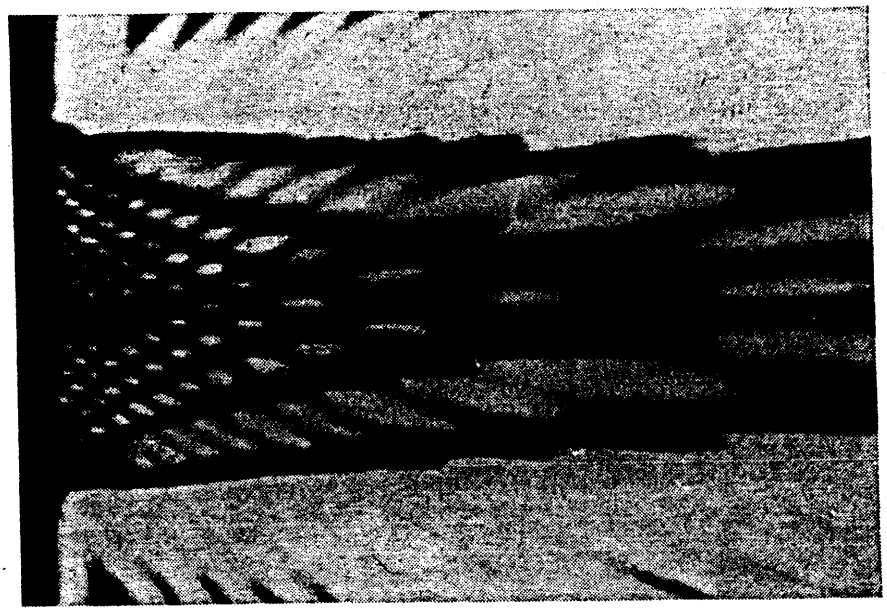
$$\boxed{\sin \vartheta_0 = \frac{3{,}83}{k \cdot a} = 0{,}67 \frac{\lambda}{a}}$$

| Nahfeldbereich | Fernfeldbereich |
|---|---|
| = Fresnelzone | = Fraunhoferzone |
| – Zylinderförmiger "Schallschlauch" mit $\varnothing = 2a$ | – Trichterförmige Aufweitg. (Spitze auf Strahlermitte), damit geometr. Dämpfng. |
| – Huygensches Prinzip ↳ (!) Interferenzzone, da jeder Pkt. der Oberfläche die Quelle einer Elementarwelle ist. | – ≙ Kugelwellen-Ausbreitung, $\lvert p \rvert \sim \frac{1}{r}$ |
| – je größer $\varnothing$ des Schwingers desto zahlreichere Min./Maxima | – Entstehen von Richtcharakteristiken (aus Richtfaktor $\lvert \Gamma(\vartheta) \rvert$): z.B. |
| – Druck / Schnelle-Relation mit Imaginäranteil ↳ meßtechnisch problematisch bei Absorptions- u. Schallgeschwindigkeitsmessung | für $k \cdot a \leq 2$ näherungsweise Halbkugelcharakteristik; bzw. für $k \cdot a \gtrsim 5$ Hauptkeule, Nebenkeulen, Nullstellen |

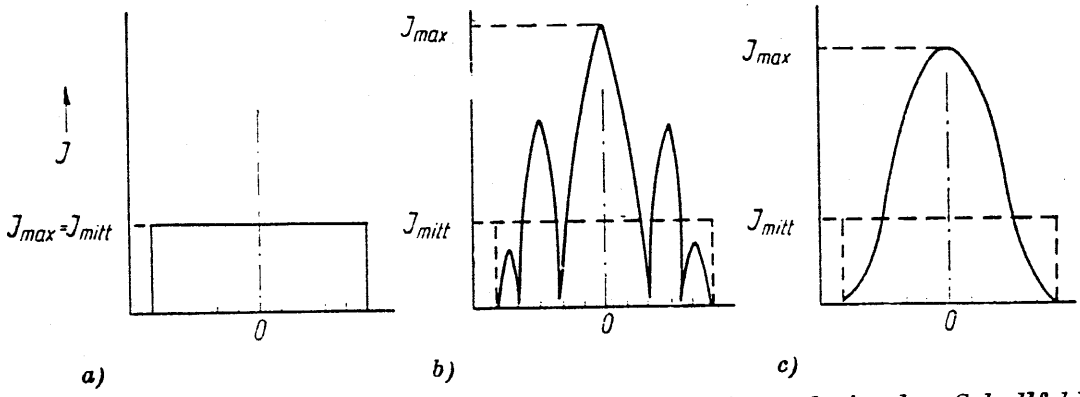



| (zB:) Zahlenwerte: | Schwinger 10 mm $\varnothing$ in Wasser, 4 MHz ($\lambda = 0{,}4$ mm) | Schwinger 10 mm $\varnothing$ in Wasser, 0,5 MHz ($\lambda = 3$ mm) |
|---|---|---|
| Fernfeldabstand | $r_F \approx 63$ mm | $r_F \approx 8{,}5$ mm |
| Schallfeldbegrnzg. | $\vartheta_0 \approx 3^\circ$ | $\vartheta_0 \approx 21{,}5^\circ$ |
| Öffnungswinkel | $\vartheta_H = 1{,}2^\circ$ | $\vartheta_H = 9^\circ$ |

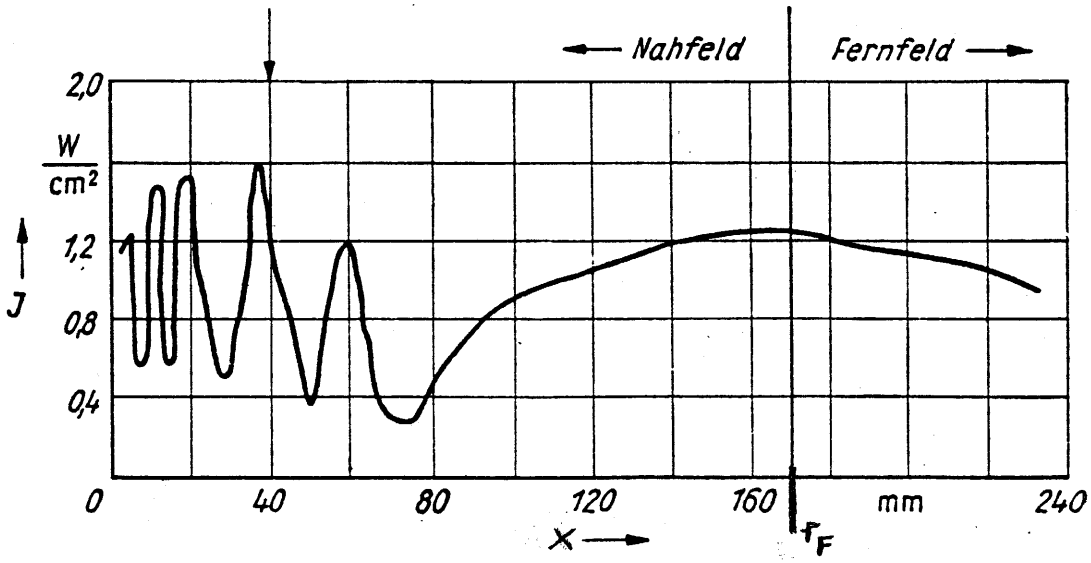
Bem: In Diagrammdarstellungen wird die Richtcharakteristik meist als Richtungsmaß dargestellt, dabei wird $|\Gamma(\vartheta)|$ in dB angegeben (als Amplitudenverhältnis für $p$). s. zB.: Seite 3-6c



*Interferenzfeld eines Schwingers bei $D/\lambda = 15$* (Schlierenoptische Aufnahme)




*Verteilung der Schallintensität über den Querschnitt des Schallfeldes*
a) Idealfall; b) im Nahfeld; c) im Fernfeld




*Gemessene Verteilung der Schallintensität im Interferenzfeld eines Schwingers entlang der Mittelnormalen x (800 kHz, 40 mm Dmr.)*

aus Matauschek

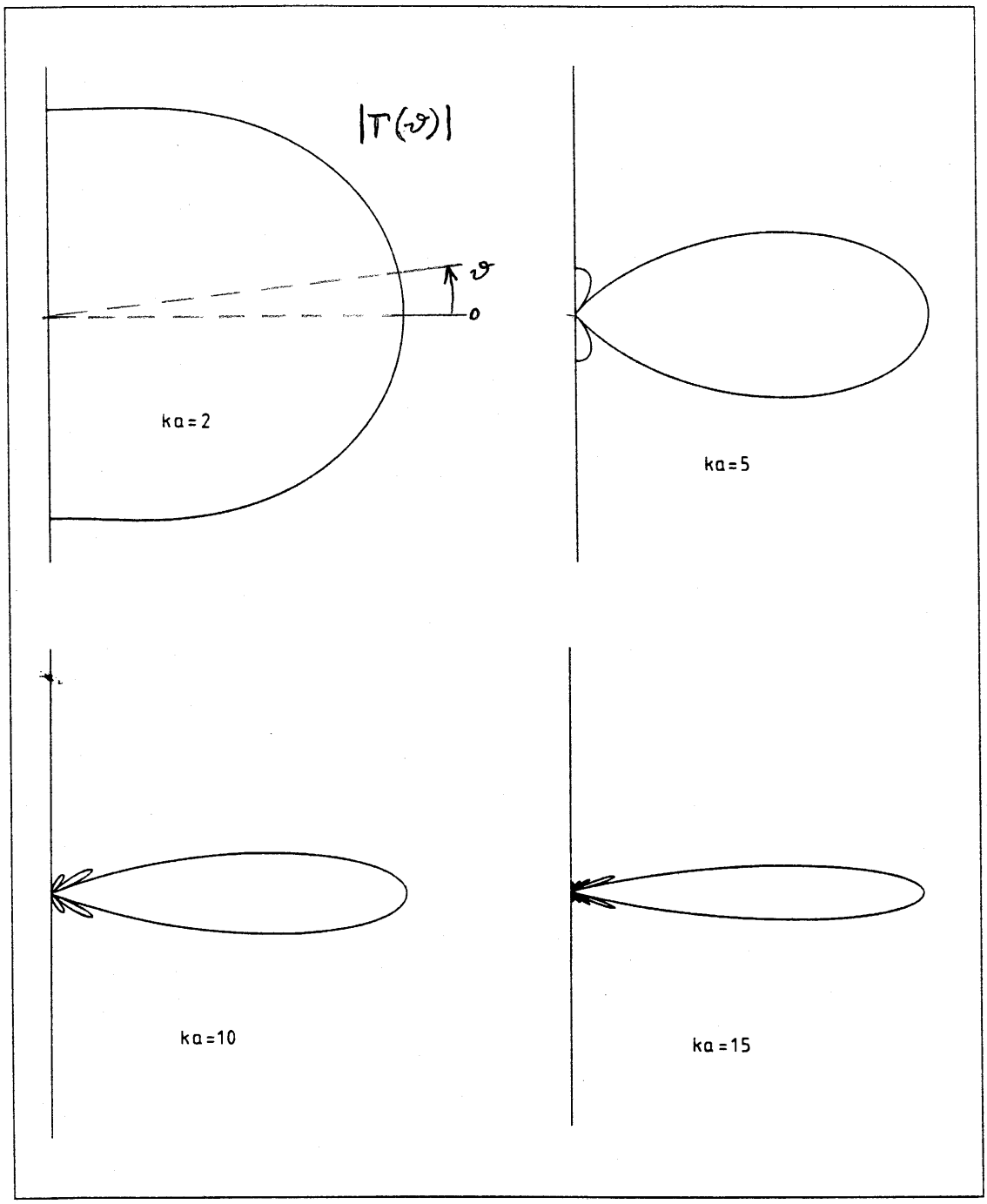



**Abb.** Auf den Schalldruck bezogene Richtcharakteristik des Kreiskolbenstrahlers für verschiedene Werte von $ka$.

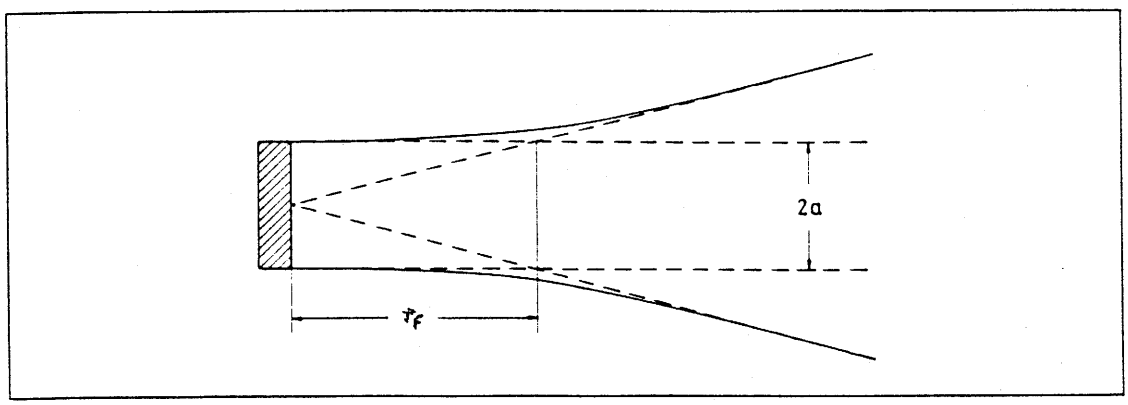



**Abb.** Ungefähre räumliche Ausdehnung des Schallfelds vor einem Kreiskolbenstrahler mit $ka \gg 1$, $r_f$ = Fernfeldabstand.

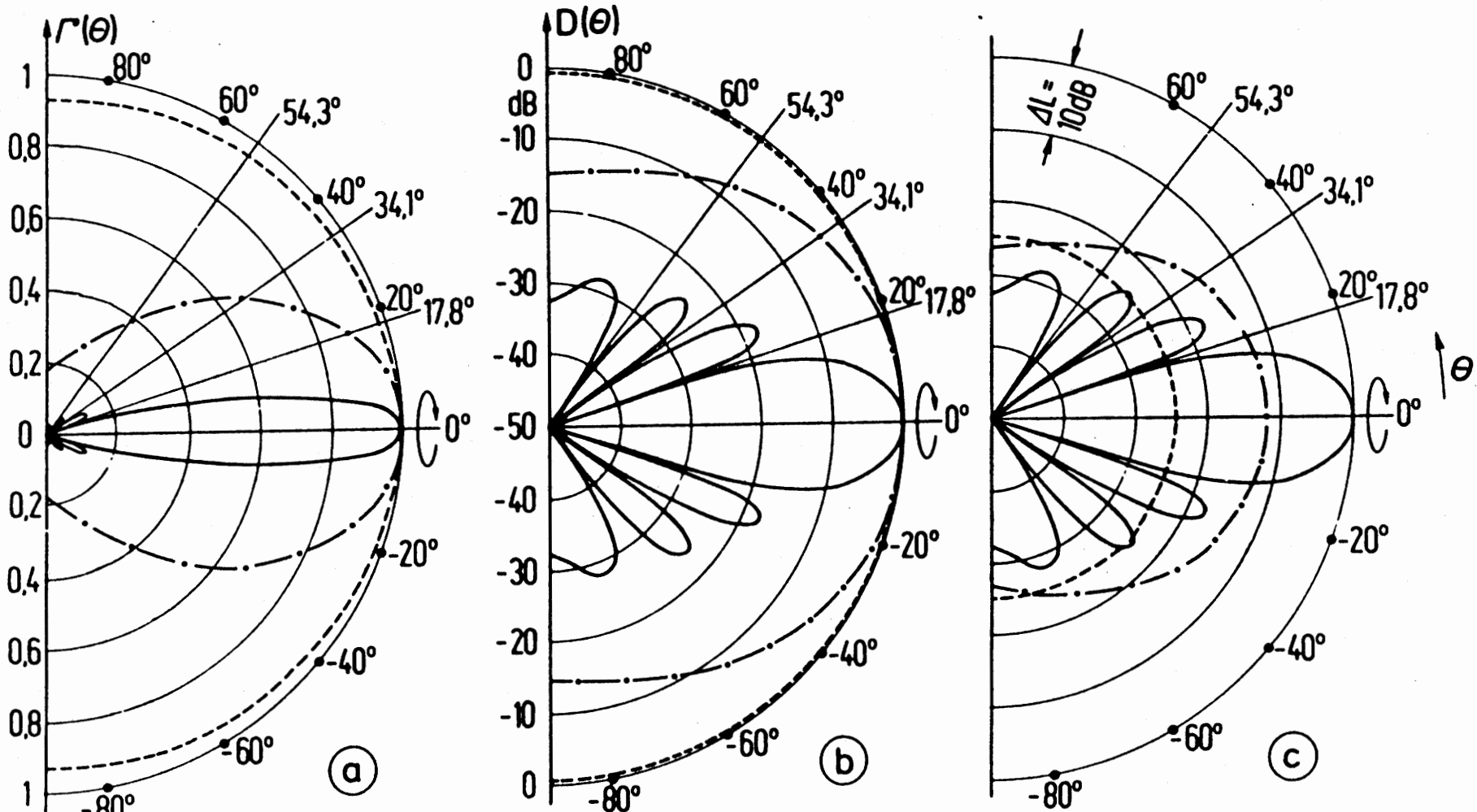
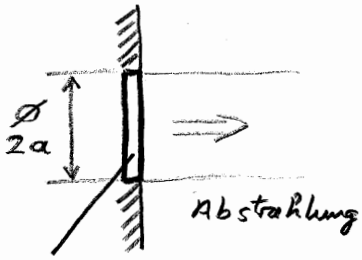



**Abb.** Richtdiagramme der Kolbenmembran für die Parameter $ka = 4\pi$ (durchgezogen), $ka = \pi$ (strichpunktiert) und $ka = \pi/4$ (gestrichelt); Richtungsfaktor $\Gamma(\Theta)$ **(a)**, und Richtungsmaß $D(\Theta)$ **(b)**, sowie eine Darstellung des Richtungsmaßes, bei der als Bezugswert der Maximalwert (bei $\Theta = 0°$) für den Parameter $ka = 4\pi$ gewählt wurde **(c)**

# Schwingerankopplung an Medien – Strahlungsimpedanz




Schwinger
(auf allen dS
komphase Schwingung)

Abstrahlung eines Kolbenschwingers in ein Medium:

Der Widerstand, der den Schwinger belastet heißt

Strahlungsimpedanz (komplex!) $\boxed{\underline{Z}_{ko} = \frac{\underline{p}}{\underline{u}}}$

ZB.: in Vakuum ist $\underline{Z}_{ko} = 0$ (akust. Kurzschluß) da $p = 0$ mit $u$ beliebig

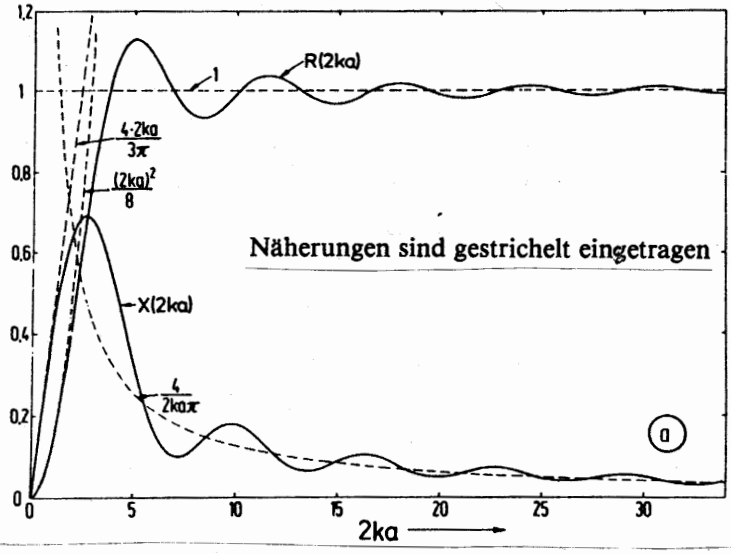
↓ keine Kraftübertragung mgl.

Berechnung ähnlich wie "Schallabstrahlung u. Ausbreitung", Seite 3-1 ff.

- Zerlegung der Schwingeroberfläche in diff. kleine Teilflächen dS
- Berechnung eines $d\underline{Z}_k$ für jedes dS, ! dabei arbeitet jede Teilfläche gegen den Schalldruck der Nachbarteilflächen an!
- Integration ...

↓ Strahlungsimpedanz $\underline{Z}_{ko} = Z_0 \left(1 - 2\frac{J_1(2ka)}{2ka} + j \cdot 2\frac{H_1(2ka)}{2ka}\right)$

Schallkennwiderstand des Mediums (reell) — Bessel fktn. 1. Ordnung — Struve sche Fktn. 1. Ordng.




Realteil und Imaginärteil der Strahlungsimpedanz

$$\underline{Z}_{ko} = Z_0\left(R(2ka) + j \cdot X(2ka)\right)$$
$$= \mathrm{Re}\{\underline{Z}_{ko}\} + j\,\mathrm{Im}\{\underline{Z}_{ko}\}$$

hierzu Näherungen:

$R(2ka) \approx \frac{(2ka)^2}{8} = \frac{(ka)^2}{2}$, für $ka < \sqrt{2}$

$R(2ka) \approx 1$, für $ka > \sqrt{2}$

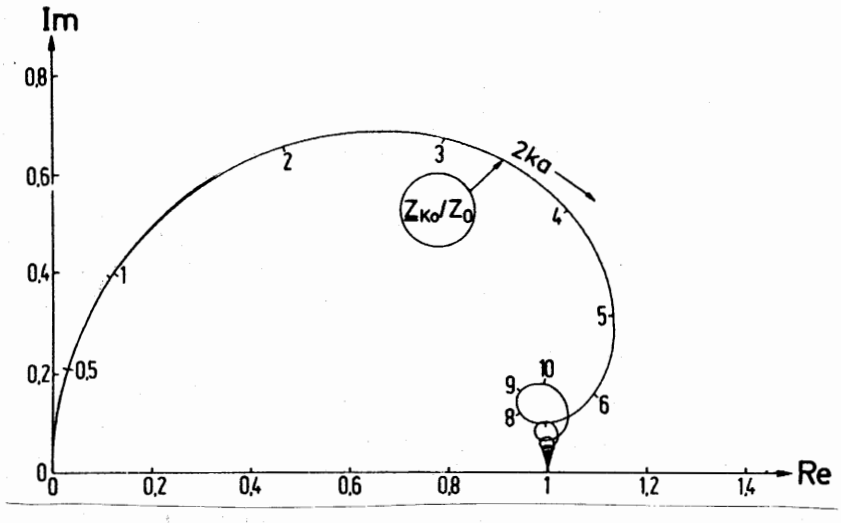
$X(2ka) \approx \frac{4(2ka)}{3\pi} = \frac{8ka}{3\pi}$, für $ka < \sqrt{3}/2$

$X(2ka) \approx \frac{4}{\pi(2ka)} = \frac{2}{\pi ka}$, für $ka > \sqrt{3}/2$

Praktisch sinnvoll sind Näherungen für

- $ka \ll 1$ : Quellen-Abmessungen $< \lambda$ ↓ Kugelwellenverhalten
- $ka \gg 1$ : – " – $> \lambda$ ↓ $\underline{Z}_{ko} \to Z_0$

da dann näherungsweise ebene Welle wodurch $\underline{Z}_{ko} \to$ Reell!




Ortskurve von $\underline{Z}_{Ko}/Z_0$ der Kolbenmembran

a – Schwingerradius

Für $ka \lesssim 2$ gilt:

$$\underline{Z}_{ko} \approx \frac{1/S}{\frac{1}{W_{ko}} + \frac{1}{j\omega m_{ko}}}$$

- Reibungswiderstand $W_{ko} \approx 1{,}44\, S \cdot Z_0$ (Schwingerfläche $S = \pi a^2$)
- Angekoppelte Masse $m_{ko} = \frac{8\varrho a^3}{3} \approx 0{,}85\, \varrho S a$

Bestimmung der vom Kolbenschwinger abgestrahlten

Wirkleistung $\boxed{P_W = Z_0 \cdot R(2ka) \cdot \tilde{u}^2 \cdot S}$ Schwingerfläche

Damit wird für $2ka \gg 1$:

$$\boxed{P_W = Z_0 \cdot \tilde{u}^2 \cdot S}$$

reell!

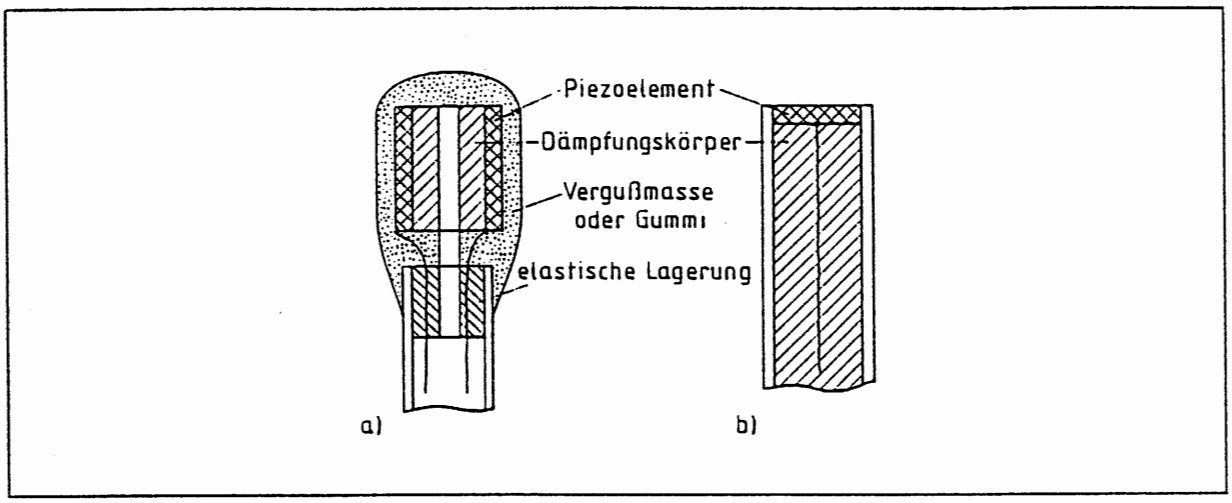
$Z_0$ – Schallkennwid. des angekoppelten Mediums

Die auf den Kolbenschwinger (masselos genähert) wirkende Kraft ist

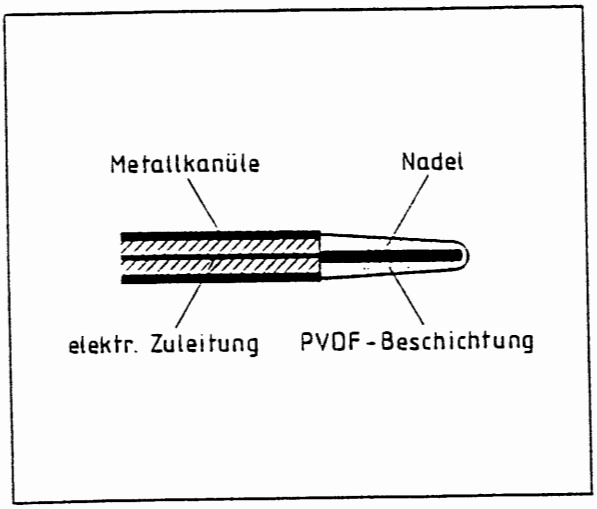
$$\boxed{\underline{F} = \underline{p} \cdot S = \underline{Z}_{ko} \cdot u \cdot \pi a^2}$$

(komplex!)

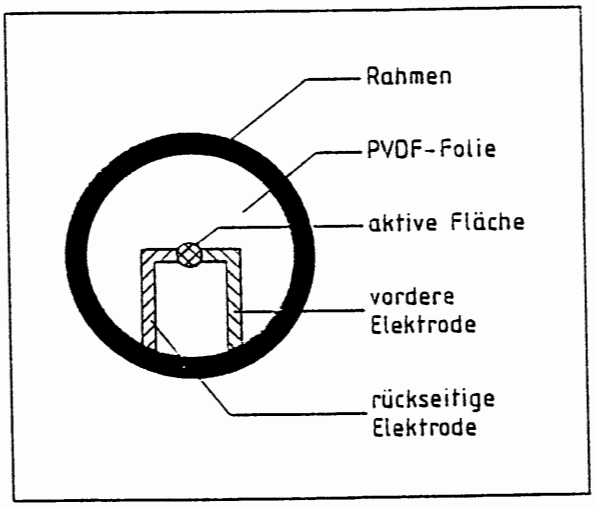
→ hierzu Beispiel Berechnung
Zollner/Zwicker, S. 101




Einige Ausführungsformen von piezoelektrischen Ultraschallmikrophonen. - **a.** Zylindrische Form. - **b.** Ebene Form.



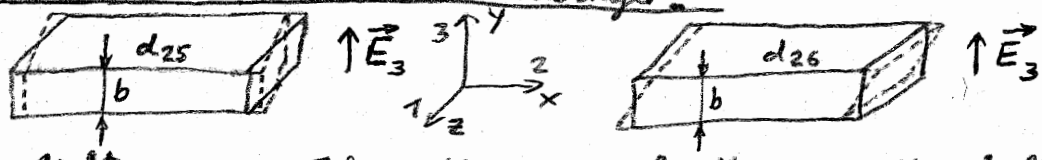

Nadelmikrophon mit hochpolymerer Piezoschicht.




Membranhydrophon.

## Erzeugung v. Transversalwellen

### ① Anw. Piezokeramischer Scher-Schwinger:




Richtung der Polarisation muß hier ∥ zur Platten oberfläche liegen!
(zB. Quarzplatte senkrecht zur y-Achse geschnitten mit Feld $E_y = E_3$)
→ Piezowandler mit piezoelektr. Koeffiz. $d_{25}$ bzw. $d_{26}$:

↯ $E_3$ erzeugt nur die Schubspannungen $\sigma_{xy}$ (nur Scherungen)
liefert aber keine Dickenschwingungen!

Erste Plattenresonanz für Scherschwingungen entsteht

bei Plattendicke $b = \frac{\lambda_T}{2}$ (Transversalwellenlänge $\lambda_T$)

$$\boxed{f_0 = \frac{c_T}{2b}}$$

Bei festem Aufbringen des Schwingers auf einen Festkörper ist damit die Einleitung linear polarisierter Transversalwellen ausführbar!

### ② Anw. Wellentypumwandlung (Modenwdlg.) an Grenzflächen

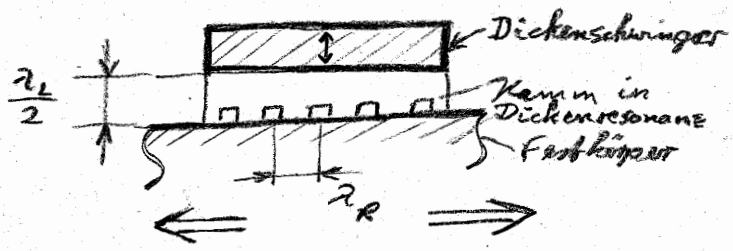
Durch Nutzung des Grenzwinkels der Totalreflexion für die L-Welle (s. S. 7-25) entsteht eine reine Transversalwelle im Festkörper:

(zB.:) Übergang Wasser → Stahl für $\sphericalangle H_2O > 74{,}5°$
Wasser → Alu für $\sphericalangle H_2O > 73{,}5°$

## Erzeugung v. Rayleighwellen

mit Dickenschwingern (L-Wellen) können auch Rayl.wellen erzeugt werden:

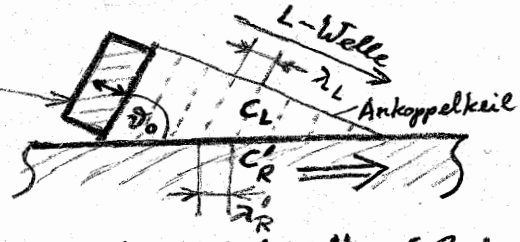
### Ⓐ mit Ankoppelkamm




hier Rayleighwellen in 2 Richtungen abgestrahlt!

(die ebenfalls entstehenden L-Wellen löschen sich gegenseitig aus!)

### Ⓑ mit "Spuranpassung"




hier nur eine Abstrahlrichtung f. Rayl.w.!

für $c_L = c_R' \cdot \sin\vartheta_0$

wandern die Schnittpunkte der L-Welle mit gleicher Geschwindigkeit, wie $c_R'$

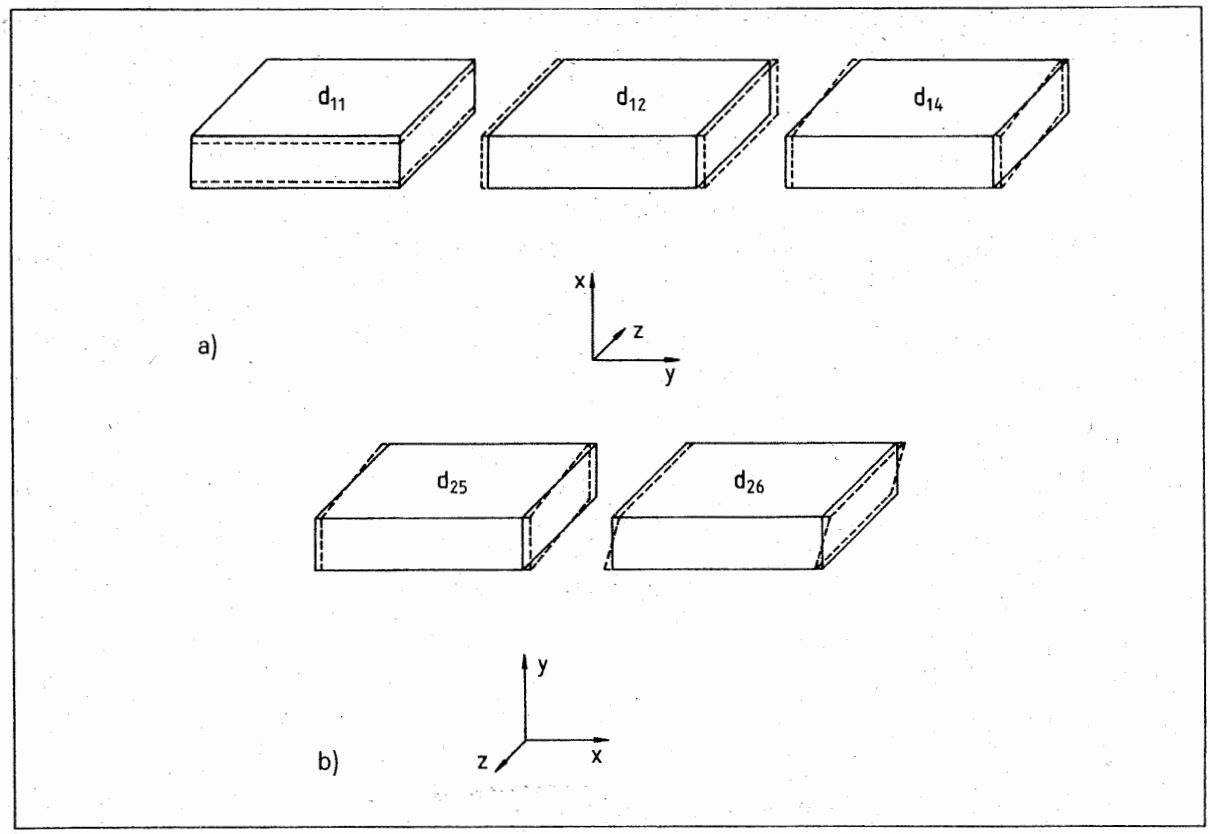
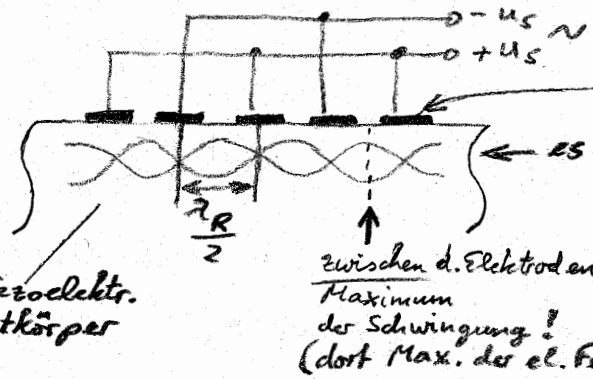



**Abb.** Zuordnung von piezoelektrischen Moduln und Verformungen einer Quarzplatte. – **a.** *x*-Schnitt. – **b.** *y*-Schnitt.

## (c) Interdigitalwandler




Metallstreifen auf piezoelektr. Material werden gegenphasig angesteuert. (lat.: digitus = Finger)

← es entsteht Stehende Rayleigh-Welle aus Überlagerung zweier fortlaufender Wellen entgegengesetzter Ausbr.-richtg. an der Oberfläche d. Festkörpers.

Einseitige Kamm-Struktur aus Leitflächen auf Piezomaterial aufgedampft.
(! keine gegenüberliegende "Gegen"-elektrode)

Technologisch vorteilhaft – Anwendng. von Verfahren der Halbleitertechnologie (Fotolithografie, Ätzen, Bedampfen ...)

## Bem: Erzeugung von hochfrequentem Ultraschall

a.) Piezokeramische Wandler: $f_n = (2n+1) \cdot \frac{c_L}{2b}$ $\quad n = 0, 1, 2 \ldots$

zB. Dicken-Resonanzen auf ungeradzahlig. Vielf. von $\frac{\lambda}{2}$

erf. damit für hohe Freqe.: → dünne Schichten (< 0,1 mm) piezoelekt. Materials

→ Oberschwingungsanregung mit hohem n (problematisch!)

Problem: $b = 0{,}1\,mm \hat{=} f_0 \approx 20\,MHz$ ist Grenze der klass. Technologie.
(100 MHz durch Läppen (Feinstschleifen) mgl.)

b.) Piezoelektr. Folien: > 200 MHz für PVDF (Polyvinylidenfluorid) Folien < 10 µm Dicke

PVDF-Folien haben hohe innere Dämpfungswerte
↓ Breitbandig!, aber gute $Z_0$-Anpassung an Flüssigkeiten!

c.) Epitaktisch erzeugte kristalline Piezowandler:

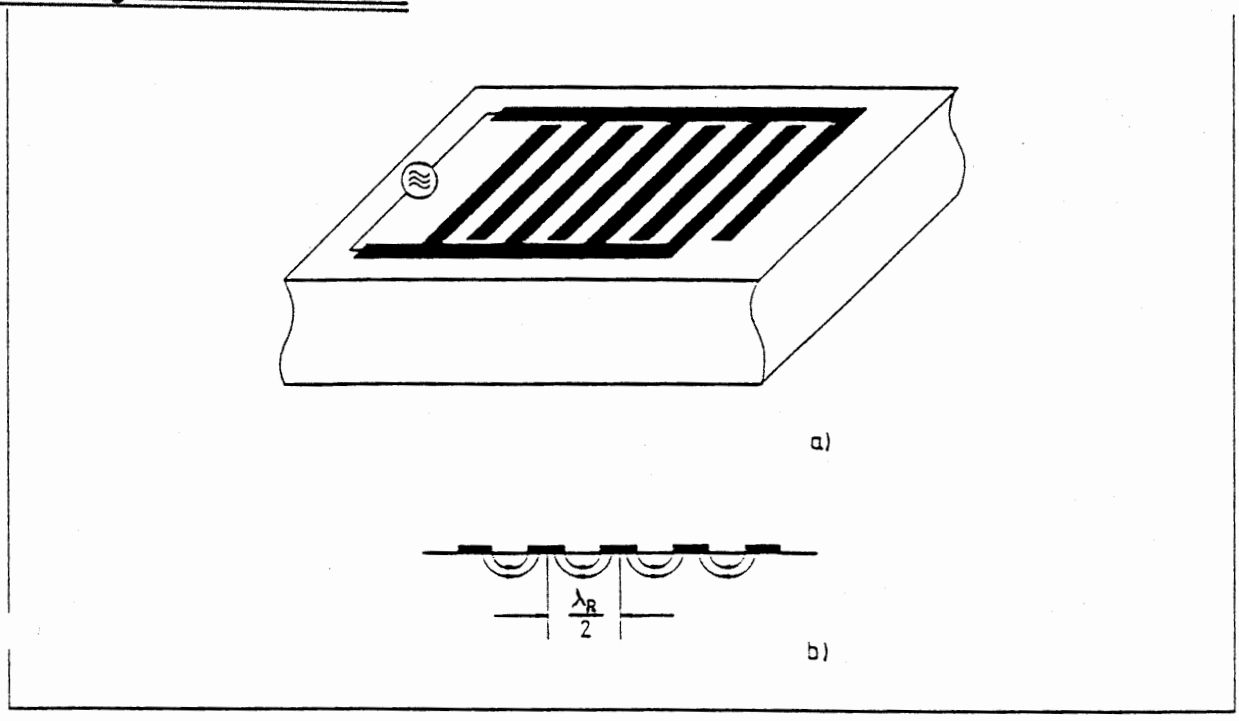
auf monokristallinem Substrat unter Anwendung d. Halbleitertechnologie

3 GHz-Schwinger aus
↑ $\hat{=}$ 1 µm Rayleigh-Wellenlänge

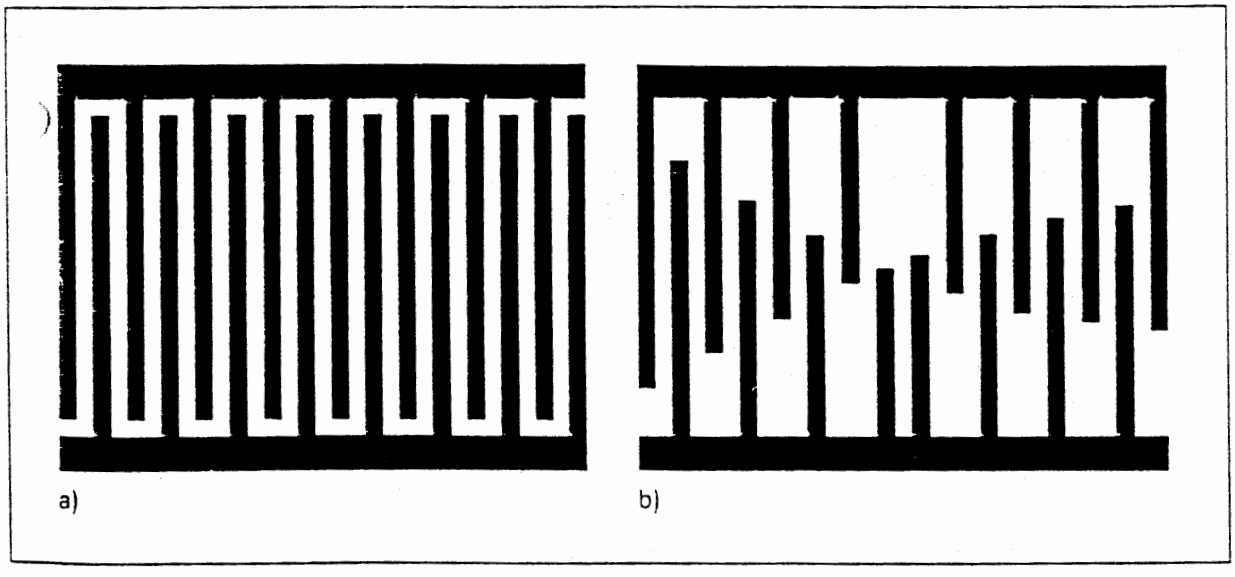
Kadmiumsulfid (CdS)
Zinksulfid (ZnS)
Lithiumniobat ($LiNbO_3$) (!)
← Curietemperatur 1210 °C

Herstellung mit fotolithografischen Verf. ...

## Interdigitalwandler




Erzeugung von Rayleighwellen auf einem piezoelektrischen Substrat. – **a.** Elektrodenanordnung (Interdigitalwandler). – **b.** Feldverteilung in der Nähe der Oberfläche.




Interdigitalwandler zur Erzeugung und zum Empfang von Rayleighwellen auf einem piezoelektrischen Substrat. – **a.** Gleiche Elementempfindlichkeiten. – **b.** Unterschiedliche Empfindlichkeiten.

# US – Anwendungen in der Meßtechnik

## Elektronik – Bauelemente

- Signalverzögerung (Verzögerungsleitung)
- Frequenzfilter (Keramische Bandfilter)
- Frequenzstabilisierg. (Quarzoszillatoren)

## Meßtechnik – Bestimmung physikalischer Größen

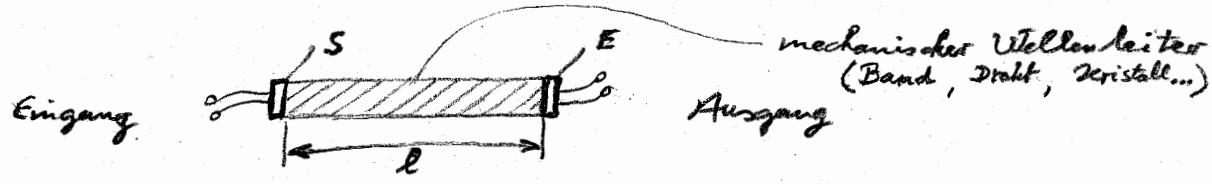
- Weg-, Geschwindigkeitsmessungen (c bekannt / meßbar)
- Best. elastischer Konstanten v. Festkörpern aus c-Messungen
- Best. der Viskosität v. Flüssigkeiten aus US-Dämpfungsmessungen

# Ultraschall – Verzögerungsleitungen

kurze Verzögerungszeiten $\tau$ mit elektr. Leitungsstücken realisierbar:

Allg. Ziel:
- Allpaß (in größeren Frequenzbereichen)
- Phasendrehung proportional zur Frequenz

größere $\tau$ mit US-Verzögerungsleitungen erreichbar:




$$\tau = \frac{l}{c}$$

Probleme:

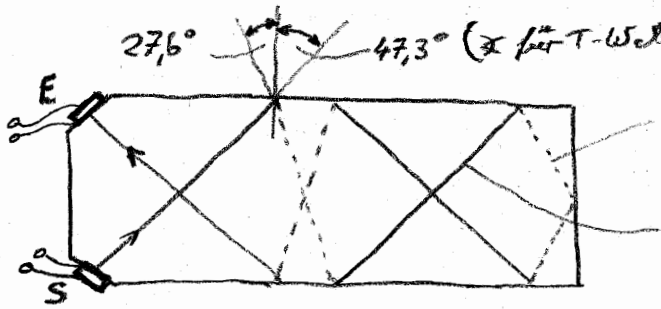
- ex. obere Grenzfrequenz der Wellenleitung wegen $\alpha(f) = A \cdot f^n$ für den Absorptionskoeffiz. $\alpha$

  i.a. $n \approx 2$ ↷ $\boxed{f_{gr} = \sqrt[n]{\frac{\ln 2}{A \cdot l}}}$ hier nur noch halbe Amplitude

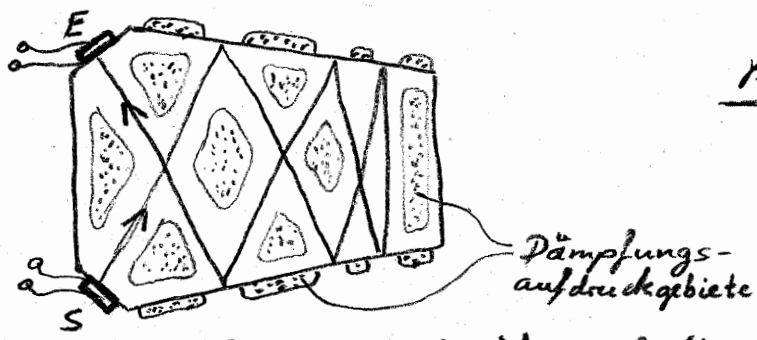
- weiterhin ist die Bandbreite der S/E-Wandler begrenzt!
- — " — Echos (Reflexionen) ↷ erford. gute Wandleranpassg!

günstiger Wellenleiter: Quarzglas wegen niedrigem Absorptionskoeff. (steigt nur quadratisch mit $f$) und geringem $TK_c \approx 0{,}03 \, \frac{m}{s}/K$

ZB:




hier Wellentypumwandlung (= Multimodenleitung)
am Rand einer flachen Scheibe ($d \approx 1mm$)




hier reine Longitudinalwellenausbreitung

Problem: störendes Hintergrundsignal durch Schallstrahlaufweitung!

↳ Dämpfung: "nicht" reflekt. Flächen erforderlich! (Aufdrucken von Dämpfungsschichten seitlich des Schallweges = Silikonauftr.)

## Anwendungen von Rayleigh-Wellen-Anordnungen

- Oberflächenwellen mit kleiner $c_R$! ↳ kleine, leichte Anordnungen
- Oberflächennahe Aktivitätsbereiche ↳ Anzapfungen "von außen" mgl. (Ein-/Auskopplungen)

Schwingeranordnungen sind oft selbst Bestandteil des Wellenleiters.
Insbes. Frequenzfilter sind leicht aus Interdigitalwandlern herstellbar.

ZB. Wichtungsfaktoren für einzelne Finger durch Länge einstellbar
↳ Bandfilterkurven, TP-, HP- mgl.!
(Einfügen von "Blindfingern" und "Aufspaltung von Fingern")

Sensor- bzw. Filteranordnungen enthalten meist 2 Interdigitalwandler (S-E)
Material in d. Regel Lithiumniobat
Photolitografische Herstellung, dh: Photolack ... Belichtung
Ätzung ...

ca. 1µm Streifenbreite mit sichtbarem Licht mgl.
für Anwendungen bei 1GHz ≙ Rayleighwellenlänge $\lambda_R \approx 3\mu m$

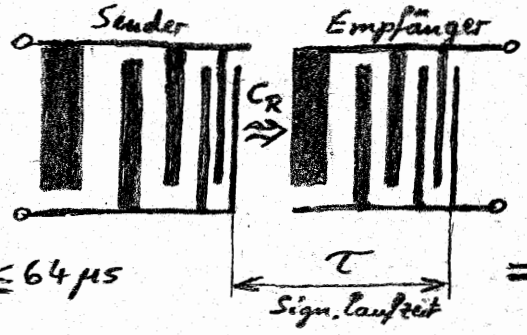
## Verzögerungsleitungen (Rayleigh-Wellen)

**Allg. Problem:** $\boxed{\text{Bandbreite}} \Longleftrightarrow \boxed{\text{Anregeenergie}}$

B wird kleiner mit steigender Fingerzahl (aus Bandfilterwirkung)

$W_{anr}$ wird kleiner mit sinkender Fingerzahl damit sinkt Störabstand d. Welle (da Einkopplung nur in kleine Volumina)

**Lösung:** Fingerabstände linear zu-/abnehmend ∿ hohe Bandbreite! erreichbar:




$\tau$ ia. $\leq 64\,\mu s$

Jeder Abschnitt des Wandlers erzeugt eine andere Rayleigh-wellenlänge (Fingerabstand $\hat{=} \lambda_R/2$). Die spektralen Bestandteile werden im Empfänger nach $\tau$ phasenrichtig add.

⟹ Empf.signal dann max., wenn deckungsgleiche Wandlerstruktur nach Laufzeit $\tau$ erreicht wird!

(Nebenmaxima durch Bandbegrenzung teilweise eliminierbar)

## "Matched Filtering" – Anwendung strukturierter Wandler

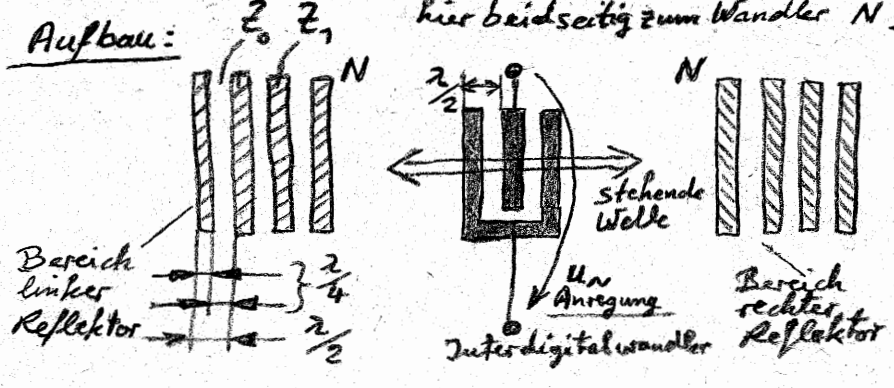
Nachrichten- u. Ortungstechnik verwenden an die Signalstruktur angepaßte Filter ≙ Korrelationsempfang stark verrauschter Signale! Ein binär strukturiertes Signal wird empfangen und läuft über eine Filterstruktur, die der Form des Signals entspricht ⟹ es entsteht die Autokorrelationsfkt. des übertragenen Signals (Faltung des Signals mit sich selbst)

hierfür Anwendg. von Signalformen / Wandlerstrukturen mit minimalen Nebenmaxima!, die ein starkes Maximum erzeugen:
→ Barker-Codes (Binärsignale)
→ Codes mit "Hamming-Fensterung" (zur Bandbegrenzg.)

## Resonatoren hoher Güte

Durch Rückführung der aus einem schwingenden Wandler ausgekoppelten Energie über Reflektoren sehr hoher Güte, dh. mit $|RG| \to 1{,}000000$ gehen die Wirkleistungsverluste $\to 0$, damit geht $Q_{Wandler} \to \infty$!:

**Aufbau:** hier beidseitig zum Wandler N nicht kontaktierte Reflektorstreifen,




diese bilden jew. verschiedene Rayleigh-Wellenwiderstände:
$Z_1$ – für (Metall)-belegte –
$Z_0$ – für unbelegte Bereiche!
Deren Vorder- und Rückkanten bilden Reflexionsflächen

↺ phasenrichtige Mehrfachreflexionen liefern Reflektoren sehr hoher Güte...

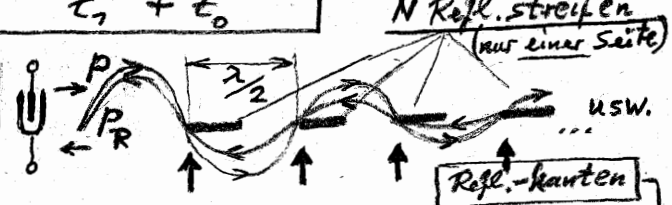
**Resultierender Reflexionsfaktor:**

$$\boxed{R_{ges} = \frac{Z_1^{2N} - Z_0^{2N}}{Z_1^{2N} + Z_0^{2N}}}$$

(ZB.) wird für

$$\frac{Z_1}{Z_0} = 1{,}05 \begin{cases} N = 20 \rightsquigarrow R_{ges} = 0{,}75 \\ N = 100 \rightsquigarrow R_{ges} = 0{,}99988 \; (!) \end{cases}$$

(Vgl. in Optik: Dichroitische Spiegel)

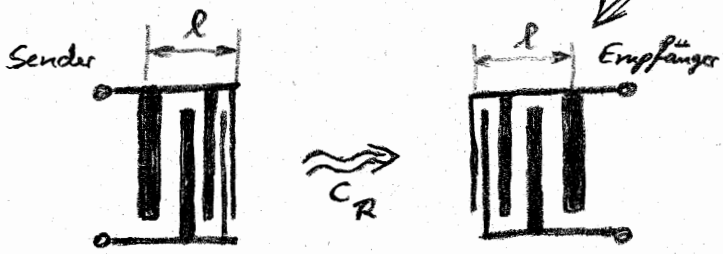



Hiermit wird ein Resonator (vgl. mit opt. Laserresonator) hoher Güte $Q \approx 10^5$ mgl.! , auch Bandfilter („Keramische Filter") realisierbar...

## Impulsdehnung und Impulskontraktion

- kurze Impulse auseinanderziehen
- bzw. so abgeänderte Signale auf ein spitzes Max. komprimieren

wie Verzögerungsleitung mit veränderl. Fingerabständen aufgebaut, nur Empfangswandler hier um 180° gedreht!




↘ frequenzabhängige Verzögerungszeit entsteht

Impulsantwort der Anordnung ist ein frequenzmoduliertes Sinus / Rechtecksignal

$$\text{Gesamtdauer } t_d = \frac{2l}{c_{Rayl.}}$$

**Anwendungen:**

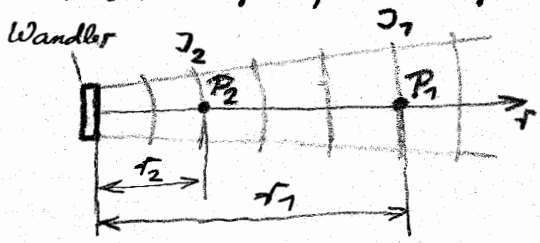
- so Erzeugung binär codierter Signale und die Decodierung binär codierter Signale ausführbar!

- Faltung von Signalen in Echtzeit durch Nutzung der Nichtlinearität des wellenleitenden Substrats mgl.!

# Ortung und Navigation, Wasserschall

**Schallintensität abh. von:** – geometrischer Dämpfung (Strahlaufweitung)
– Absorption u. Streuung
(und weiterhin Brechung, Reflexion, Krümmung)

Aus Abstand $r$ und der Absorption mit $\alpha$ = Absorptionskoeffizient ist die Bestimmung der Intensität im Pkt. 1 bezogen auf Pkt. 2 mgl:




$$\boxed{\frac{J_1}{J_2} = \overbrace{\left(\frac{r_2}{r_1}\right)^k}^{\text{geometr. Dämpfg.}} \cdot \overbrace{e^{-\alpha\cdot(r_1-r_2)}}^{\text{Absorption/Streuung}}}$$

$k$ kennzeichnet die "geometrische Dämpfung" in Abh. der Wellenart

$k = 2$ Kugelwelle
$= 1$ Zylinderwelle
$= 0$ Ebene Welle

**Absorptionskoeffizient in Meerwasser** (1 kHz ... 10 MHz)

$$\alpha = \left(\frac{2{,}34\cdot 10^{-6}\, S\, f_T\, f^2}{f_T^2 + f^2} + \frac{3{,}38\cdot 10^{-6} f^2}{f_T}\right)\left(1 - 6{,}54\cdot 10^{-9} P_0\right)$$

$f_T$ [kHz] ← Schallfrequenz [kHz]

$T$ [°C] $\quad \alpha$ [$m^{-1}$] $\quad f_T = 21{,}9\cdot 10^{\left(6 - \frac{1520}{T+273}\right)}$ $\quad$ Salzgehalt $S$ [‰] $\quad$ Druck $P_0$ [Pa]

**Schallgeschwindigkeit $c = f$ (Temperatur $T$, Salzgehalt $S$ u. Druck $P_0$)**

$$\boxed{c = 1449{,}2 + 4{,}62\,T + 0{,}1605\cdot 10^{-5} P_0 + 1{,}4\,(S - 35)}$$

$c\left[\frac{m}{s}\right]$ gilt im Bereich

| | |
|---|---|
| $T$ | $-4$ °C ... 30 °C |
| $S$ | 0 ... 37 ‰ |
| $P_0$ | $10^5$ Pa ... $10^8$ Pa |

Der Absorptionskoeffizient stark frequenzabhängig: $\alpha \approx 10^{-5}\,\frac{dB}{m}$ | 1 kHz
hier für $S = 3{,}5\%$ (Nordsee)

$\approx 0{,}5\,\frac{dB}{m}$ | 1 MHz

$\approx 50\,\frac{dB}{m}$ | 10 MHz

(wobei Änderung ≈ um Faktor 8 im Temp.-Bereich von 0 °C ... 30 °C mgl. ist)

– Die <u>Schallgeschw. c ist frequenzabhängig (Dispersion)</u>

$$\boxed{c(f) = c_0 \cdot \frac{1 + d/f_0^2}{1 + d/f^2}} \quad , \quad \Delta c \approx c_0\, d\, \frac{2\Delta f}{f_0^3}$$

d – Dispersionskonstante
$c_0$ – Schallgeschw. bei Frequenz $f_0$ (Bezug)

Dispersionskonstante d bei Wassertiefe 10 m: $d \approx 430\ s^{-2}$
50 m: $d \approx 37\ s^{-2}$
100 m: $d \approx 12\ s^{-2}$

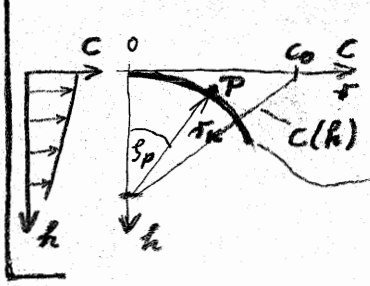
## Krümmung von Schallstrahlen – SOFAR-Kanal

Brechung akust. Wellen erzeugt Änderung der Ausbreitungsrichtung infolge räumlicher c-Änderung (kontinuierlich mit der Tiefe), da T, S und $P_0$ abhängig von Tiefe, Ort, Tages- u. Jahreszeit.
⇝ verschiedene <u>Schallgeschw.-Profile</u> stellen sich ein. Bei Überlagerung von Schallausbreitungswegen ⇝ Interferenzen

<u>Im SOFAR-Kanal</u> (<u>S</u>ound <u>f</u>inding <u>a</u>nd <u>r</u>anging) große Entfernungen (einige 100 km) überbrückbar!
Dieser Schallkanal liegt infolge der kontinuierlichen "Brechung" dabei jeweils im <u>Minimum</u> von $c(h)$: <u>s. folg. Seite ...</u>
$h \mathrel{\hat{=}}$ Tiefe

<u>Bem:</u>

Bei <u>konstantem c-Gradienten $g_c$</u> ist die Krümmungskurve ein Kreis mit dem Radius $r_k$

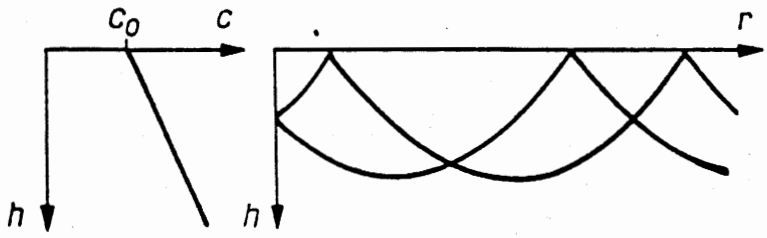



$$r_k = \frac{c_0}{g_c} = \frac{c_p}{g_c \cdot \cos \varrho_p}$$

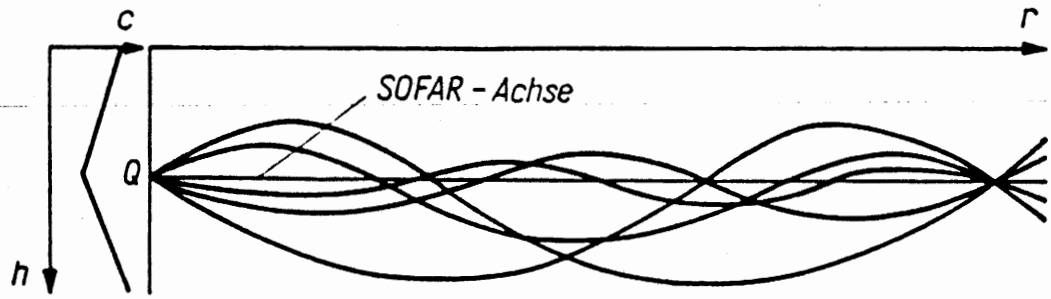
$c_p$ im Pkt. P
$c = c_0 + g_c \cdot h$
$g_c = \frac{c - c_0}{h}$

Schallstrahlausbreitung mit Radius $r_k$
⇝ "akustischer Horizont" ist gekrümmt!

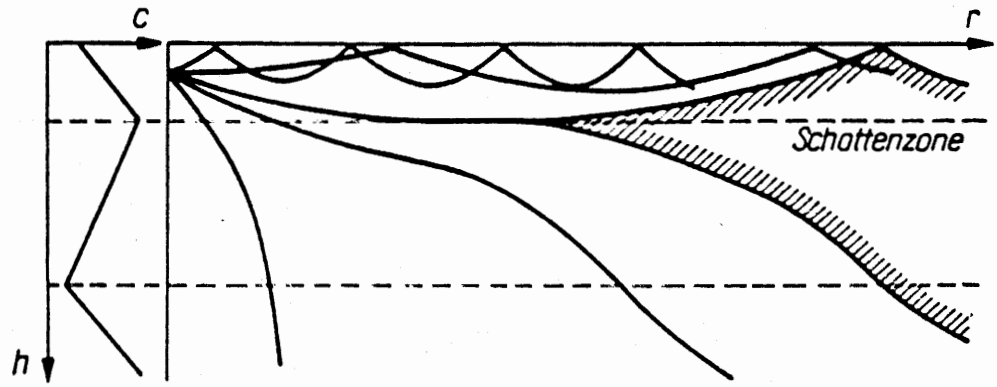
Störungen der Übertragung durch:
- Reverberation (Streuung im <u>gesamten</u> Kanal)
- Umgebungsrauschen u. elektron. Rauschen d. Anlage



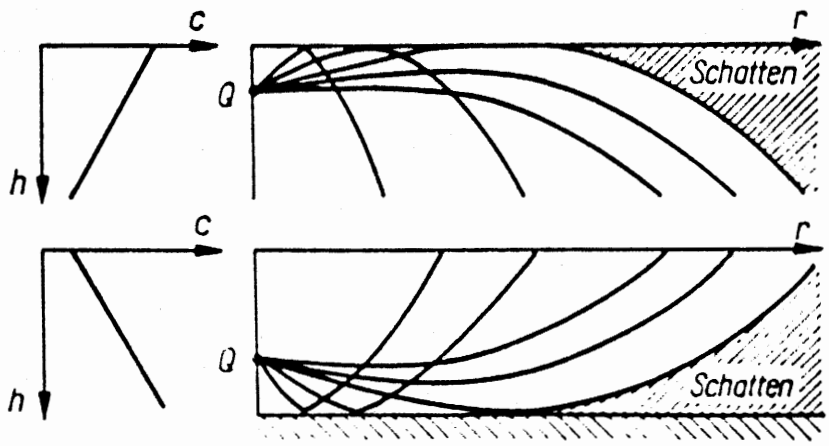

Schallausbreitungswege bei linearem Geschwindigkeitsprofil




Schallausbreitung im Sofarkanal




Schallausbreitungswege bei trilinearem Geschwindigkeitsprofil




Ausbildung von Schattenzonen an der Oberfläche und am Boden

# SONAR - Anwendungen

"Sound Navigation and Ranging" zur: aktive Ortungsverf.

- Ortung: Objektauffindung (Entfernung, Richtung, Geschwindigkeit) bzw. Parameterbestimmung (Anzahl, Größe, Form, physikal. Parameter)
- Navigation: Standort, Fahrtrichtungs- u. Geschwindigk.-bestimmung des eigenen Fahrzeugs
- Nachrichtenübertragung: (in $H_2O$ el.-mgnet. Wellen hoch absorbiert ...)

Echolotung ↷ Echogramme des Bodens, Fischortung

Seitensichtsonar ↷ Echogr. der seitlich vom Schiff befindl. Bodenoberfläche. nichtlineare Abbildung! vom Schiff gezogene Einheiten verw.

Suchstrahlsonar, RDT ~ ↷ Horizontalortung von Objekten, rotierende Richtungssendung - RDT

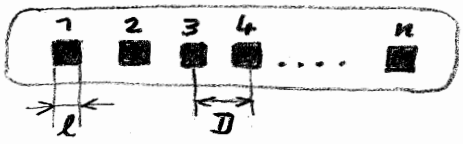
Abtastsonar ↷ Sonde ∢ 360° wie Radar, auch elektron. Strahlschwenkung

Dopplersonar ↷ Geschwindigkeitsmessung über Grund bis 500 m Tiefe

Sedimentsonar ↷ Querschnittsdarstellungen von Boden- / Sedimentschichten bis 30 m Eindringtiefe

## Schwinger - Arrays (Parallelansteuerung)

zur Erhöhung der horizontalen Auflösung (Verringerung d. Öffnungs∢)
Einsatz von Linienarrays aus n-Elementen mit Richtcharakteristik $T(\vartheta)$



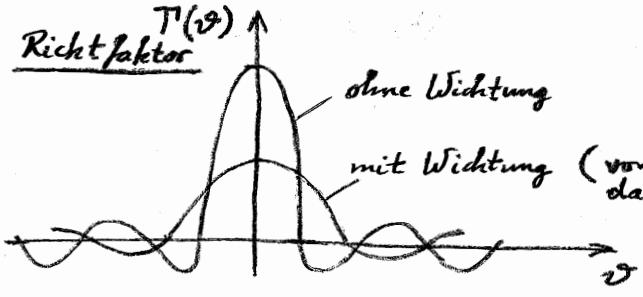

n - Schwinger (oberflächen)
D - Abstand

$$T(\vartheta) = \frac{\sin\left(\frac{\pi \cdot l}{\lambda}\sin\vartheta\right)\cdot\sin\left(n\frac{\pi D}{\lambda}\sin\vartheta\right)}{\frac{\pi\cdot l}{\lambda}\sin\vartheta\cdot n\cdot\sin\left(\frac{\pi D}{\lambda}\sin\vartheta\right)}$$

$\vartheta$ - Abstrahl∢ innerhalb der Richtcharakteristik, hier keine Strahlschwenkung!

Mit Einführung einer Wichtungsfktn. zur Bewertung der n-Empfängerspannungen symmetrisch zum Mittenelement ist erreichbar:
- Verringerung der Nebenmaxima geg. Hauptmaximum
- Vergrößerung des Öffnungs∢

Richtfaktor




ohne Wichtung

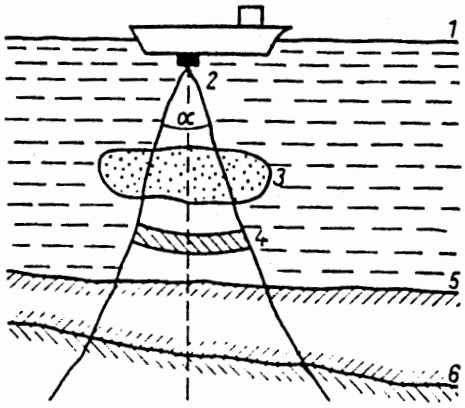
mit Wichtung (von der Mitte nach außen abnehmende Verstärkung.) damit allerdings auch Verringerung der res. Empf.spannung!

↷ mögliche entstehende Richtdiagramme ...

Es werden vor allem folgende *aktive Ortungsverfahren* angewendet:

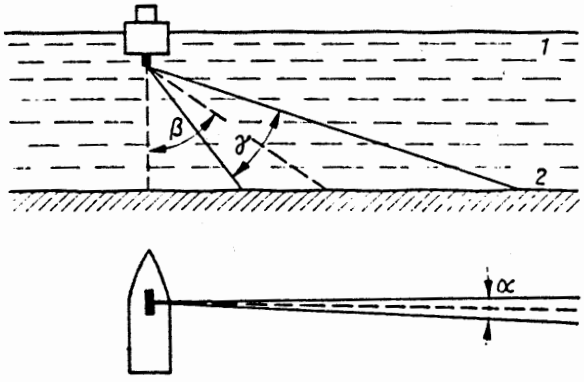
- Echolotung
- Seitensichtsonar (Side-scan-Sonar)
- Suchstrahlsonar
- Abtastsonare (Scanning- und Sector-scanning-Sonar)
- Sonar mit rotierender Richtungssendung (RDT-Sonar)

**Echolotung**



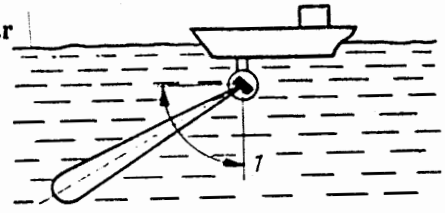

Prinzip der Echolotung
*1* Wasseroberfläche, *2* Schallwandler, *3* Fischschwarm, *4* Sendeimpuls, *5* Boden, *6* Schichtgrenze

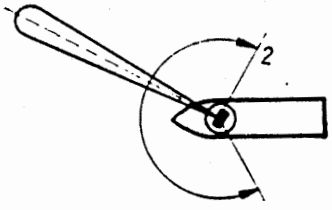
**Seitensichtsonar**




Prinzip des Seitensichtsonars
*1* Wasseroberfläche, *2* Boden

**Suchstrahlsonar**

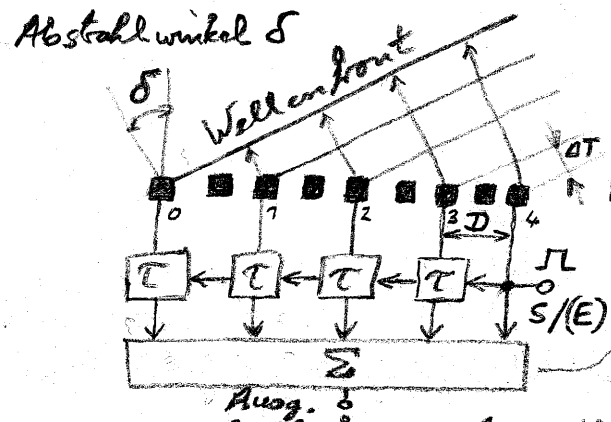



Prinzip des Suchstrahlsonars
*1* Kippbereich, *2* Schwenkbereich

# Elektronische Schallstrahlschwenkung (Phased Array)

**Methode:**
- additive oder multiplikative Signalverarbeitung von Wandlerarrays (Linien- oder Flächenarrays)
- phasenverschobene Erzeugung der Ausgangssignale der Array-Elemente (bzw. phasenverschobene Add. der Empfangssignale)




Für Abstrahl∡δ erforderl. Zeitverzögerung τ:

$$\boxed{\Delta T = \frac{D \cdot \sin\delta}{c} = \tau}$$

↓ $\delta = \arcsin \frac{\tau \cdot c}{D}$

Nutzung als Sender und Empfänger: laufzeitelem. / Empfangsseitig τ-verschobene Summenbildung (Σ) als Option.

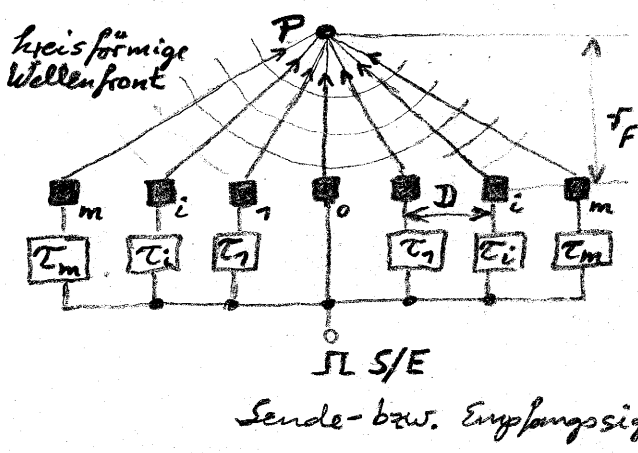
gleichphasige Addition (Empfang), wenn τ = ΔT gewählt.

**Nachteil:** Beim Schwenken Vergrößerung der Nebenmaxima mit steigendem ∡δ, Nebenmax. übersteigt urspr. Hauptmaximum!
Effekt ↑ mit sinkender Elementezahl / Länge und liefert eine unsymmetrische Richtcharakteristik

↓ für größere Schwenkwinkel besser Zylinder- oder Kugelanordnungen oder abgewinkelte Linienarrays als Elementeanordnung

**Elektron. Lösung:**
- digitale / analoge Verzögerungsglieder
- kontinuierliche Schwenkung durch FM-Signale

## Schallstrahlfokussierung




gleiche Ansteuerhardware wie oben ... nur andere u. verschiedene $\tau_i$

$r_F$ Brennpkt.abstand

Wandleranzahl 2m+1

$$\boxed{\tau_i = \frac{\sqrt{r_F^2 + (D \cdot i)^2} - r_F}{c}}$$

Einstellung der Verzögerzeiten $\tau_i$ für bestimmte Brennweite $r_F$

Bem: in Wasser wird Ultraschall zur Nachrichtenübertragung u. Navigation eingesetzt!
El.-magnet. Wellen werden (wegen der hohen elektr. Leitfähigkeit) zu stark gedämpft.

↓ SONAR-Technik (Sound Navigation and Ranging)

## Parametrisch-akustischer Effekt

Mit hohem Schalldruck gesendete Wellen verformen sich, Anteile mit höherem Schalldruck haben eine höhere Ausbreitungsgeschwindigkeit als Anteile im Druckminima.

↓ Sinussignal wird zu Sägezahn verformt (s. S. 1-39)

Dieser nichtlineare Effekt führt in der Abstrahlungskeule des Sendeschwingers zur Entstehung eines Frequenzspektrums! ...

Bei Abstrahlung von 2 Frequenzen $f_1$ und $f_2$ entstehen z.B. durch Mischung Differenz- und Summenfrequenzen!

⟹ Techn. Anwendungen:

a.) Hochauflösende (Sediment) Echolote

- hochfrequente Abstrahlung (≈ 100 kHz) sichert:
  - schmale Hauptkeule, fast keine störenden Nebenkeulen (hohe horizontale Auflösung)
  - kurze Abklingzeiten des Sendesignals / kleine Wandler (hohe vertikale Auflösung)
- niederfrequentes Frequenzdifferenzsignal (Mischprodukt) liefert
  - große Eindringtiefe wegen exp. geringerer Dämpfung

dh. es können scharf gebündelte niederfrequente Signale kurzer zeitlicher Länge gesendet werden.
hohe relative Bandbreite des Mischprodukts erreichbar.

Als Empfänger entweder die hochfrequenten Wandler selbst oder auch extra Hydrofone verwendet / Auch phasengesteuerte Arrays.

leichte Einstellbarkeit der Frequenz des Mischprodukts, damit Mehrfrequenzverfahren (für verschied. Sedimentmaterialien) mgl.

b.) Räumlich begrenzte Beschallung

- zB. Audio-Information in Ausstellungen / Museen u. für Werbung seit ≈ 2008 eingesetzt. Amplitudenmodulierte US-Abstrahlung! Das NF-Signal entsteht infolge der Nichtlinearität ("Selbstdemodulation") der Wellenausbreitung (s.o.)