2014

Meß- und Prüftechnik

1.) Entfernungsmessung → Laufzeitmessung

Voraussetzung: c muß bekannt sein!, bzw. meßbar mit Referenzstr.

- Füllstandsmessung (horiz./vertikal durch Luft/Flüss.)
- Abstandsmessung für Kfz.: $x = c \cdot \frac{t}{2}$ (wg. Hin + Rückl.)

2.) Geschwindigkeits (differenz) messung nach Doppler-Verf.

$$f_{Rück} = f_s \frac{1 + \frac{v_0}{c}}{1 - \frac{v_0}{c}}$$

f_s – Sendefrequenz
v_0 – Bewegungsgeschw. des Objekts
c – Schallgeschw. im Medium

≈2fache Frequenzveränderung für $f_{Rück}$!

S/E dicht benachbart,
für $v_0 \ll c$ wird: $\boxed{\Delta f = f_{Rück} - f_s \approx 2 \frac{v_0}{c} f_s}$

dh. gemessen wird die Relativgeschw. zwischen Meßgerät u. "Reflektor"

3.) Abstandsmessung FMCW-Verfahren

= Frequency Modulated Continuous Wave-Verf.
Meist für Radar "fallen" aber auch für US-Meßtechnik:
Sendesignal wird in linearen Rampen frequenzmoduliert $f_s(t)$
gleichzeitig wird empfangen und gemischt ($\rightsquigarrow \Delta f = f_s - f_{empf}$)

Messung des Objektabstands:

aus $\Delta f \sim \tau$ = Signallaufzeit
dh.: $\Delta f \sim x$ = Objektabstand

(Auflösung hängt vom erzeugten Frequenzhub ab)

⇒ Objektabstand x

aus $\Delta f = \tau \cdot \underbrace{\frac{\Delta f_s}{\Delta t}}_{k_s = \text{Anstieg } f_s(t)}$ ⇝ $\tau = \frac{1}{k_s} \cdot \Delta f$ (Zählfrequenzmesser) damit $x = c \cdot \tau / 2$

$$\boxed{x = \frac{c}{2 k_s} \cdot \Delta f}$$

⇒ Relativgeschwindigkeit

des reflekt. Objekts aus Dopplerverschiebung (s.o.), beachte zur Näherung $v_0 \ll c$ (!)

4.) Zerstörungsfreie Prüfverfahren

Prüfung auf: Risse, Inhomgenitäten, allg. Fehlstellen ...
aber auch auf: Abmessungen, Schallgeschwindigkt., Dämpfung,
Hierzu Vielzahl an Prüfverfahren (mit entspr. Prüfköpfen)...
⇒ Buch: Springer-Verlag/ Krautkrämer J. u. H.: "Werkstoffprüfung mit Ultraschall"

Ultraschallprüfgerät

Einschallrichtungen

(●) ***orthogonal***
als Sonderfall der schrägen Einschallung bzw. des Empfangs anzusehen; parallel zur Prüffläche (d. h. in der Prüffläche) und damit orthogonal zur Prüfflächennormalen; notwendig zur Erzeugung und zum Empfang bestimmter Wellenarten (z. B. RAYLEIGH- und Kriechwellen) durch Vorlauftechnik

---

Ultraschallmessungen

Bild : Schallwandleranordnungen für Ultraschallsensoren. (1) Reflexionsverfahren, (2) Transmissionsverfahren, (3) Emissionsverfahren, (4) Resonanzverfahren.

Zerstörungsfreie Materialprüfung

- Prüfung von Werkstücken (Signallaufzeit, Reflexion, Dämpfg
- Untersuchg. v. Materialien (Schallgeschw., Dämpfung, Streuung

→ Übersicht: Ultraschallprüfg. Einschallung und Impulserzeugung am Schwingern

Durchstrahlungsverfahren	Reflexionsverfahren
Auswertung von Phase, Amplitude → Schalldurchgang mgl.? günstig für Bleche, Fehlernester (F.-anhäufung.) (2 Schwinger) nur integrale Information über Schallpfad	Auswertung v. Phase, Frequenz, Amplitude → Reflexion / Rückstreuung vorh.? auch Dickenmessung (Laufzeitverf.) ↳ „Impulsechoverfahren" (meist nur 1 Schwinger) ermöglicht spez. Lagebestimg. v. Fehlern

Spez. Beispiel: Dickenmsng. mit veränderl. Frequenz

wenn $d = n\frac{\lambda}{2}$, $n = 1, 2, 3 \ldots$

↳ Dickenresonanz mit Rückwirkg. auf Wandler

Mit Materialfehler (≙ Grenzflächen) innerh. des Prüflings wird die regelmäßige Abfolge der Resonanzfrequenzen verändert!

Allg. Problem: Abmessungen der Störungen $\leq \lambda_{Schall}$:

hierbei entstehen Beugungs- und Streuwellen um den Fehler herum!

Der Rückstreuquerschnitt Q_r gibt hierfür die relative Leistung an, die zum Wandler zurückkommt: (vgl. S. 1-37)

Q_r ≙ bei großen Fehlern ($\lambda \ll \emptyset$) dem visuellen Querschnitt

Q_r ≙ bei kleinen Fehlern ($\lambda > \emptyset$) einem kleineren Querschnitt (extrem unterschiedlich bei schallharten Hindern.)

↳ für Fehler < λ
Allg. schlechte Detektionsprognose!

Für Festkörper ist die Betrachtung der Wirkung von Störungen / Streukörpern wesentlich komplexer als in Flüssigkeiten wegen der auftr. Wellentypumwandlungen: ↳ wesentl. kompliziertes Streuverhalten zu erwarten in der Werkstoffprüfung ...

Intensitätsbestimmung des rückgestreuten Signals beim Impulsechoverfahren

hierzu ist besonders einfach die Betrachtung wie bei Einlagerungen in Flüssigkeiten: Aus Def.-Gl. für Q_r

Intensität des rückgestreuten Signals:

$$\boxed{J_s = \frac{Q_r}{4\pi r^2} J_0} \qquad (*)$$

mit Q_r – Rückstreuquerschnitt des Fehlers
J_0 – Intens. d. einfall. Welle am Fehlerort

wobei Meßentf. $r \geq$ Fernfeldentfernung, dh. ausgehend v. Kugelwelle als Primärwelle.

anschaulich wird: $\frac{J_s}{J_0} = \frac{\text{Rückstreuquerschnitt } Q_r}{\text{Kugeloberfläche mit Radius } r}$

Wenn Fehler axial in der Hauptstrahlrichtung eines Kreiskolbenstrahlers liegt,
ist allg. $J_0 = Z_0 \cdot \overline{u^2} = \frac{\overline{p^2}}{Z_0} \quad (= \overline{p \cdot u})$

und unter Berücks. der Richtungsabhängigkeit des Schalldrucks $p(r, \vartheta, t) \rightarrow$ s. S. 3-4) für den Kreiskolbenstrahler

wird mit $\vartheta = 0$ — Besselfktn.

entsprechend $\lim\limits_{x \to 0} \frac{2 J_1(x)}{x} = 1$

S_0 – Wandleroberfläche
u_0 – Schnelle auf Wdl.oberfl.

die Intensität der einfallend. Welle am Fehlerort

$$\boxed{J_0 = \frac{\overline{p^2}}{\rho_0 c} = \frac{\rho_0 \omega^2 S_0^2 \overline{u_0^2}}{4\pi^2 r^2 c}} \qquad (**)$$

Vergleich: ∞-ausgedehnter Wandler würde mit der gleichen Schnelle u die Intensität (vergleichsweise Intensität am Sendeschwinger und am Fehlerort): $J_0' = \rho_0 \cdot c \, \overline{u_0^2}$ erzeugen. Dh. ohne Berücks. der Absorption und der geometr. Dämpfung

Hiermit, und mit $\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot c$

$$\curvearrowright \quad J_0 = \frac{S_0^2}{r^2 \lambda^2} J_0' \qquad (***)$$

Damit folgt aus Gleichg. (*) die Intensität des rückgestreuten Signals:

$$\boxed{J_s = \frac{Q_r}{4\pi} \cdot \frac{S_0^2}{r^4 \lambda^2} J_0'}$$

(!) J_0' – Intensität am Fehlerort

Erkennbar: Starke Abnahme der Streuintensität mit der Entfernung, hier $\frac{1}{r^4}$-Abhängigkeit!

Beispiel: Ergebnis für rückgestreute Intensität für einen schallweichen Kreisscheibenfehler (flacher Hohlraum ⊥ Strahlrichtung)

Wenn die Fehlerabmessungen > λ, gilt an dessen Oberfläche: (Grenzflächen-Bedingungen für freie Grenzfläche)

$p \Rightarrow 0$ dh. Schalldruck verschwindet

$u \Rightarrow 2 \cdot \underbrace{u(r)}_{\text{Sch.schnelle der einfallenden Welle verdoppelt}}$

Man kann $u(r)$ deshalb auch als Schallschnelle der vom Fehler an dessen Oberfläche erzeugten Streuwelle einsetzen!

Ersetzt man in (**) nun u_0 durch $u(r)$ und S_0 durch S' (= dem Wandler zugewandter Fehlerfläche)

Streuintensität am Wandler:

$$J_s = \frac{\rho_0 \omega^2 S'^2 \cdot \overline{(u(r))^2}}{4\pi^2 r^2 c} = \frac{S'^2}{r^2 \lambda^2} \cdot J_0 \quad (***)$$

wird nun noch J_0 aus (***) eingesetzt,

so wird

$$\boxed{J_s = \left(\frac{S_0 S'}{r^2 \lambda^2}\right)^2 \cdot J_0'} = f(S_0, S', r, \lambda)$$

(!) ⇒ J_s des rückgestreuten Signals abhängig von Wandlergröße S_0, Fehlergröße S', Meßentfernung u. Wellenlänge

Bem: Rückstreuquerschnitt zu ermitteln aus (***) und (*):

$$\boxed{Q_r = 4\pi \frac{S'^2}{\lambda^2}}$$

gilt unter den hier gemachten Annahmen für den schallweichen Kreisscheibenfehler!

Achtung: Für Fehler mit großer Ausdehnung gilt o.g. nicht, da dann i.a. Wandler im Nahfeldbereich des rückgestrahlten Schallfeldes liegt.

dann: Reflexionsgesetze anwenden mit $J_s \sim 1/r^2$ (und nicht $\sim 1/r^4$). Außerdem stark Lage ∡ abhängig

Allgemein beschränkte Aussagekraft des Fehlerechos, es liefert keine Abbildung!

(!) **Probleme:**
- o.g. Ableitung gilt nur für Hindernisse in Flüssigkeiten, dh. keine Wellentypumwandlungen ...
- Art und Größe des Materialfehlers nicht erkennbar!
- Q_r von vielen Einflußgrößen abhängig (nur wenn $\varnothing \ll \lambda$ dominiert der Größeneinfluß des Fehlers, auch Z_0 des Fehlers zu berücksichtigen)

Prüffrequenzen: abh. von Dämpfung des Signals
Metalle: 0,5 ... 4 MHz
Beton, Stein: < 300 kHz (da grobkörnig)
↯ Streuung!

Wellenarten:

- L-Wellen: einfache Erzeugung u. Ankopplung
- T-Wellen: gut zur Testung von "Schrumpfsitzen" (zB. ist kraftschlüssige Verbdg vorhanden?) L-Wellen würden hier bei Übergängen mit Öl-Kontakt ungestört hindurchgehen!
- Oberflächenwellen: kaum anglw., da keine Eindringtiefe!

Prüfköpfe

Erf. Kompromiß zwischen Max. des elektr. Signals und Dämpfung d. Wandlers
Kurze Schallimpulse (hohe Bandbreite B) erlauben die hohe zeitl. Auflösung der Echoimpulse – erreichbar durch hohe Dämpfung die weiterhin zur Verringerung der inneren Schwingungen / Reflexionen im Kopf führt.

a)

Normalprüfkopf

⟹ für B↑ reflexionsfreier Abschluß des Wandlers an der Rückseite erforderlich:

- dh. Material mit starker Dämpfung verw., meist Gießharze, eingestellt
- ca. auf gleiches Z_0 wie Wandler, indem Wolframpulver beigemischt wird bis der hohe Schallkennwid. erreicht ist!

b)

der sphärisch konkav gekr. Wandler erz. "Fokalschlauch"
mit Durchmesser $d_F \approx \frac{\lambda \cdot f'}{D}$ mit Länge $L_F \approx 7\lambda \cdot \left(\frac{f'}{D}\right)^2$
(jew. bezogen auf $\frac{\lambda_0}{2}$)

Fokusschwinger (Kalottenschwinger)

Koppelmedien: dünne Schicht zähes Öl, Fett, H_2O, Zellulosepaste, zähe Zuckerlösung
wirkt mit $f_{grenz} \approx \frac{0{,}02\ \text{MHz}}{b/\text{mm}}$ allerdings als akust. Tiefpaß!

c.) SE-Prüfkopf mit Vorlaufstrecke (enthält 2 Wandler)

(!) Für oberflächennahe Bereiche wird erreicht:
- Eliminierung der Nahfeldeffekte des Wandlers
- Zeitliche Trennung von Sende- und Empfangsimpuls durch Vorlaufstrecke

[Vorlauf kann auch
- ein Wasserstrahl
- eine Wasserbad-Strecke sein!
(sog. "Immersionstechnik", s.u.)]

d.) Winkelprüfkopf

Mit zähem Fett angekoppelt, da meist zur Abstrahlung nur (!) von Transv.-Wellen genutzt:

$$\vartheta_T' = \arcsin\left(\frac{c_T'}{c_L}\cdot\sin\vartheta_0\right)$$

ϑ_0, c_L im Ankoppelkeil d. Schwingers
ϑ_T', c_T' im Prüfmaterial

, i.a. entstehen L- und T-Wellen im angekopp. Medium

Für Einkopplung nur einer T-Welle ist der ∡-Bereich zwischen Grenz∡ der Totalreflexion für L- und T-Welle nutzbar:

(zB:) für Plexiglas / Stahl: $\vartheta_{L_0} = 27{,}6°$ ↷ T-Welle mit $\vartheta_T' = 33°$ in den Prüfling hinein
(nur mgl., wenn $c_L' > c_L$) $\vartheta_{T_0} = 57{,}7°$ auch T-Welle verschwindet

e.) Beliebige Einstrahlwinkel sind möglich:

- Winkelprüfkopf mit einstellbarem Einstrahl∡ ϑ
- Einstrahlung von L- u. T-Wellen bei beliebigem Einstrahl∡ mit "Immersionstechnik" (Prüfling im Wasserbad)

einstellbarer Einstrahlwinkel

Immersionstechnik

Bildliche Darstellungsarten

1 Dimensional : "A-Scan"

Oszillogrammdarst., Zeitachse ≙ Laufzeit
↓ Echoform bewertbar (Amplitudenbewertung)
daraus ev. Rückschlüsse auf Art u. Größe des Fehlers.
allerdings oft auch "Glättung" des Empf.-signals durch Gleichrichtung (Hüllkurvendarst.) u. logarithm. Verstärkungskennlinie.
unhandlich für größere Prüfgebiete, da erf. Vergleich vieler nacheinander aufgen. Bilder... erf.

2 Dimensional : "B-Scan"

liefert Schnittbild, hier Helligkeitssteuerung aus den empf. Echos (Brightness), "zeilenweise".
Entweder 1 Wandler linear verschoben oder geschwenkt (erford. Weggeber für Ortserfassung)
oder Anwendung von Wandler-Zeilen (Array's) mit elektron. Abtastung, zB. zeitserieller Durchlauf.
↓ Konturen des Fehlers... erkennbar, Grauwertbild.

3 Dimensional : "C-Scan"

liefert Zerlegung des Prüflings in einzelne Tiefenschichten, Echos aus der Fläche werden helligkeitsgesteuert.
entweder Wandler(zeile) linear verschoben
oder Flächenarray (Matrix) aufgestellt.
Tiefenauflösung entsteht durch laufzeitgesteuerte Torschaltung für das Empfangssignal.
↓ Flächenhafte Abbildung in versch. Tiefen entsteht.

Prüfbarkeit verschied. Materialien

Stein, Beton: i.a. $f \leq 100\,kHz$, da grobkörnig / porös ($c \approx 2000 \ldots 4500\,\frac{m}{s}$)
hohe Dämpfung u. Streuung im ganzen Volumen
↓ "Störuntergrund" → nicht Intensitätserhöhung, sondern nur f ↓ sinnvoll! ↓ auch Auflösung ↓.

Stahl: bei 1 MHz einige m Eindringtiefe
sehr gute Prüfbarkeit für die meisten St.-Sorten!

Grauguß: $f < 1\,MHz$ wegen Grafiteinschlüssen (↓ hohe Schallstreuung)

Cu, Bronze: kristallin, stark anisotrop, (Zink - sehr große Kristalle) ↓ schlecht prüfbar

Al, Magnesium: gut prüfbar, da geringe Anisotropie

Kunststoffe: hohe Absorption → steigt mit "Weichheit"

Keramik: Porzellan gut bis 5 MHz prüfbar!

(!) geringe Dämpfg. bringt Probleme ↯ Mehrfachreflexionen! ...

Beispiele:

Prüfung auf Querrisse (Bleche ausreichender Dicke)

Blech:

Echo in mehreren Abständen mit "Sprungabstand" s_A

$$s_A = 2b \cdot \tan\vartheta$$

Prüfung an Rohren / Kesseln

Rohr:

mit verschiedenen Prüfköpfen: Solldicke / Umfang / Risse prüfbar ...

auf Spiralbahnen "abzufahren" (z.B. Rohr drehend in Wassertank oder Kranz von Schwingern drehend ums Rohr in axialer Bewegung)

Prüfung an Eisenbahnschienen

auf:
- Querrisse im Schienenkopf
- Laschenlochbrüche im Steg

Schiene:

(zur Erhöhung der Prüfsicherheit schräg liegender Fehler, bei 35° u. 70°)

bis 50 km/h Fahrgeschw. mit mehreren Prüfköpfen

Positionierg. durch Schwellenzählung zw. Kilometersteinen, alle 2 mm erfolgt eine Messung!

≙ 5-Kanalaufzeichnung (1×L-Welle, 4×T-Welle) als "sehr langes" B-Bild ↯ elektronische Auswertung ... erf.

Anwendungen in der Medizin (Sonografie)

- i.a. Reflexionsverfahren (Impulsechoverf.), da Wandler auf Körperoberfläche aufgesetzt, nur L-Wellen (Gewebe ≙ Flüssigkeit)
- Kompromiß zwischen Eindringtiefe (≤ 20 cm) und Auflösung mit Wandlerfrequenzen 1 ... 10 MHz erreichbar.
- Meist B-scan-Darstellung, durch Echtzeitmessung auch Bewegungsvorgänge darstellbar (Organbewegung, Peristaltik, Herzklappen) hierzu auch Doppler-Verfahren genutzt ...

Akustische Eigenschaften biologischer Gewebe

Gewebeart bzw. Medium	Schallgeschwindigkeit c_L (m/s)	Wellenwiderstand $\varrho_0 c_L$ ($10^6 \cdot Ns/m^3$)	Dämpfungsmaß D bei 1 MHz (dB/cm)
Blut	1530	1,62	0,2
Milz	1550	1,6	0,4
Leber	1560	1,65	0,7
Fett	1450	1,38	0,8
Gehirn	1560	1,60	0,8
Muskel	1545–1630	1,65–1,74	1,5–2,5
Knochen	2700–4100	3,2 –7,4	11
Lunge	650–1160	0,26–0,46	40
z. Vgl.: (Wasser)	1492	1,49	0,002

↓ Knochen: hohe Dämpfung ≙ ≈ schallundurchlässig, hinter knöcherner Umhüllung liegende Organe nicht erkennbar (zB. Gehirn)

↑ Lunge: gasgefüllte Hohlräume ≈ schallundurchlässig

Anwendung B-scan-Darstellung (Bildgebendes Verf., Schnittbilddarst.)

kontinuierliche Veränderung d. Schallstrahlrichtung liefert helligkeitsmodulierte flächenhafte Darstellung der Gewebegrenzflächen (Bildspeicherung)
Bis zu 30 Querschnittsbilder/sec mgl. durch Automatische Abtastung

Mechanische Sektorabtastung

Schwenkbar
1 Wandler

Rotierend
3–5 Wandler

in H_2O gelagert, das Trägermaterial wirkt als Dämpfungskörper

⇒ gute Ankoppelbarkeit aber sinkende Auflösung mit ↑ Abstand

Elektronische Parallelabtastung

60 – 400 Wandler (Array) werden zeitseriell aktiviert.

Variationsmgl.keiten der elektron. Abtastung nutzbar (phased array) für elektr. Strahlschwenkung / Fokussierung ...

⇒ hohe Bildfolge erreichbar
dichte Strahlenüberdeckung der Meßebene
≈ const. seitliche Auflösung

Send/receive field in water (4MHz,D=10mm,z=67mm)
x/mm
y/mm
5
4
3
2
1
0
-1
-2
-3
-4
-5
-5
-4
-3
-2
-1
0
1
2
3
4
5
-2 dB
-4 dB
-6 dB
-8 dB
-10dB
-12dB
-14dB

Bündelung in 2. Koordinate durch lange Zylinderlinse! ausgeführt.
Nutzung "Elektronischer Tiefenausgleich": wegen

- ≈ exp. Entfernungsgesetz der Dämpfung sowie
- $\frac{1}{x}$ - Abhängigkeit für $p(x)$ bei Kugelwellen

... erfolgt Nachregelung der Empf.-Verstärkung mit der Abb.-tiefe!

Örtliches Auflösungsvermögen:

- lateral (⊥ zur Strahlachse): aus Schalldruckverteilung über der Querschnittsfläche im Fokalbereich wird 6 dB-Grenze definiert (wegen 2x Schalldurchlauf Sende-Empfang ist Quadrat des Schalldruckverlaufs zu berücks.
  (zB.:) 4 MHz-Wandler, Ø 10 mm, Nahfeldlänge = Fokus = 67 mm
  ↳ 6 dB-Grenze bei "effekt. Strahlbreite" ≈ 2,8 mm
- axial (längs der Strahlrichtung): bestimmt durch λ. ↳ abhängig von f und Dauer / Form des US-Signal-Bursts
  (zB.:) bei 4 MHz ≙ λ ≈ 0,37 mm ↳ ert. Auflösg. ≈ 0,55 mm

Bei Sektorabtastung entsteht ein Sektorbild:

auf Bildschirm auswertbarer 90°-Darstellungsbereich

Untersuchung von Lage u. Form innerer Organe
"B-scan", dabei ist der Helligkeitsbereich (≙ Reflekt. Signal) anpaßbar durch lin./nichtlin. Kompression / Expansion

Anwendungen als: → statisches (von Hand geführtes) B-Scan mit Koppelgel
→ Automatisches B-scan im Wasserbad (+ Sectorscan u. Rotationsscan)

"Compound-Scanning-Verfahren"

zur Ermittlung der Meßgeometrie, dh. ∢ϑ und Koordinaten x, y: werden aus $\vartheta_1 \dots \vartheta_3$ bestimmt. (Potentiometerabtastung)
↳ errechenbar ist genaue Lage der Abtastebene.

Doppler-Sonografie

nutzt Dopplereffekt
(hier Sende-Empf.-Kopf verw.)
Veränderung der Empf.-Frequenz:

$$\boxed{\Delta f = 2 \frac{v}{c \cdot \cos\vartheta} \cdot f_s}$$

(Blutfluß auf Sender zu gerichtet ↳ Δf positiv)

Bem: In Aorta ist $v_{Blut} \leq 1 \frac{m}{s}$!

(zB) Arterienverengung (-verschluß) = Thrombose feststellbar...
Herzfrequenzbestimmung bei Neugeborenen, "Time Motion"-Unters. an Herzklappen.

Zur Begrenzung der "Meßgenauigkeit" in der Medizin:

- Verschiedene c der einzelnen Gewebe
  ↓ Tiefenmaßstab der Darstellung wird verzerrt

- Verschiedene Reflexionsfaktoren der Gewebegrenzen
  ↓ Grenzflächen unterschiedlich hell abgebildet

- Dämpfung = f (Gewebe)
  ↓ "dahinterliegende" Bereiche stärker im Rauschen.
  Elektron. Tiefenausgleich nur begrenzt anwendbar!

- Positiergenauigkeit des von Hand geführten Wandlers auf der Körperoberfläche ist begrenzt
  ↓ Einschränkung der Meßgenauigkeit z.B. der Doppler-Blutgeschwindigkeits-Messung als Auswerteoption bei B-Bild-Geräten
  (auch Lage/Verlauf der Gefäße ist variabel...)

Spezielle Abbildende Verfahren

Allg. sollte $\lambda \lesssim$ Objekt sein, sonst nur Beugungswelle, → um Objekt "herum gebeugt", dk. Objekt – ohne Schattenbildung – ohne Streustrahlung!

Auflösung:

Für Vergleich mit Lichtmikroskop ↷ erforderl. akust. Frequenz 1,5 GHz ($\lambda_{H_2O} \approx 1\,\mu m$)

(!) dabei aber Dämpfg.: des Koppelmediums beachten!

[↷ mgl. Signalaufwege < 100 µm!]

> 190 dB/mm	in H_2O
> 50 dB/mm	in Quecksilber
einige dB/mm	in Saphir (Al_2O_3-Einkristall)

jeweils bei 1 GHz

1.) Flächensensor

Kontaktbild des dämpfenden Objekts: piezoelektr. Schicht mit fotoleitender Schicht bedeckt, diese wird mit Laserstrahl abgerastert: dadurch Pkt.-weise Abführung der entst. Bildpunktladung ... dh. der Piezoladung. ↷ Flächenabtastg. der Schallamplitude .. mgl.

2.) US-Mikroskop

Dünnschicht-Wandler (bis ≤ 8 GHz): Zinkoxid durch Kathodenzerstäubg. auf Saphir aufgetragen

(cw-Verfahren)

(Impuls-Verfahren)

Meßbar: → Amplituden- u. Phasenverhältnisse (phasenempfindl. Gleichrichter) an Grenzflächen ↷ mechanische Eigenschaften des Objekts in räumlicher Verteilung bestimmbar!

Meßgeometrie:

a – Linsenradius

R – Krümmungsradius d. Linse

Brennweite: $$f' = \frac{c_1}{c_1 - c_2} R$$

mit: $c_1 = 11.100$ m/s (Saphir)

$c_2 = 1.480$ m/s (Wasser)

↷ $f' = 1{,}75\,R$

dh. Brennpunkt liegt dicht beim Krümmungsmittelpkt. der Linse!

Brennfleck Ø : $\boxed{2r_0 \approx \frac{f' \cdot \lambda}{2a} \approx \frac{R \cdot \lambda}{2a}}$

≙ Auflösungsvermögen

a – Linsenradius
R – Krümmungsradius der Linse

Das Verhältnis $\frac{a}{R}$ ist ≈ die "Numerische Apertur" ($NA = \sin\varepsilon \approx \frac{a}{R}$) des Abbildungssystems: ⇒ je kleiner ↘ geringeres Auflösungsvermögen

↘ größere Tiefenschärfe (geringere Aberration)

Allg. wird $\frac{a}{R}$ so eingestellt, wie es der erforderl. Mindestabstand zum Objekt zuläßt.

Z-Anpassung für $Z_{saphir} = 44{,}3 \cdot 10^6 \frac{Ns}{m^3}$, $Z_{Wasser} = 1{,}48 \cdot 10^6$ –"– erforderlich:

weil Transmissionsfaktor $T = 0{,}0646$ (Grenzfläche) sehr gering,

damit Energieübertragung $TG = T^2 \frac{Z_{saphir}}{Z_{wasser}} = 0{,}125$ über die Grenzfläche (−9dB)

dh. 2 × Durchgang entspricht 18 dB Durchgangsdämpfung.

deshalb erford. $\frac{\lambda}{4}$ – Anpassg. mit $Z_{amp} = \sqrt{Z_{saphir} \cdot Z_{wasser}}$

≙ Entspiegelung der Linsenoberfläche

(Gläser, auf die Kalottenfläche aufgedampft, bzw. epitaktisch aufgewachsen $c_{Glas} \approx 7000\,m/s$!)

Praktische Ergebnisse

bei 1 GHz, Linsen Ø ≈ 700 µm, in Wasser

↘ Numerische Apertur $\frac{a}{R} \approx 0{,}75$

Laufweg in Wasser ≈ 100 µm ↘ 70 ns Laufzeit (starke Wandlerdämpfung erforderlich!)

err. Auflösungsvermögen 0,25 µm

zur Zeit bei 8 GHz in flüss. Helium (Dämpfg. → 0 | T → 0K) als Koppelflüssigkeit wird Auflösng. von 0,02 µm = 200 Å erreicht! (1Å = 1 Atom Ø)

Anwendung: ex. industrielle Geräte zur Messung der:

- Verteilung der Massendichte
- Elastischen Konstanten, Elastizität, Kompressibilität
- Viskosität
- medizin. Gewebeproben (Zell-Gewebe-Dünnschnitte)

bei 1 – 2 GHz Eindringtiefen von wenigen µm

zB: Aufnahmen Integrierter Schaltkreise / Materialoberflächen

Kuttruff Bilder S. 308-310

Probleme:

- Brechung der konvergenten Welle (aus der Linse)
  ↝ L- und T- Wellen (Fokussierung gestört)
- bei großer Apertur auch stark geneigte Strahlen,
  ↝ Spuranpassung erzeugt Oberflächenwellen ...
  (Interferenzen mit reflekt. W.)

Weiterhin: US- Holografie
US- Tomografie ...

(s. zB.: Kuttruff S. 311 – S. 331)