

Herr
Mennebauer

**KERNFORSCHUNGSZENTRUM
KARLSRUHE**

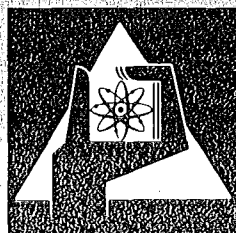
März 1975

KFK 2116

Institut für Reaktorentwicklung
Projekt Schneller Brüter

Ultraschallmeßtechnik in Natrium-Systemen

H.A. Rohrbacher, R. Bartholomay



**GESELLSCHAFT
FÜR
KERNFORSCHUNG M.B.H.**

KARLSRUHE

Als Manuskript vervielfältigt

Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG M. B. H.
KARLSRUHE

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

KFK 2116

Institut für Reaktorentwicklung
Projekt Schneller Brüter

Ultraschallmeßtechnik in Natrium-Systemen

H. A. Rohrbacher
R. Bartholomay

Gesellschaft für Kernforschung mbH, Karlsruhe

Kurzfassung

Für den Einsatz neuartiger Ultraschall-Ortungs-Verfahren in Natrium-Systemen werden Schallsensoren in unterschiedlichen Ausführungsformen untersucht und in einem Wassermodell getestet. Die Vor- und Nachteile von Schallwellenleitern werden diskutiert und den Eigenschaften sogenannter "Direkt-Sensoren" unter Berücksichtigung der hohen Umgebungstemperaturen gegenübergestellt.

Ein neues Hochtemperatur-Piezomaterial und die Technologie der Herstellung eines Direkt-Sensors werden vorgestellt. Die Ergebnisse verschiedener Kontaktierungs-Methoden der Piezokristalle mit den Edelstahl-Membranen werden erläutert und anhand von Oszillogrammen verdeutlicht. Schließlich werden für einen Ultraschall-Tastarm Abschätzungen hinsichtlich der Fehlergrößen der georteten Objekte und der Schallfeldverzerrungen in Ortungs-Bereichen mit temperaturverschichtetem Natrium gemacht.

ULTRASONIC MEASUREMENT TECHNIQUE IN SYSTEMS UNDER SODIUM

Summary

Different versions of acoustic sensors are being investigated and tested in a water model with a view to novel ultrasonic detection methods to be applied in systems under sodium. The advantages and drawbacks of acoustic waveguides are discussed and compared with the properties of so-called direct sensors, taking into account the high temperatures in the environment.

A new high-temperature piezoelectric material as well as the technology of direct sensor manufacturing are presented. The results of various methods of piezoelectric crystal bonding with the stainless steel diaphragms are described and explained by means of oscillograms. Finally, estimates are given for an ultrasonic sweep arm with respect to the extent of errors of the detected objects and the sonic beam distortions in detection areas with sodium layers of different temperatures.

Inhaltsverzeichnis

	<u>Seite</u>
1. Aufgabenstellung	1
2. Ultraschall-Verfahren	1
3. Apparatur	2
4. Wandlermaterial	
4.1 Barium-Titanat-Zirkonat-Schwinger	3
4.2 Reiner Quarz	4
4.3 Lithium-Nobat	4
5. Einsatzmöglichkeiten von Koppelstäben	6
6. Direkt-Sensoren	26
6.1 Eigenschaften	26
6.2 Klebe-Kontaktierung	32
6.3 Druck-Kontaktierung	33
6.4 Lötverfahren zur Kontaktierung	34
7. Ortungsverfahren	39
7.1 Testeinrichtung	43
7.2 Experimente	46
7.3 Bestimmung der Halbwertsbreite des Schallfeldes	47
8. Übergang an Grenzflächen	63
9. Schlußfolgerungen	68
10. Anhang	70
10.1 Echogramme mit Koppelstäben	70
10.2 Versuchseinrichtung	81
Literatur	83

1. Aufgabenstellung

Das Auffinden und Abtasten mechanischer Komponenten unter Natrium mit Hilfe herkömmlicher Methoden wirft eine Fülle meßtechnischer und konstruktiver Probleme auf.

Für das Anfahren und bisher nach dem mechanischen oder induktiven Dreieckverfahren arbeitende Positionieren der Brennelemente in einem natriumgekühlten Reaktor bietet die Ultraschall-Meßtechnik erfolgversprechende Voraussetzungen. Das Verfahren arbeitet strahlungs- und zerstörungsfrei und liefert bei guter örtlicher Auflösung die für die Aufgabenstellung gewünschte Genauigkeit.

Ausreichende Ergebnisse werden auch erwartet, wenn der Ortungsbereich mehrere Meter mißt.

Aussichtsreich erscheint daher der Einsatz eines Ultraschall-Tastarms, der die bisher vorgesehenen mechanischen Tastarme zur Freitastung des Natriumraumes unter der Instrumentierungsplatte nach dem Ein- und Ausbau von Core-Einbauten ersetzt und zusätzlich hierzu eine Lagekoordinatenbestimmung restverbliebener Komponenten über der vorgeschriebenen Sollhöhe erlaubt.

Die aufgezeigten Ultraschall (US)-Meßverfahren wurden in einem Wassermodell bei annähernd gleichen Geometrien untersucht.

2. Ultraschall-Verfahren

Für die Ortung ruhender oder sich bewegender Störungen im Flüssigmetall wurde das Impuls-Echo-Verfahren gewählt. Hierbei wird von einem Schallgeber eine Folge von Einzelimpulsen in den Ortungsbereich emittiert. Treffen die Impulse auf ein Hindernis, so wird ein Teil der Impulsenergie reflektiert und

von einem Empfänger-Sensor - in der Regel ist dies der Schallgeber selbst - wieder aufgenommen.

Bei bekannter Größe der Schallausbreitungsgeschwindigkeit c im Medium liefert die Größe der Impulslaufzeit ein Maß für die Entfernung des georteten Objekts. Unter Berücksichtigung des schmalen Schallfeld-Öffnungswinkels, der bei diesem Verfahren erreicht wird, ist eine vollständige Polarkoordinatenbestimmung der Störstelle im Flüssigmetall möglich. Die aus der Laufzeit gewonnene Wegstrecke \bar{x} und der Winkel α , unter dem das Objekt bei optimaler Impuls-Reflexion getroffen wird, stellen die Meßgrößen dar. Sie sind Abhängige des Schallausbreitungskoeffizienten c und des mit ihm verknüpften akustischen Brechungsindex n .

3. Apparatur

Impulsgeber und Echoimpuls-Empfänger bilden apparativ eine Einheit. Für die Versuche wurde ein Gerät benutzt, das speziell für die zerstörungsfreie US-Materialprüfung angeboten wird. Die zur Schallimpulserzeugung erforderlichen Schallköpfe enthalten Bariumtitanat-Wandler auf keramischer Basis, deren Curie-Temperatur bei 340 °C liegt. Aus Gründen der raschen Depolarisation mit zunehmender Temperatur und der damit verbundenen Abnahme des piezoelektrischen Verhaltens ist ein Direkteinsatz dieser Köpfe im Natrium nicht möglich. Die serienmäßig erhältlichen Transducer können nur bis etwa 150 °C eingesetzt werden. Bei einer geeigneten Halterungs- und Anschlußtechnik sowie unter Verwendung wärmeleitender und reflexionsfreier

thermoplastischer Dämpfungsmassen auf der Rückfläche der Piezoscheiben sind Blei-Zirkonat-Titanat-5A-Sensoren für einen Dauerbetrieb bis 200 ° C ohne Kühlung geeignet. Es ist daher für den Reaktoreinsatz notwendig, Wandler-systeme zu suchen, die folgende Voraussetzungen erfüllen:

- hoher Wirkungsgrad im MHz-Bereich
- Temperaturverträglichkeit bis zu 450 ° C (600 ° C)
- Strahlenbeständigkeit des Piezomaterials
- kleiner Schallöffnungswinkel ohne seitliche "patterns".

4. Wandlermaterial

4.1 Barium-Titanat-Zirkonat-Schwinger

Hierbei handelt es sich um ein polykristallines Material, dessen Eigenschaften von der Zusammensetzung und Dotierung der Metalle abhängt. Das Material verschiedener Hersteller wurde bei Ortungsversuchen im Simulations-Medium Wasser getestet. Hierbei konnten handelsübliche Scheiben sowohl in Verbindung mit unterschiedlich ausgeführten Koppelstangen als auch direkt, d. h. nur durch eine dünne Membran von der Wasseratmosphäre geschützt, mit großem Erfolg betrieben werden. Insbesondere zeigen die nach einem im Institut für Reaktorentwicklung entwickelten speziellen Druck-Klebe-Verfahren kontaktierten Wandler einen hohen Grad akustischer Kopplung, während eine Reihe vorangegangener Lötversuche zu unterschiedlichen und nicht immer reproduzierbaren Ergebnissen führte. Häufige Fehlerursache waren Unreinheiten der Wandleroberflächen sowie Oxydation des Lotes. Schließlich sind die Aufheiz- und Abklingzeiten für den Lötvorgang je nach verwendetem Lot unterschiedlich.

Barium-Titanat-Material der Reihe PXE4 und 5 in Form runder Scheiben weist eine nahezu gleichmäßige planare akustische Kopplung auf; lediglich die Randzonen zeigen einen deutlichen Abfall des Kopplungskoeffizienten.

4.2 Reiner Quarz

Reiner piezoelektrischer Quarz (SiO_2) besitzt einen um drei Größenordnungen niedrigeren Kopplungsbeiwert als PZT oder PXE. Dennoch ist Quarz wegen seiner bei 572°C liegenden Curie-Temperatur für einige Anwendungen zu empfehlen. Die akustische Kopplung nimmt mit steigender Temperatur stetig ab. Bei 420°C verbleiben nur noch 10 % des Anfangswerts. Insgesamt wurden 24 Quarztransducer mit Koppelstangen unterschiedlicher Abmessungen und Eigenresonanzen hergestellt und getestet. (Ergebnisse siehe Abschn. 5). Hierbei wurden runde Quarzscheiben im x-Schnitt mit Eigenresonanzen von 0,1 bis 5 MHz verwendet. Optimale Ergebnisse wurden bei guter Schallfeldbündelung und bei Ortungsweglängen bis zu 2 m unter Wasser im Bereich 4 MHz erzielt.

4.3 Lithium-Niobat

Monokristallines Lithium-Niobat (LiNbO_3) ist als piezoelektrisches Wandlermaterial erst seit wenigen Jahren bekannt. LiNbO_3 wird nach dem sog. "Czochralski"-Verfahren in Einkristallen, auch "boules" genannt, gezogen; es wird bei Temperaturen um 1100°C mehrstündig gegläht, wobei partielle Reduktionen durch einen geringen Li_2O -Überschuß vermieden werden. Mit Hilfe eines elektrischen Feldes (1V/cm) erfolgt dann die Polung

in der Umwandlung von Multidomänenkristallen in Einkristalle bei 1200 °C und bei einstündiger Einwirkung.

Die gezogenen boules werden anschließend in Plättchen geschnitten, wobei für akustische Anwendungen vorzugsweise folgende Schnittrichtungen gewählt werden:

- z-Schnitt : (= c - cut): longitudinale Wellen-Empfindlichkeit bei einem nahezu linearen, relativen Ausdehnungs-Koeffizienten $\Delta l/l = F(T)$.
- x-y-Schnitt unter 45° : longitudinale Wellen-Empfindlichkeit bei hoher Empfindlichkeit, nichtlinearer $\Delta l/l$ -Verlauf, schwierig bei Lötverfahren.
- 360 rotated y-Schnitt : Optimale longitudinale Wellen-Empfindlichkeit ohne Scherwellen-Anteil, nicht linear $\Delta l/l$ -Verlauf, hohe Empfindlichkeit.

Andere Schnitte, welche zur Erzeugung von radial gerichteten Wellen oder Scher-Wellen dienen, sind ebenfalls bekannt, jedoch für die vorliegende Aufgabenstellung ungeeignet (mehr siehe Abschnitt 6).

Die Curie-Temperatur liegt - je nach Wahl des Ziehverfahrens - zwischen 1160 und 1210 °C, sie ist jedoch von untergeordneter Bedeutung, da eine wesentliche Einschränkung der oberen Betriebstemperatur durch die temperaturabhängige Sauerstoff-Reduktion bewirkt wird. Der Ladungs-

verlust ist eine Folge des von der Temperatur abhängigen Isolationswiderstandes des Kristalls. In der Regel findet eine Sauerstoff-Getterung durch das Edelstahlträgermaterial (Membrane) beim ersten Temperatur-Zyklus statt. Nachfolgende T-Zyklen bewirken zusätzliche, jedoch geringe, Getterungen. Dabei diffundieren Sauerstoff-Ionen vom LiNbO_3 in das Metall, reines Nb und Li_2O werden partiell frei und tragen zur elektrischen Leitfähigkeit bei. Unter diesen Bedingungen ist LiNbO_3 nur bis zu 600°C als Piezowandlerelement verwendbar. Es besitzt bei dieser Temperatur einen Isolationswiderstand von einigen Kiloohm und verhält sich wie ein Halbleiter (nichtlinearer Quellwiderstand, Rauschen, niederohmige Anpassung). Eine Verbesserung kann durch Zusetzen von reinem Sauerstoff erfolgen. Während der ersten Temperaturzyklen wird ein geringer O_2 -Partialdruck im Innern des Sensors gehalten. In vielen Fällen genügt es auch über eine Kapillare Normalatmosphäre (Luft) während des Restzyklierens einzustellen.

Unter O_2 -Partialdruck-Bedingungen (einige Torr O_2) kann die Dauer-Betriebstemperatur eines Lithium-Niobatsensors auf annähernd 700°C erhöht werden (Japanische Berichte geben 750°C an; Messungen bei der UKAEA nennen 680°C).

5. Einsatzmöglichkeit von Koppelstäben

Über die Ergebnisse des Blasennachweises und über Messungen zur Übertragungsdämpfung einer mit Koppelstäben arbeitenden Natriumstrecke in Abhängigkeit von Temperaturen und Frequenz wurde bereits berichtet /3/.

Koppelstäbe aus Edelstahl (z.B. W.St Nr. 4571) bilden eine sinnvolle Trennung zwischen dem Wandler und des zumeist mit flüssigem Natrium gefüllten Ortungsraumes. Sie erlauben den Betrieb der Wandler bei niedrigeren Temperaturen und außerhalb des Strahlungsbereiches. Während beim sog. "Durchschallungs-Verfahren" nicht gepulster Ultraschall mit Hilfe einer Sender- und einer zugehörigen Empfängerschallstange übertragen wird, müssen beim Impulsbetrieb (Impuls-Echo-Prinzip) einige Einschränkungen gemacht werden.

Für den Reaktoreinsatz wird vorausgesetzt, daß sowohl der Ultraschallsender als auch der Empfänger eine Einheit bilden. Aus geometrischen Gründen ist nur eine einzige Koppelstange wünschenswert. Da das Meßprinzip seine Aussage über die reflektierten Impulse liefert, führen Störechos oder Multi-Reflexionen zu teilweise beachtlichen Meßfehlern. In festen Stoffen - hierzu zählt die Koppelstange - treten gleichzeitig longitudinale und transversale Schall-Wellen auf. Die Ausbreitungsgeschwindigkeiten dieser Wellentypen in Stahl sind verschieden groß und verhalten sich mit guter Näherung wie $c_l : c_t = \sqrt{3} : 1$.

($c_l = 5905$ m/s und $c_t = 3243$ m/s, WSt, Nr.4571, $T=25^{\circ}\text{C}$)

Bei der Betrachtung der möglichen Fehlerquellen kommt der an Grenzflächen stattfindenden Umwandlung von Longitudinalwellen in Transversalwellen ("Mod-Umwandlung") große Bedeutung zu. So entstehen beispielsweise beide Wellentypen, die unter verschiedenen großen Winkeln an einer Grenzfläche reflektiert werden, wenn nur eine der beiden Wellenfronten schräg auf eine Grenzfläche

auftrifft. In einem nicht unendlich ausgedehnten Festkörper, vornehmlich in Metallstäben mit Längen: Durchmesser-Verhältnissen von größer 2, lassen sich Reflexionen an der die Grenzfläche bildenden Oberfläche nicht vermeiden, da das Schallfeld nicht beliebig gebündelt oder ausreichend parallel verlaufend abgestrahlt wird. In Bild 1a werden die Verhältnisse verdeutlicht. Hierbei wird angenommen, daß ein longitudinaler Wellentyp mit der Ausbreitungsgeschwindigkeit c_1 unter dem Winkel α auf eine Grenzfläche auftrifft. Dabei ist das dichtere Medium der Wellenleiter selbst.

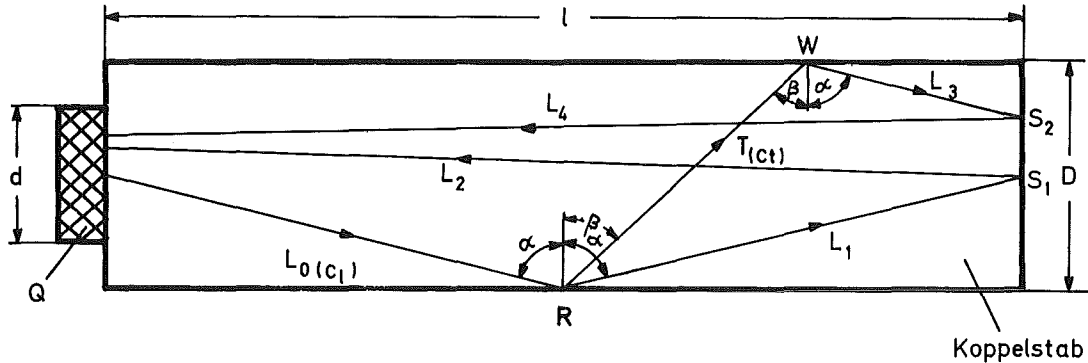


Bild 1a: Schematische Darstellung des Wellenverlaufs in einem Koppelstab. L = Longitudinal-Welle, T = Transversalwelle. R, S und W = Reflexionsstelle, Q = Ultraschallwandler

Beim Auftreffen der vom Schallwandler emittierten Longitudinalwelle L_0 auf die Reflexionsstelle R bildet sich zusätzlich zur ebenfalls unter dem Winkel α reflektierten longitudinalen Welle L_1 eine Transversalwelle T, die unter dem Reflexionswinkel β und mit der Ausbreitungsgeschwindigkeit c_t den Stab durchläuft. An der gegenüberliegenden Wand W bricht sie sich erneut, wobei außer der reflektierten (nicht gezeichneten) Transversalwelle eine weitere Longitudinalwelle L_3 entsteht, die auf die Transducer-Oberfläche bei S_1 auftrifft. Sowohl L_1 als auch L_3 werden teilweise am Koppelstabboden S_1 bzw. S_2 reflektiert und werden vom piezoelektrischen Wandler Q als Echos aufgenommen.

Betrachtet man die Laufzeiten der beiden Echos, so fällt auf, daß das Schallecho $\overline{L_0 T L_3 L_4}$ mit der zweimaligen Mod-Umwandlung gegenüber der reinen longitudinalen Echowelle $\overline{L_0 L_1 L_2}$ eine größere Wegstrecke zurückgelegt hat. Außerdem liegt die Laufzeit des Transversalwellen-Anteils deutlich über derjenigen einer Longitudinalwelle. Bezeichnet man mit l die Gesamtlänge des Koppelstabes, so erhält man für die Laufzeit der Longitudinalwelle für einen Hin- und Rücklauf im Stab t_1 :

$$t_1 = \frac{2 \cdot l}{c_1}$$

Weiterhin ergibt sich für ein Zeitintervall zwischen dem Rückwandecho und dem zeitlich nachfolgenden Nebenecho aus den schallgeometrischen Verhältnissen aus Bild 1a

$$t_2 = \frac{D}{c_t \cos \beta} - \frac{D \cdot \operatorname{tg} \cdot \beta}{c_1}$$

Schließlich ergibt sich aus dem Brechungsgesetz:

$$\frac{\sin \alpha \text{ (long)}}{\sin \beta \text{ (trans)}} = \frac{c_l}{c_t}$$

und mit der Annäherung $\alpha \approx 90^\circ$ für den sehr flach in die Grenzfläche einfallenden longitudinalen Wellenzug. Mit dieser Vereinfachung erhält man

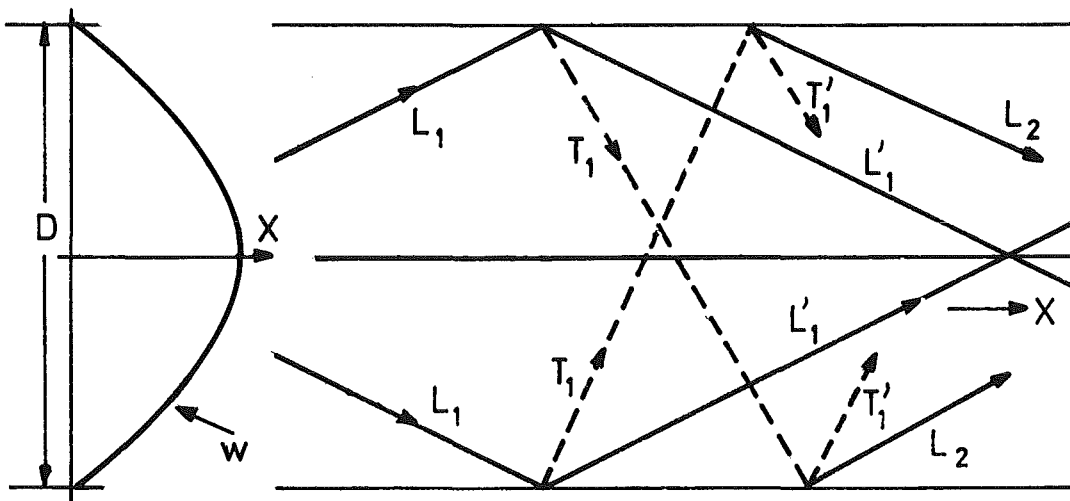


Bild 1b: Schematische Darstellung der aus einer longitudinalen Wellenfront W an Grenzflächen erzeugten Transversalwellen T_1 und T_1' in einem Koppelstab. Beim Auftreffen an die Grenzflächen werden jeweils neue Wellenmods erzeugt: Aus Transversalwellen entstehen Longitudinalwellen und umgekehrt. Außerdem interferieren die nicht gleichphasigen Longitudinal- bzw. Transversalwellen, z.B. L_1' mit L_2 oder T_1 mit T_1' etc.

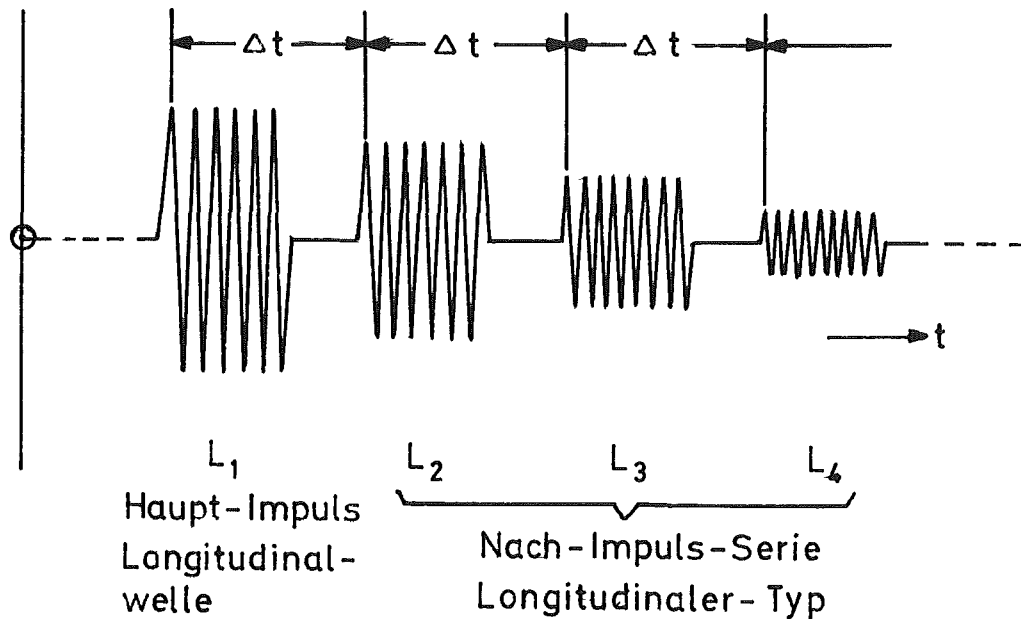
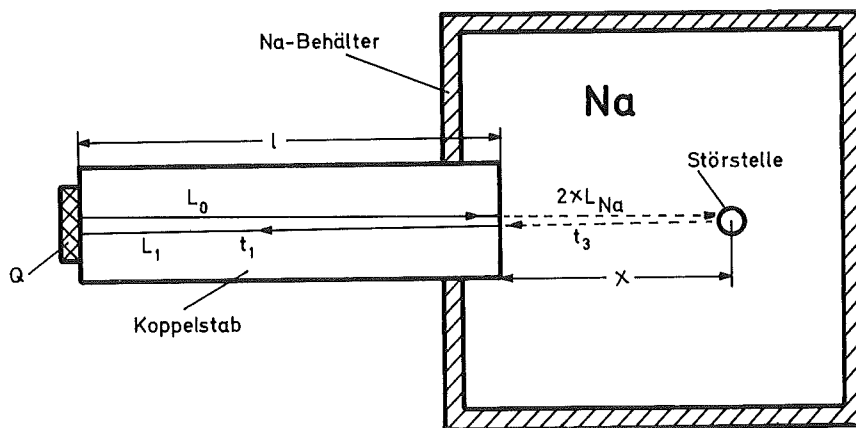


Bild 1c: Die durch Modumwandlung im Koppelstab erzeugten Nacheil-Echos weisen eine äquidistante Verzögerungszeit auf. Für einen 40 mm \varnothing - Koppelstab aus Edelstahl WSt. 4571 beträgt das Zeitintervall zwischen zwei Impulszügen $\Delta t = t_2 = 10,36 \mu\text{sec}$. Die Nacheilzeit ist nur vom Durchmesser des Koppelstabes und von der materialgebundenen Ausbreitungsgeschwindigkeit c abhängig (vergl. auch die Oszillogramme in Bild 7 bis 14).

mit den eingesetzten Zahlenwerten für die longitudinalen und transversalen Schallausbreitungs-Geschwindigkeiten $c_l = 5900 \text{ m/s}$ bzw. $c_t = 3230 \text{ m/s}$ in Stahl:

$\sin \alpha = \sin 90^\circ = 1$ und damit: $\sin \beta = \frac{3230}{5900} = 0,55$
 oder $\beta = 33,3^\circ$. Für einen Koppelstab mit $D = 40$ mm
 ergeben sich für $t_2 = 10,36 \mu\text{sec}$ Nacheilzeit für
 das Neben- bzw. Nachecho. Wegen der guten Schall-
 leitung in einem Edelstahl-Stab werden die Neben-
 echos beim einmaligen Hin- und Rücklauf nur wenig
 gedämpft, so daß durch Vielfachreflexionen Neben-
 echos mit sehr hohen Ordnungszahlen registriert wer-
 den. Dabei ist es - je nach Länge des Stabes - mög-
 lich, daß die Gesamtintervallzeit $n \cdot t_2$ der noch
 beobachteten Nachechos in die Größenordnung von
 $t_1 + t_3$ fällt, wobei t_3 die zusätzliche gesamte
 Laufzeit des aus dem Natriumraum zurückkehrenden
 Fehlerstellen-Echos bedeutet. In derartigen Fällen
 ist eine Auswertung wegen der auftretenden Interfre-
 quenzen nur noch schwer möglich. In Bild 2 ist dar-
 gestellt, welche Schallwege und Laufzeiten in einem
 Ultraschall-System in Natrium unter Verwendung eines
 Koppelstabes zu berücksichtigen sind.



$$t_1 = \frac{2l}{c_1(\text{stahl})}$$

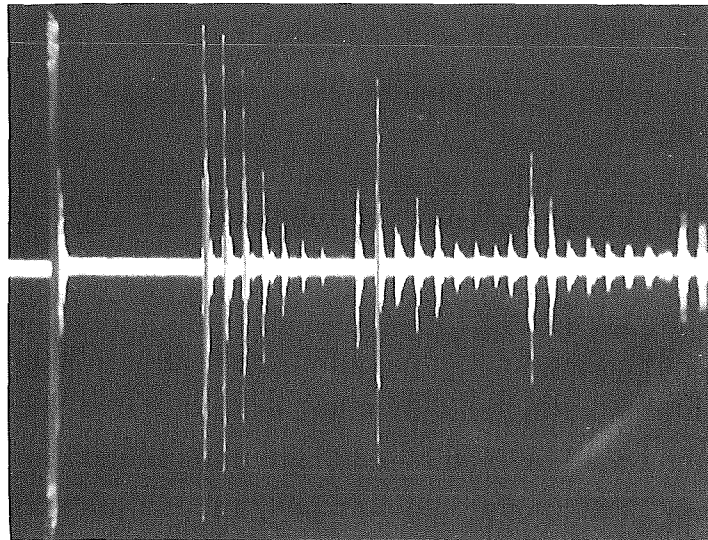
$$t_3 = \frac{2x}{c_1(\text{Na})}$$

Bild 2: Schematische Darstellung
 einer Störstellen-Ortung
 in Natrium unter Verwen-
 dung eines Koppelstabes.

Konkret bedeutet dies, daß bei Schallwegen im Natrium von einigen Metern und wegen des deutlich niedrigeren Ausbreitungskoeffizienten von $c_1(\text{Na}) = 2450 \text{ m/s}$ ein rasches Abklingen der vielfachen Nebenechos im Koppelstab bewirkt werden muß, ehe das Signalecho mit der Gesamtlaufzeit $t_s = t_1 + t_3$ vom Wandler aufgenommen wird.

Bild 3 zeigt eine Folge von Vielfachechos, die nach Mod-Umwandlungen einer Longitudinalwelle in einem Koppelstab ($l = 240 \text{ mm}$, $D = 40 \text{ mm}$) entstanden sind. Hierbei handelt es sich um reine Reflexionen, also

Bild 3:



Eigenechos des Koppelstabes. Da kein Echo aus einem angekoppelten zweiten Medium vorhanden ist, wird $t_3 = 0$. Das Echo 1. Ordnung der nicht Mod-umgewandelten Longitudinalwellen L_0 vom Stabende zurück zum

Wandler, sowie deren Vielfache ($= n \cdot t_1$) kommen in Bild 4 als äquidistante Intervalle der Hauptimpulse zum Ausdruck:

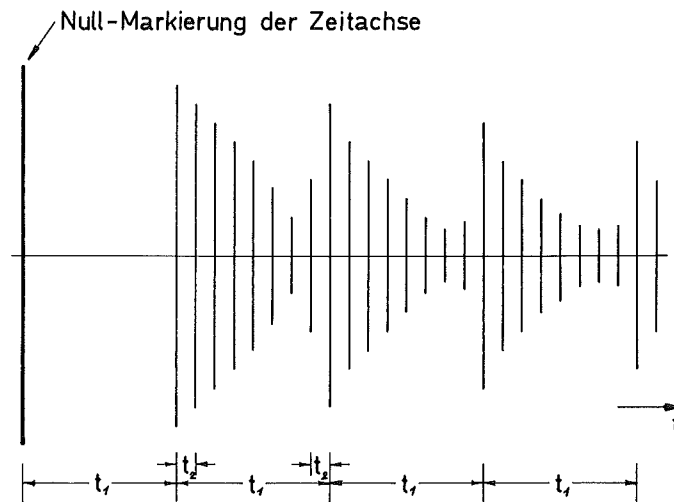


Bild 4: Hauptecho- und Nebenechofolge der Nacheil-echos in einem Koppelstab.

Mit dem Zeitabstand t_2 folgen nach jedem Hauptecho bzw. nach dessen Vielfachen die Nebenechos und deren Vielfache. Alle im Bild 4 als Linien dargestellten Echos bestehen aus gedämpften Schwingungen mit der Resonanzfrequenz des Ultraschallwandlers Q (Bild 5). Es wurden eine große Anzahl von Koppelstangen unterschiedlicher Abmessungen mit Piezowandlern im Bereich 0,1 bis 10 MHz versehen und erprobt. Da t_2 nicht frequenzabhängig ist, konnten die Nebenechos erwartungsgemäß durch Ändern der Resonanzlage der Wandler nicht beeinflusst werden. Ein - jedoch kaum ins Gewicht fallendes - rascheres Abklingen der Nebenecho-Amplituden konnte mit steigender Fre-

quenz des Wandlers beobachtet werden, da die Schalldämpfung mit f^2 zunimmt. Die Dämpfung wirkt jedoch integral, d.h. auch die Intensität des Hauptechos wird entsprechend herabgesetzt.

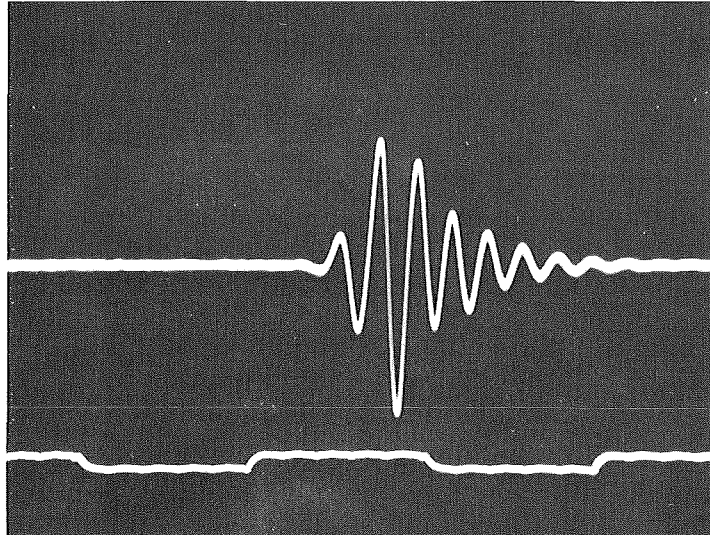


Bild 5: Einzelimpuls aus Bild 3 bei stark gedehnter Darstellung. Die Resonanzfrequenz beträgt 0,5 MHz. Ein mitgeschriebener Quarz-Referenz-Zeitmaßstab mit 20 μ sec Periodendauer erlaubt die genaue Zeit- bzw. Frequenzermittlung des Oszillogramms.

Um den Einfluß der Nebenechos auszuschalten, wurden die Koppelstäbe modifiziert. Da die störenden Mod-Umwandlungen an den reflektierenden glatten Außenwänden der Stäbe entstehen, bot sich eine gewellte oder abgestufte Stabform an. Als eine weitere Möglichkeit unerwünschte Transversalwellen zu unterdrücken wurde von der Totalreflexion

der unter einem größeren Winkel gebrochenen transversalen Welle Gebrauch gemacht. Für den Übergang von Stahl in Wasser erhält man mit $c(\text{long. Wasser}) = 1481 \text{ m/s}$ und $c(\text{trans. Stahl}) = 3230 \text{ m/s}$ für den Totalreflexionswinkel α^* :

$$\sin \alpha^* = \frac{c(\text{long. Wasser})}{c(\text{trans. Stahl})} = 0,458 \text{ oder}$$

$$\alpha^* = 27,3^\circ \text{ †}$$

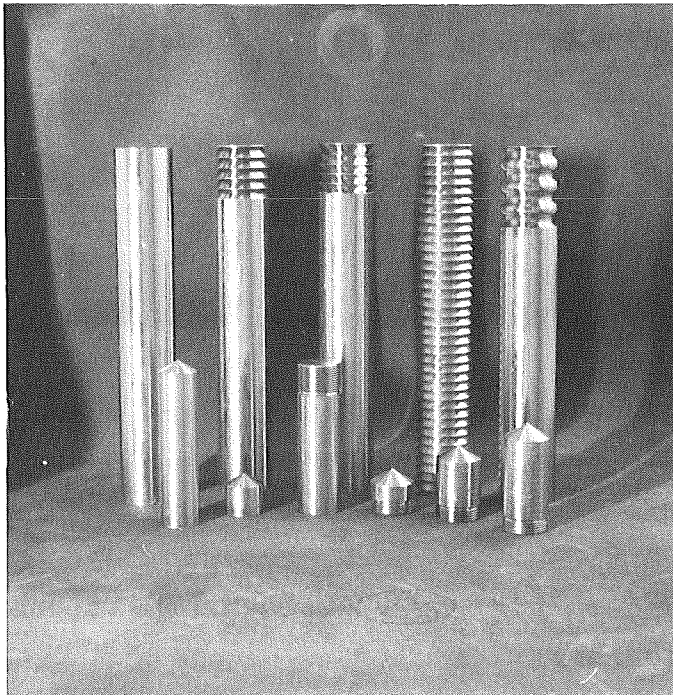


Bild 6: Im Vergleich zu einem glatten zylindrischen Koppelstab (ganz links) treten in teilweise oder ganz oberflächenbearbeiteten Stäben Nebenechos mit geringeren Ordnungszahlen und Intensitäten auf. Die kurzen Stäbe mit dem Kegelansatz dienen zu Testzwecken bei der Ermittlung des optimalen Streuwinkels der Transversalwellen bei Versuchen in verschiedenen Flüssigkeiten.

Die sägezahnförmigen Einstiche an der Oberfläche der Koppelstäbe lieferten eine Unterdrückung der Nebenechos bis 10 % ihrer Intensität. Um sicher zu gehen, daß auch alle möglichen Einfallswinkel aus dem nur endlich gebündelten longitudinalen Schallfeld (L_0) an der Oberfläche des Stabes eine Totalreflexion der Transversalwellen berücksichtigt werden, wurde der Einstichwinkel λ des Oberflächensägezahns größer als α^* gewählt. Die nachstehenden Bilder zeigen in einer Gegenüberstellung die Dämpfung der Nebenechos bei $\lambda = 55^\circ$ \ddagger .

Bild 7 zeigt ein Multiecho-Oszillogramm, das unter Verwendung eines allseits glatten Koppelstabes ($l = 240$ mm, $D = 40$ mm) und mit einem 4 MHz-Quarzwandler entstand. Der Vertikalmaßstab ist logarithmisch, die X-Achse ist zeitlinear geteilt.

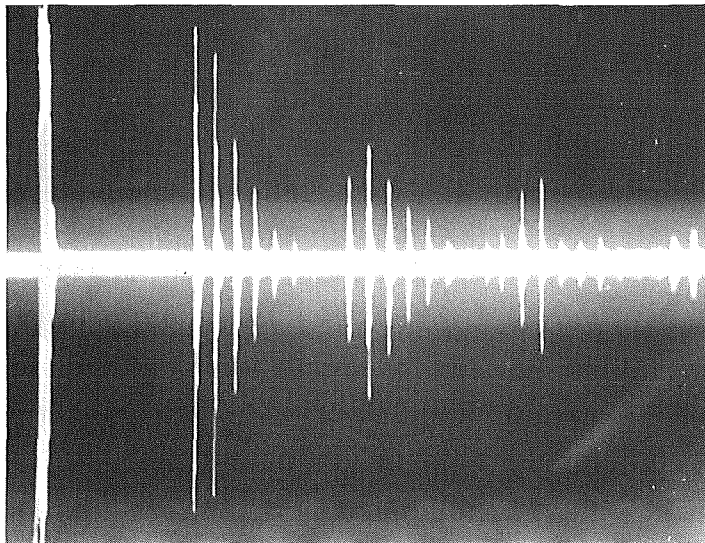


Bild 7: Vielfach-Echo in einem glattwandigen Koppelstab 240x40 \varnothing mm aus Edelstahl. Die t_2 -Werte liegen bei 10,36 μ sec entsprechend 40 mm Durchmesser des Transducers. Die Hauptechos 2. und 3. Ordnung erscheinen nicht in der vollen Höhe. Durch Interferenzen der longitudinalen Wellen mit unterschiedlichen Brechungs-Ordnungszahlen erscheint das Hauptecho 3. Ordnung fast nicht mehr.

Die Verhältnisse der Vielfachstörechos werden in Bild 8 deutlich. Die Oberfläche des Koppelstabes wurde über die gesamte Länge des Stabes sägezahnartig verrippt. Die Einstiche erfolgten unter einem Winkel $\lambda = 55^\circ$ etwa 8 mm tief. Der Wandler befindet sich auf dem Stabende mit dem größeren Durchmesser, so daß sich L_0 in Richtung "fallender" Verrippungen ausbreitet (Bild 8a).

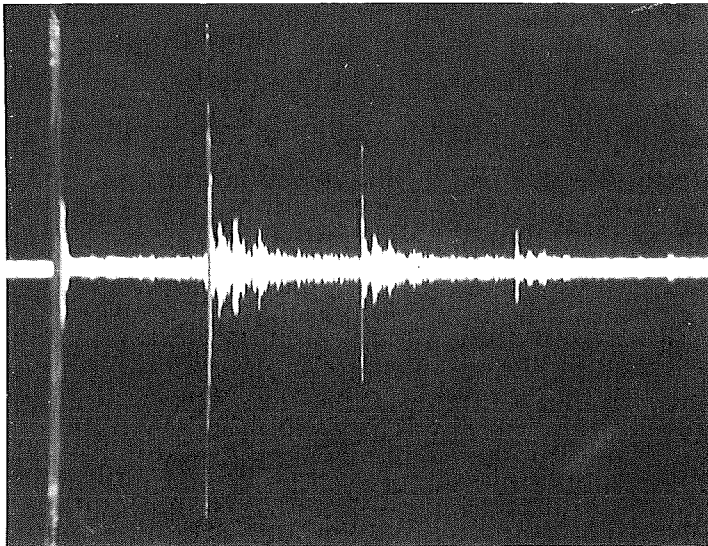


Bild 8: Koppelstab 240 x 40 \emptyset mm mit einer Verrippung über die ganze Länge. Die Hauptechos werden in voller Höhe gemessen, doch erscheinen die Nebenechos in einem Verhältnis 1 : 100 gedämpft. Da kaum sekundäre Longitudinalwellen aus Transversalwellen gebildet werden, liegen auch keine nennenswerten Interferenzen vor, so daß die Hauptechos höherer Ordnung im Gegensatz zu Bild 7 mit ihrer vollen Amplitude erscheinen.

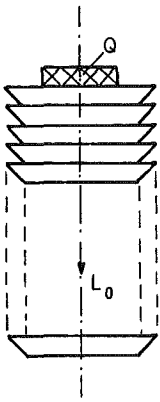


Bild 8a:

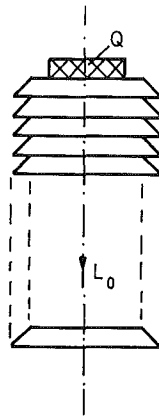


Bild 8b:

Optimale Ergebnisse werden dann erzielt, wenn ein gerippter Koppelstab in Richtung "steigender" Verrippung (Bild 8b) betrieben wird. Das im Bild 9 gezeigte Oszillogramm enthält Nebenechos, deren Amplituden auf wenige Prozent abgefallen sind. Es sind deutlich die Hauptechos des Stabes (t_1) in äquivalenter Lauf-Zeitfolge zu erkennen.

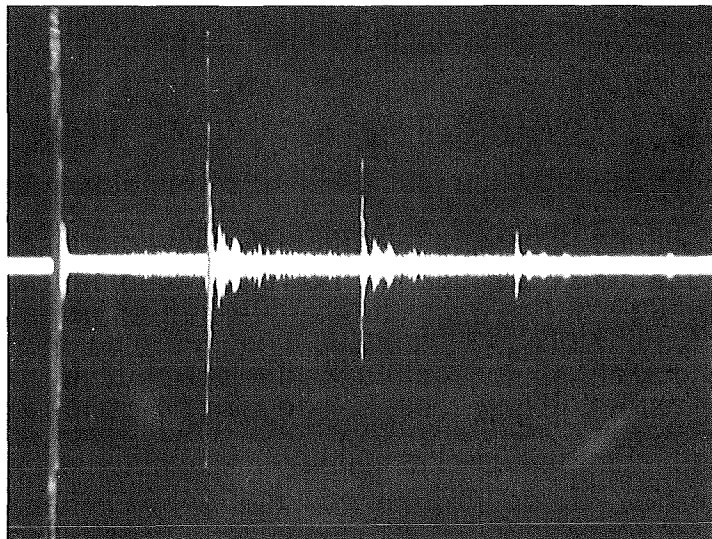


Bild 9: Koppelstab 240 x 40 \varnothing mm mit einer über die ganze Länge reichenden Verrippung. Die "steigende Verrippung" in Richtung des Schallfeldes bewirkt ein Minimum an Nebenechos.

Versuche mit nur teilweiser Verrippung der Oberfläche zeigten keine befriedigenden Ergebnisse. So wurden Koppelstäbe mit gleichen Abmessungen auf 15 % ihrer Anfangslänge mit Schrägeinstichen (Bild 6, 2. u. 3. Stab v.l.) versehen. Die unter den gleichen Bedingungen aufgenommenen Oszillogramme (Bild 10 bis 13) zeigen einen hohen Anteil an Nebenimpulsen.

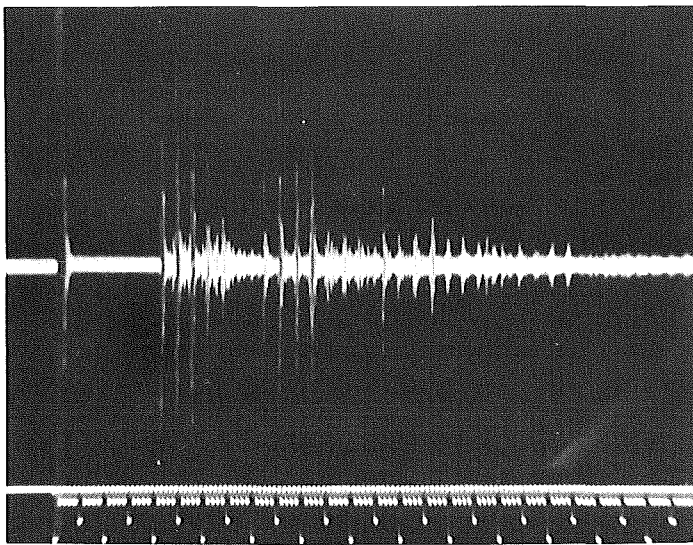


Bild 10: Wandler- und Koppelstabanordnung nach Bild 10a: Koppelstab 240 x 40 Ø mm mit nur 15 % verrippeter Länge. Viele Nebenechos und Interferenzen lassen die Hauptechos höherer Ordnung teilweise ganz verschwinden.

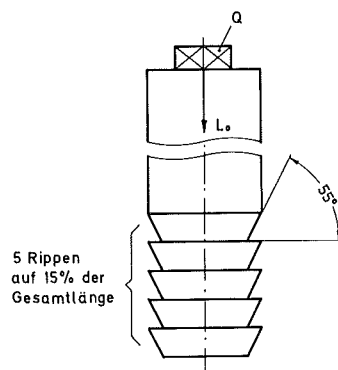


Bild 10a:

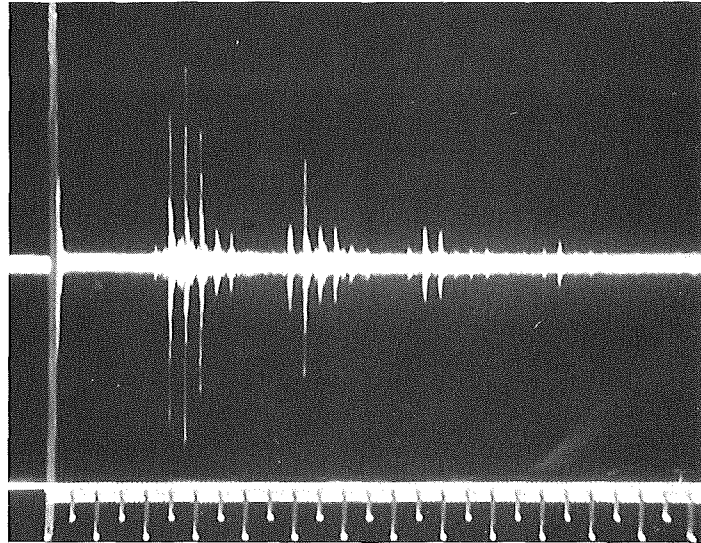
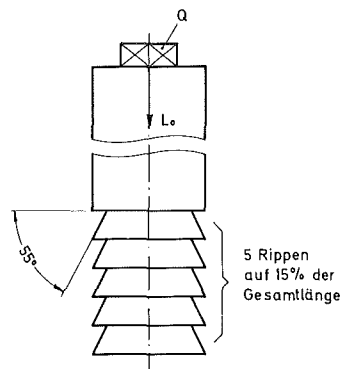


Bild 11: Wandler- und Koppelstabanordnung nach Bild 11a: Koppelstab 240 x 40 Ø mm mit 15 % verrippter Länge am wandlerfernen Ende. Der Anteil der Nebenechos ist im Gegensatz zum Beispiel in Bild 10 deutlich geringer. Dies läßt darauf schließen, daß die Transversalwellen hauptsächlich am Ende der Koppelstange aus Longitudinalwellen gebildet werden und in diesem Bereich nach erfolgter Rückumformung in sekundäre Longitudinalwellen Interferenzen bewirken. Wesentlich ist hier die "steigende" Rippenform, die eine Totalreflexion der Sekundär-Longitudinalwellen an den Rippen-Wänden zur Folge hat.

Bild 11a:



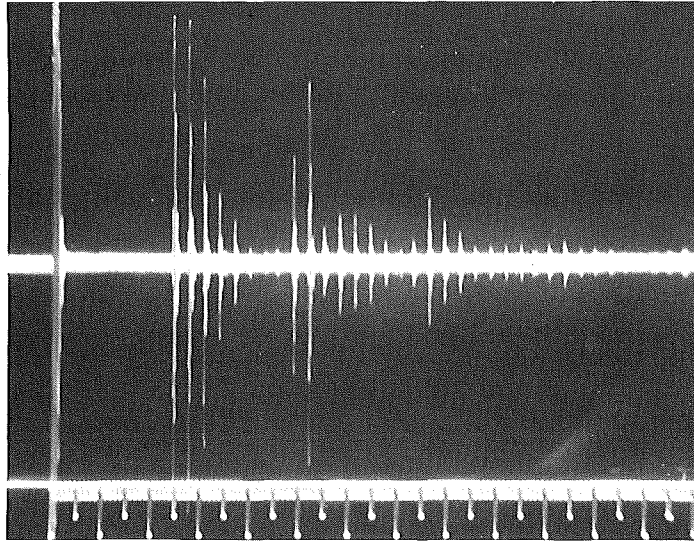
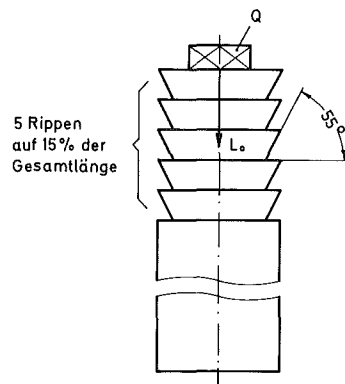


Bild 12: Wandler- und Koppelstabanordnung nach Bild 12a: Koppelstange 240 x 40 Ø mm mit 15 % verrippter Länge am wandlernahen Ende und in "fallender" Richtung. Es treten viele Nebenechos auf, die keine Totalreflexionen an den "fallenden" Rippen erfahren.

Bild 12a:



Welch hohe Ordnungszahlen an Nebenechoimpulsen bei langen und nur teilweise gerippten Oberflächen eines Koppelstabes auftreten können, zeigt Bild 14. Ein 2 m langer Koppelstab mit einer einseitigen Verrippung auf 40 cm seiner Länge (39 Rippen) wurde in einer Anordnung nach Bild 11a auf Haupt- und Nebenechos untersucht.

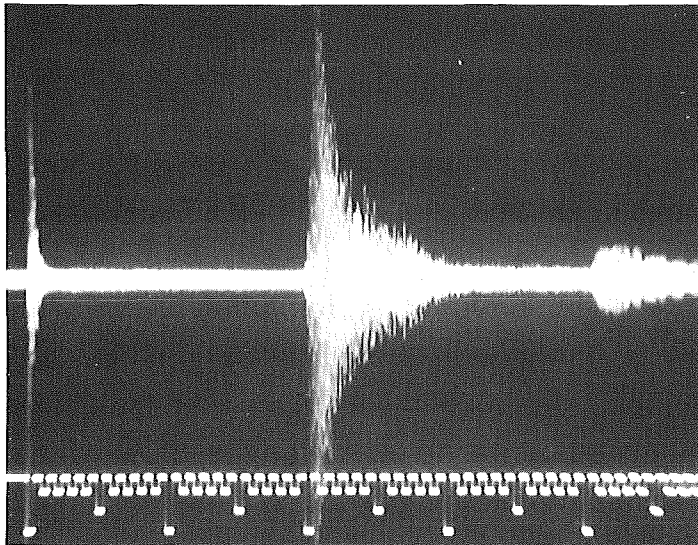


Bild 14: Vielfach-Nebenecho-Oszillogramm eines Koppelstabes 2000 x 20 Ø mm mit einer teilweisen Verrippung auf 400 mm Länge = 39 Rippen. Durch Interferenz-Einfluß erscheint das Hauptecho 2. Ordnung am rechten Bildrand in hohem Maße gedämpft; die unmittelbar in einer dichten Folge zeitlich anschließenden Nebenechos besitzen größere Amplituden als das 2. Hauptecho der longitudinalen Schallwelle vom wandlerfernen Stabende. Zeitmaßstab: Große Teilung = 1000 mm. Amplitudendarstellung = logarithmisch.

Die Nebenechos treten hier in einer zu t_1 relativ kleinen Intervallzeit t_2 auf, da der Stab einen hohen Schlankheitsgrad aufweist ($L = 2000$ mm, $D = 20$ mm). Der mitgeschriebene Zeitmaßstab (große Teilung $\hat{=}$ Laufzeit in 1 m Stahl) macht deutlich, daß nach dem 1. Hauptecho etwa 50 % der Meßzeit von t_1 für ein evtl. aus dem angekoppelten Flüssigmedium stammenden Echos nicht ausgewertet werden können. Die nach t_1 eintreffenden Echoimpulse aus dem Natriumsystem können mit einer derart ausgeführten Koppelstange nur innerhalb eines engen Laufzeitbereichs, in diesem Fall zwischen 0,18 und 0,36 ms, ausgewertet werden. Bei einer Laufzeit $> 0,36$ ms fällt der Echoimpuls in den Bereich des 2. Hauptechos des Koppelstabes. Dies würde bedeuten, daß nur Objekte oder Störstellen unter Natrium in einen Ortungsbereich von 450 bis 900 mm - vom Transducer-Ende an gerechnet - erfaßt werden. Aufgrund der ausgewerteten Wasserversuche mit Koppelstangen empfiehlt sich daher der Einsatz verrippter Transducer nur bei fest abgegrenzten Ortungstiefen, deren Geometrien das Verhältnis 1 : 2 nicht überschreiten. Die Länge L des Stabes richtet sich dabei nach der größten noch abzutastenden Ortungstiefe X_{\max} :

$$L = X_{\max} \cdot \frac{c_{Tr}}{c_{Na}}$$

Darin bedeuten c_{Tr} = longitudinale Schallgeschwindigkeit in metallischen Transducern

und c_{Na} = Schallgeschwindigkeit im Flüssignatrium

Für die kürzeste Ortungslänge X_{\min} unter Natrium findet man $X_{\min} = (1-k)X_{\max}$. Hierin bedeutet k eine Konstante,

die, je nach Oberflächenbeschaffung des Transducers, seines Schlankheitsgrades und in Abhängigkeit von der Ultraschalldämpfung des Materials zwischen 0 und 1 liegt.

Da k primär wegen der auftretenden Nebenechos berücksichtigt werden muß, wird dieser Beiwert als "Relativer Nebenecho-Abstand" bezeichnet. Wie man leicht aus Abb. 14 erkennen kann, beträgt k im Falle des 2 m langen und nur teilverrippten Koppelstabes $k = 0,5$, da nur die Hälfte des Laufzeitintervalls zwischen den beiden Haupt-Stubechos annähernd frei von Nebenechos bleibt. Im Idealfall wird $k = 1$, somit $X_{\min} = 0$, d.h. keinerlei Nebenechos würden den Meßbereich einengen. Eine sog. "tote Zone", die keine Ortung in unmittelbarer Nähe des Transducers zuläßt, würde nicht existieren.

6. Direkt-Sensoren

6.1 Eigenschaften

Während die Einsatzmöglichkeiten von temperaturentkoppelnden Koppelstangen zwischen Ultraschallwandler und Flüssignatrium beschränkt sind, bieten immersierte Wandler einige bemerkenswerte Vorteile:

- es treten im Fernfeld keine störenden Nebenechos auf,
- die Anpaßverluste sind minimal, da die Stoßstellen des Koppelstabes beim Übergang auf Natrium entfällt; daher treten keine Vielfachen des Hauptechos im Transducer auf,
- der relative Nebenecho-Abstand erreicht unter gewissen Bedingungen den Wert $k = 1$,

- der Ortungsbereich beginnt bereits im Nahfeld des Sensors und erstreckt sich ohne Einschränkung über viele Meter in den Natriumraum,
- Direktsensoren lassen sich einfacher in den Ortungsbereich einführen und daher leichter auswechseln.

Voraussetzung für den Reaktoreinsatz derartiger Ultraschall-Sensoren ist eine ausreichende Strahlenbeständigkeit und die darüber hinaus zu fordernde Temperaturverträglichkeit. Während alle bisher bekannten mono- und polykristallinen Piezomaterialien wegen ihrer niedrigen Curie-Temperaturen für den Hochtemperaturbetrieb ohne Bedeutung sind, bietet monokristallines Lithium-Niobat (LiNbO_3) gute Voraussetzungen für die Herstellung eines Direktsensors unter Reaktorbedingungen. Einige wesentliche technische Bedingungen müssen hierbei beachtet werden:

- die Schnittrichtung der LiNbO_3 -Scheibe hat so zu erfolgen, daß fortschreitende longitudinale Wellen in axialer Richtung erzeugt werden. Dabei sollen keine Scher-, Biege oder Torsionswellen auftreten,
- da der lineare Ausdehnungskoeffizient des Piezokristalls von seiner Schnittrichtung abhängt, muß ein geeigneter Edelstahl mit gleichartigem $\Delta l/l$ -Verlauf über den gesamten Temperaturbereich von 20 °C bis 600 °C gefunden werden, der als Trägermaterial für Lithium-Niobat oder als Diaphragma eingesetzt werden kann,
- eine gute akustische Kopplung muß zwischen dem Kristall und dem VA-Trägermaterial vorhanden sein,

- das Piezomaterial muß einer hochreinen Schmelze entstammen, Fremdatom-Dotierungen unter 20 ppm müssen gewährleistet sein. Höhere Dotierungen an Metallionen führen bei hohen Temperaturen zu Isolationsverlusten und damit zu einer empfindlichen Einbuße an Sensorsensibilität.

Die nachstehenden Daten beziehen sich auf Angaben einzelner Hersteller und auf bisher veröffentlichte Untersuchungen:

LiNbO₃ Curie-Temperatur TC = 1185 °C
(Czochralski-Ziehverfahren)
bzw. TC = 1210 °C
(modifiziertes C-Verfahren).

Elektromechanischer Kopp-
lungsfaktor K₃₃ = 18,6 %

Ladungs-Koeffizient (z-Schnitt) d = 6,8 · 10⁻¹² C/N

Schallgeschwindigkeit, longi-
tudinal 25 °C c_l = 7430 m/s

Schallgeschwindigkeit, trans-
versal 25 °C c_t = 3715 m/s

Frequenz-Konstante N₃₃ = 3770 (=f·d), (m·s⁻¹)

Mohs-Härte = 5

(keine plastische Verformung bei Druckeinwirkung in Rich-
tung der z-Achse bei monokristallinen Kristallen unterhalb
1160 °C.) Dielektrizitätskonstante (~ zur z-Achse, f= 5 MHz)
ε₃₃ = 60

Thermische Eigenschaften:

Der mittlere lineare Ausdehnungskoeffizient α (in 10⁻⁶·grd⁻¹)
in Richtung der x-Achse (T = 25^o bis 800 °): α_{xm} = 8

in Richtung der z-Achse ($T = 25^{\circ}$ bis 800° C): $\alpha_z = 2$

Für die mittleren α -Werte gilt nach (3) in den Temperatur-Intervallen:

$\alpha_m =$	200 → 400	400 → 600	600 → 800	800 → 1000 ^o C
(10^{-6} grd ⁻¹)	12	12	13	15

Die Temperaturabhängigkeit der relativen thermischen Ausdehnung einer z-geschnittenen LiNbO_3 -Scheibe in radialer Richtung (= senkrecht zur z-Achse) wird durch ein Polynom der Form

$$\Delta l/l = \alpha(T-25) + \beta (T-25)^2 + \lambda (T-25)^3 + \dots \quad (1)$$

beschrieben. Hierin sind α , β und λ die linearen thermischen Ausdehnungskoeffizienten 1., 2. und 3. Ordnung.

Da eine nichtlineare Temperaturabhängigkeit der α -Werte vorliegt, muß in obiger Beziehung für jeden Wert T eine Korrektur für α vorgenommen werden. Für den Koeffizienten β ergibt sich kein nennenswerter Temperaturgang, so daß für ihn $-7,7 \cdot 10^{-9}$ (Herstellerangabe/Union Carbide Company) gesetzt wird, λ fällt nicht ins Gewicht und wird vernachlässigt.

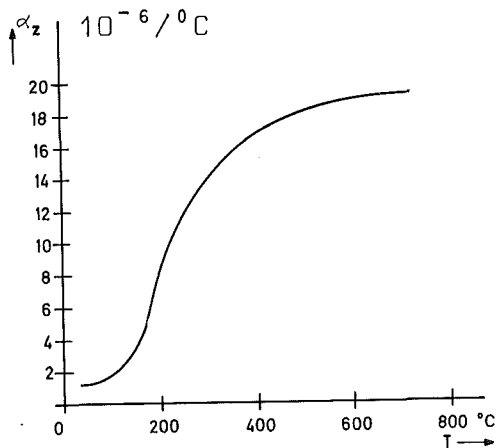


Bild 15:

LiNbO_3

z-Schnitt

Linearer thermischer

Ausdehnungskoeffizient α_z

Eingesetzt in die Gleichung (1) erhält man mit guter Annäherung die in Bild 16 gezeigte Abhängigkeit $\Delta l/l$ von der Temperatur.

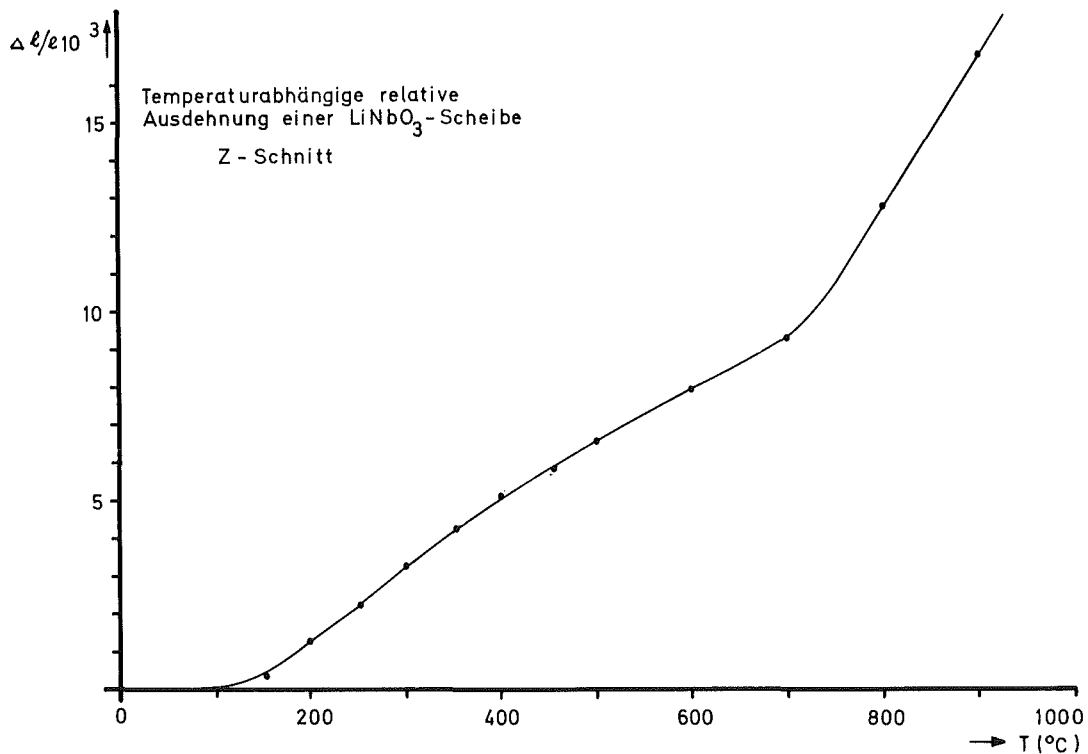


Bild 16: Temperaturabhängigkeit der relativen thermischen Ausdehnung von LiNbO₃ - z -Schnitt in radialer Richtung

Neben dem vorerwähnten z-Schnitt sind weitere, longitudinale Wellen-Mods erzeugende Schnittrichtungen bekannt. So werden u.a. Lithium-Niobat-Kristalle im "36° χ -rotated y-cut" für spezielle Anwendungen bei minimaler Scherwellenerzeugung eingesetzt. Für diese Schnittrichtung sind bisher

keine verlässlichen α - und β -Daten aus der Literatur bekannt.

LiNbO_3 wird in dünnen, meist runden Scheiben als piezoelektrisches Wandlerelement eingesetzt. Da der Kristall nicht mit Natrium in Berührung gebracht werden darf, wird in der Regel eine aperiodisch abgestimmte Membran als mechanische Trennung verwendet. Es sind Membranstärken von wenigen Millimetern üblich. Im Ultraschallbereich, insbesondere dann, wenn die Wellenlängen vergleichbar mit den Abmessungen der Membrane zusammenfallen, werden $\lambda/2$ -Diaphragmen oder Vielfache davon als Membrane eingesetzt. In diesen Fällen wird ein abgestimmter, d.h. selektiver Betrieb ermöglicht.

Die akustische Ankopplung des Piezowandlers an die Membrane ist von größter Bedeutung. Sie geht unmittelbar in den Übertragungs-Wirkungsgrad ein und hat über den gesamten Temperaturbereich, auch bei zyklischem Betrieb, gleich stabil zu erfolgen. Spezielle Kontaktierungsverfahren kommen hierbei zur Anwendung.

Eine wesentliche Aufgabe fällt der guten akustischen Ankopplung der Piezoscheiben an ihre Unterlage zu. Sie muß über den gesamten Temperaturbereich zuverlässig bestehen und darf nicht zu "Koppellöchern" oder zu einer Temperaturabhängigkeit führen, die den Einsatz der Ultraschallsensoren in Teilbereichen einschränkt.

Mehrere Koppelverfahren wurden im Institut für Reaktor-entwicklung untersucht, wobei Scheibendurchmesser im Bereich 10 bis 20 mm gewählt wurden. Die Oberflächen der Kristalle waren dabei teilweise blank, poliert,

oder für Nachbearbeitungszwecke roh. Als Kontaktunterlagen diente Edelstahl WSt. Nr. 4571 sowie VACON in zwei unterschiedlichen Zusammensetzungen.

6.2 Klebe-Kontaktierung

Da alle bisher eingesetzten Piezowandler für die Anwendung bis 100 °C mit gutem Erfolg klebe-kontaktiert werden konnten, wurde ein Verfahren untersucht, mit Hilfe von Hochtemperatur-Klebern den Einsatzbereich zu höheren Temperaturen hin auszudehnen. Es standen HT-Kleber bis über 400 °C Dauerstandtemperatur zur Verfügung. Nach erfolgter mehrstündiger Aushärtung bei den vorgeschriebenen Temperaturen wurden die Schallsensoren in einem Ofen über den gesamten Temperaturbereich von 250 ° bis 400 °C gefahren und auf ihre piezoelektrischen Eigenschaften untersucht. Es zeigte sich dabei ein gutes Koppelverhalten bis zu 210 °C, darüber hinaus fiel der K_{33} -Wert auf nahezu Null ab. Beim Abkühlen auf Temperaturen <210 °C setzte die akustische Kopplung abrupt wieder ein. Selbst bei 400 °C zeigten die Piezokristalle eine sehr gute Haftung auf ihrer VA-Unterlage, so daß angenommen werden muß, daß die HT-Kleber - bedingt durch einen temperaturabhängigen Strukturwandel - oberhalb 210 °C einen sehr hohen akustischen Übergangswiderstand haben. Über die Zyklierzeit wurde ebenfalls die relative Dielektrizitätskonstante des Klebers gemessen. Es ergab sich dabei beim Überschreiten der kritischen Temperatur um 210 °C eine deutlich abfallende Tendenz. Hierbei konnte auch eine Abnahme des Isolationswiderstandes festgestellt

werden. Versuchsreihen mit HT-Gold-Klebern lieferten keine befriedigenden Ergebnisse. Immer wieder konnten Koppelausfälle oberhalb 200 °C registriert werden, denen eine Abnahme des k_{33} -Koeffizienten um etwa 0,2 %/°C vorausging.

6.3 Druck-Kontaktierung

Bei der klebfreien Druckkontaktierung wird der Kristall auf seine Unterlage aufgepreßt. Da LiNbO_3 keine plastische Verformung unter Druckeinwirkung bis 1160 °C aufweist, jedoch eine breite integrale Flächenauflage der in der Feinstruktur immer unebenen Oberflächen gefordert wird, werden Goldfolien mit 5 μm Stärke - einfach oder mehrfach gestapelt - zwischen dem Kristall und der Metallauflagefläche des Diaphragmas eingebracht. Den grundsätzlichen Aufbau zeigt Bild 17. Als Trennung zur Natriumatmosphäre dient eine Membrane, deren Stärke $n \cdot \lambda/2$ beträgt. Im vorliegenden Falle wurde eine System-Entkopplung durch kreisförmige Nute und Einstiche entlang des Umfangs des Ultra-Schallkopfes bewirkt. Versuche, die Membrane (Diaphragma) aperiodisch zu betreiben, d.h. Membranstärke $\ll \lambda/2$, führten zu keinem Ergebnis, da sich das Diaphragma unter der Krafteinwirkung der vorgespannten Federn verformt und nur schmale Randzonen des Kristalls mit dem Diaphragma in Kontakt bleiben. Dagegen wurden sehr gute Ergebnisse mit Membranstärken von 1 bis 3 mm erzielt, obwohl ein rein aperiodischer Betrieb vorlag. Von Vorteil ist hierbei, daß die Piezoelemente zuvor nicht auf ihre Betriebsresonanzfrequenz ausgemessen werden müssen. Dieser Umstand gewinnt noch mehr an Bedeutung bei einer Lötkontaktierung, da das zusätzliche Lot zum Bestandteil der Membrane zählt und daher eine $\lambda/2$ -Abstimmung erschwert wird.

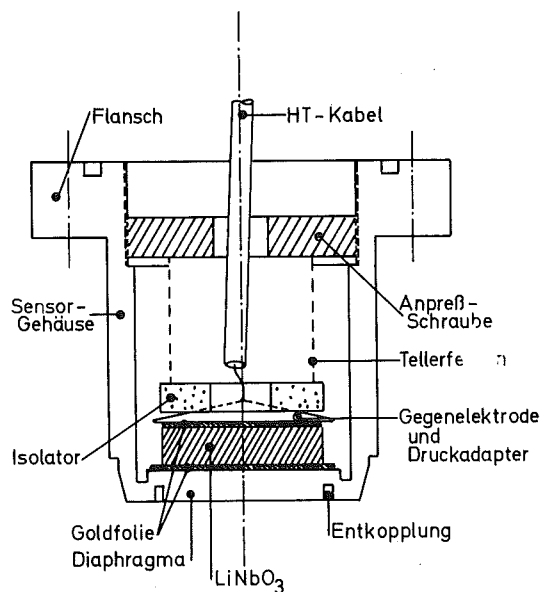


Bild 17: Schematische Darstellung eines LiNbO₃-Ultraschall-Sensors für den Hochtemperatur-Einsatz

6.4 Lötverfahren zur Kontaktierung

Mehrere Lithiumniobat-Kristalle wurden Lötversuchen unterworfen. Bei allen Kristallen mit einer aufgedampften Oberflächen-Golddaufgabe diffundierte das Gold beim Lötvorgang in das Lot, so daß keine haftfähige Verbindung zwischen Kristall und Diaphragma zustande kam.

Mit einer über die Golddaufgabe aufgedampften Chrom-Schicht von einigen µm Stärke konnten Teilerfolge erzielt werden. Sowohl unter Schutzgas als auch in Vakuum wurden einige Kristalle auf ihre VA-Unterlage aufgelötet, die jedoch nur bis etwa 300 °C einwandfrei hafteten. Die unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten von LiNbO₃, Lot und Edelstahl führten bei höheren Temperaturen zu Brüchen oder Abplatzen der Kristalle. In

Bild 18 sind in der oberen Reihe die abgelösten Kristalle zu erkennen. Die Lötreste auf den Oberflächen der Membranen zeigen (untere Bildreihe) keine homogene Lotverteilung auf den Lötflächen. Gaseinschlüsse im Lot oder ungenügendes Fließverhalten des Lotes führen zu partiellen Kontaktverlusten des Kristalls und somit zu einer unvollständigen akustischen Ankopplung.

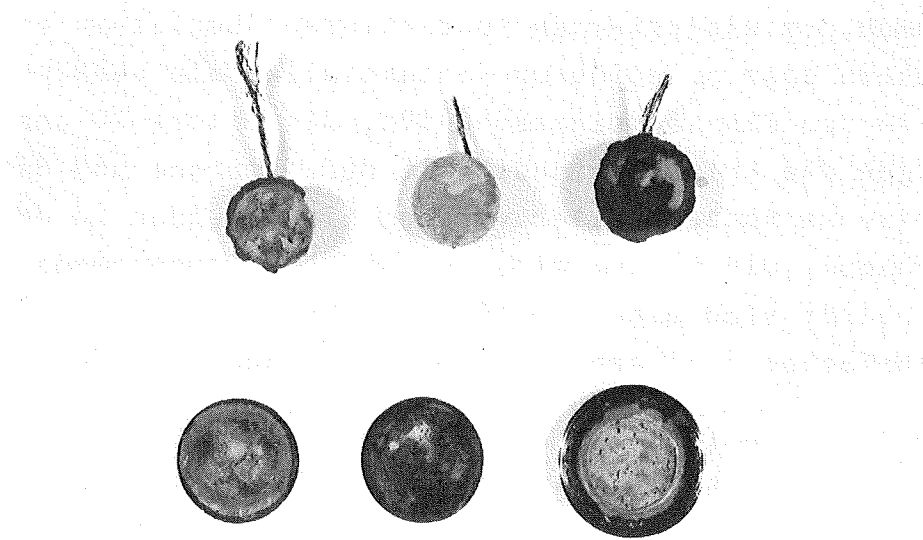


Bild 18: Lötproben mit Lithium-Niobat-Scheiben 15 \varnothing x 0,72 mm, deren Oberflächen vernickelt, vergoldet und verchromt waren. Im mittleren Bildteil ist die vormals vergoldete Scheibe (oben) zu sehen, deren Goldbelag völlig in das Lot (Mitte unten) diffundiert ist.

Bedeutend bessere Ergebnisse wurden mit Platin-Oberflächen der Kristalle erzielt. Mit Hilfe des sog. "Sputtering"-Verfahrens werden sowohl die Kristalle beidseitig als auch die Kontaktoberfläche der Membrane und des elektrischen Flächenkontakts mit einer etwa 1..2 μ m starken

Platinschicht belegt. Durch die hohe Beschleunigung der Metallionen in einem elektrischen Feld wird - im Gegensatz zum Aufdampfverfahren - eine um Größenordnungen höhere Haftung der Platinschicht bewirkt. Es können darüber hinaus auch alle mit dem Hartlot bindenden Metalle zum Sputtern benützt werden. Bild 19 zeigt die Komponenten eines Hochtemperatur-Ultraschallkopfes für den direkten Natriumeinsatz. Die mit dem Kristall verlötete Membrane (2. Position von links) wird nach dem elektrischen Kontaktieren über einen angedrückten oder aufgelöteten Kontaktteller als Gehäuseboden in den Flansch eingeschweißt. Die Bilder 20 und 21 zeigen die Kristalleinheit mit der Membrane und dem elektrischen Kontaktteller vor dem Einschweißen in den Flanschkopf. Die Lötung wird bei 980°C vorgenommen; ihr schließt sich eine 24-stündige Abkühlung und danach ein mehrfaches Zyklieren zwischen 20°C und 600°C an.

Von großer Bedeutung ist die Reinheit der Sputter-Anlage selbst, da bereits geringfügige Verunreinigungen, z. B. Reste der organischen Abdichtungen des Vakuumsystems, die durch die Pumpe in den Sputter-Raum gelangen, zu Oxydationsprozessen an den Lot-Bindeflächen beitragen und zu partiellen Fehlerstellen für die akustische Kopplung führen können. Die teilweise unterschiedlichen Ergebnisse hinsichtlich der Haftfähigkeit und der Koppeligenschaften des Lotes nach dem Sputtern in zwei verschiedenen Vakuumsystemen wird auf Fettreste zurückgeführt, die beim Hochtemperaturlöten zu einer Verkohlung in Teilbereichen des Lots geführt haben.

Die auf die Membrane aufgelöteten Kristalle werden in Alkohol gereinigt und anschließend bei 500°C mehrstündig getrocknet.

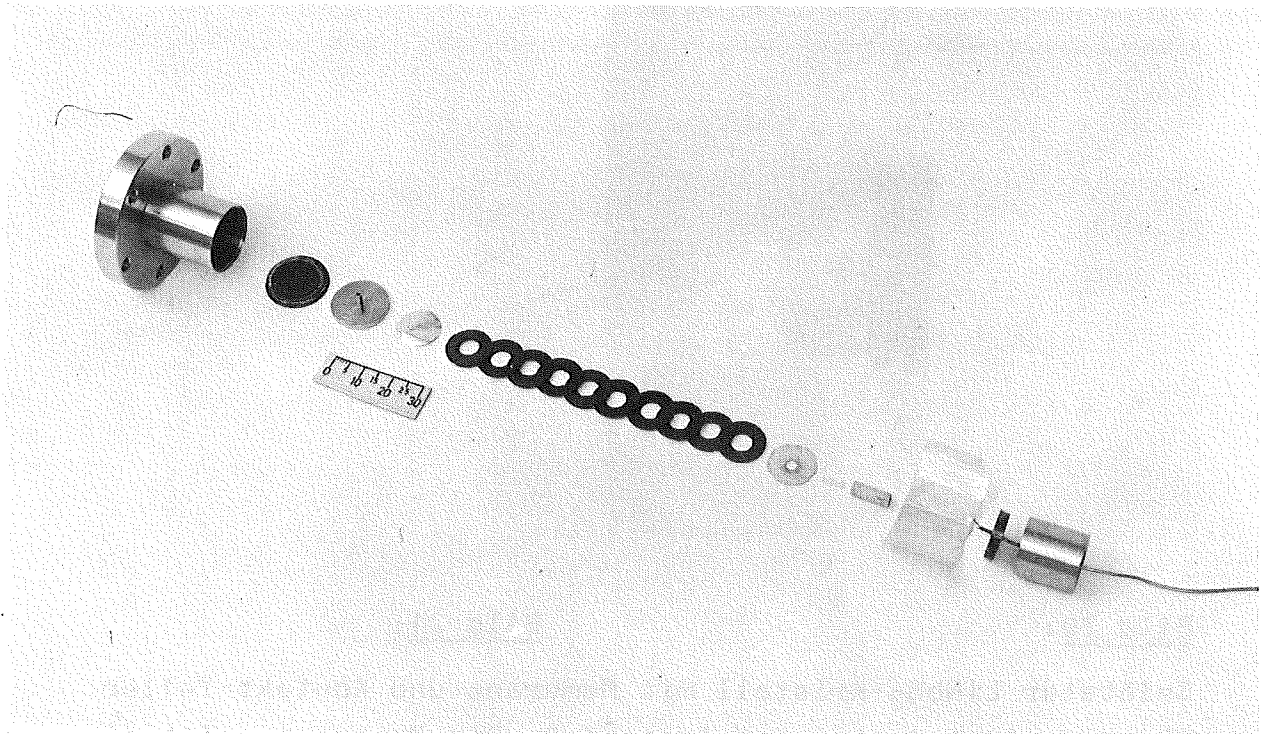


Bild 19: Hochtemperatur-Ultraschallsensor vor dem Zusammenbau. Links: Gehäuse mit dem Montagekopf. Danach folgen: Membrane mit aufgelötetem Lithiumniobat-Kristall, Kontaktteller mit Kabelanschluß, Goldfolie, Tellerfedern zur zusätzlichen Anpressung des elektrischen Kontakts, Isolierteile, Abschluß-Schweißring mit HT-Kabel und Zugentlastung.

Nach erfolgter Kontaktierung des Kristalls mit dem Diaphragma wird letzteres mit Hilfe einer LASER-Schweißung in das Gehäuse eingeschweißt. Danach erfolgt der restliche Zusammenbau und der Anschluß des mineralisierten Kabels. Ehe das Kabel mit dem Gehäuse verschweißt wird, werden die Isolationswiderstände bei verschiedenen Temperaturen gemessen, um sicherzustellen, daß keine Fehler beim Zusammenbau des Ultraschall-Sensors vorliegen.

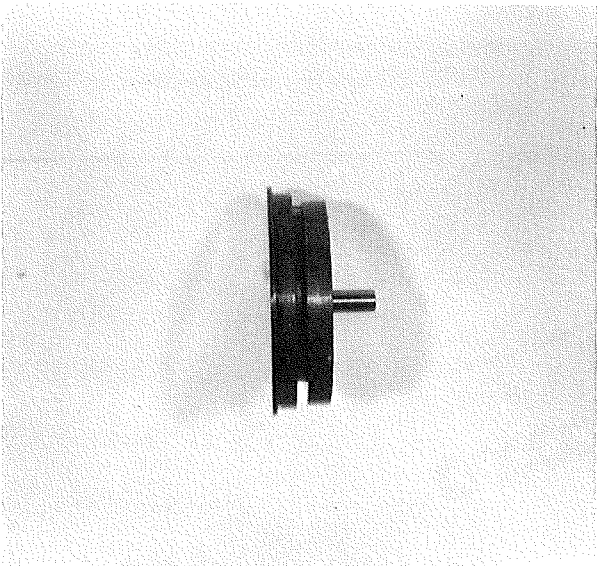
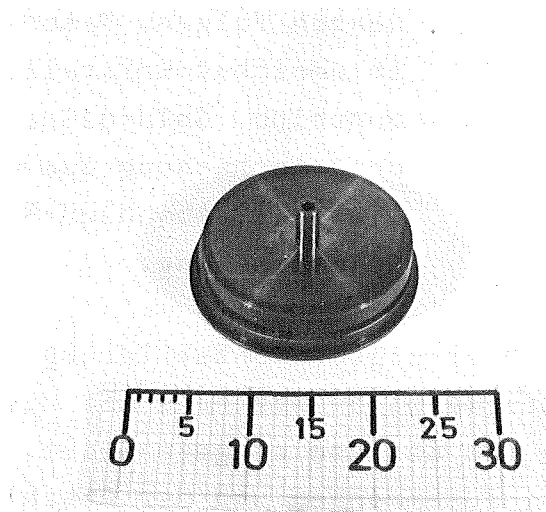


Bild 20:

Gelöteter LiNbO_3 -Kristall mit Membrane und Kontakt-Teller. für den elektrischen Kabelanschluß. Die Membrane weist eine Schweißlippe für die Verschweißung in den Gehäuseboden auf. Kristall: $15 \times 0,72$ mm, Eigenresonanz $f_0 = 4,4$ MHz, z-Schnitt.

Bild 21:



7. Ortungsverfahren

Für eine Reihe wichtiger mechanischer Reaktor-Komponenten unter Natrium ist eine Überwachung der Lagebestimmung aus Gründen der Handhabung und der Sicherheit unerlässlich. Hierzu gehören insbesondere die genaue Positionierung der Brennelemente vor dem Umladen des Kerns oder das Freitasten des Natriumraumes zwischen den Brennelementköpfen und der Instrumentierungsplatte.

Bisher bekannte mechanische Verfahren sind teilweise aufwendig, arbeiten zu langsam oder liefern nicht alle wünschenswerten Aussagen.

Betrachtet man die Ultraschallortung unter dem Gesichtspunkt realistischer Reaktorgeometrien mit Schallwegen von wenigen Zentimetern bis zu acht Metern Länge, so wird im Interesse einer guten Ultraschall-Energiebilanz eine möglichst hohe Bündelung des Schallfeldes gefordert. Untersuchungen haben gezeigt, daß sich zur Lagebestimmung mechanischer Elemente im Millimeterbereich hochfrequente Schallimpulse eignen, da zwischen dem Öffnungswinkel des Schallfeldes und der Schallfrequenz ein linearer Zusammenhang besteht. Umgekehrt aber steigt die Schalldämpfung in Flüssigmetallen mit dem Quadrat der Frequenz, so daß bei Erreichen einer bestimmten Streckendämpfung im Sinne eines noch vertretbaren Signal/Rauschverhältnisses der Wahl einer höheren Schallfrequenz Grenzen gesetzt sind. Im Experiment wurde daher die für die jeweilige Aufgabenstellung optimale Frequenz gewählt.

Die Kenntnis der Position der Brennelementköpfe ist nicht nur für das Umladen des Kerns unerlässlich, sondern zur Prüfung des Kernverbandes im Hinblick auf Verlagerungen

und Verformungen wünschenswert. Hierzu wird eine Ultraschallsonde mit einem oder mehreren Einzelsensoren über die Positionen der Brennelementköpfe hinwegbewegt, wobei zur Positionierung die Echosignale einer etwa 1 cm^2 großen Referenzfläche am Oberteil des Brennelementkopfes dienen. Denkbar ist ein verbessertes Verfahren mit drei jeweils um 120° Winkelgrade versetzten Einzelsensoren, das eine Automatisierung des Aufsuchens und Zentrierens der Sonden über dem Ziel gestattet. Herausragende oder zu tief sitzende Brennelementköpfe werden über Messung der Ultraschallimpuls-Laufzeit in z-Richtung ermittelt. Untersuchungen im Hinblick auf die Meßgenauigkeit des Verfahrens zeigen, daß Entfernungs-Messungen Fehler von 1 % aufweisen, welche im wesentlichen auf Verunreinigungen und Temperaturverschichtungen des Natriums zurückzuführen sind (Kapitel 10). Zur Lagebestimmung der Brennelementköpfe in x- und y-Richtung dient die 3 mm breite kreisrunde Oberkante des Vermischungskopfes. Bei Schallfeldöffnungswinkeln von 1 bis $2 \frac{1}{2}$ und Schallwegen von 400 mm werden Positioniergenauigkeiten von $\pm 1 \text{ mm}$ erreicht.

Die Überwachung des Natriumraumes im Hinblick auf restverbleibende Fremdkörper wurde bisher mit mechanischen Tastarmen durchgeführt. Hierbei fehlt im allgemeinen die Aussage über genaue Lage eines getasteten Objekts, da nur die Winkelstellung, nicht aber der radiale Abstand vom Drehmittelpunkt aus angegeben werden kann. Die in Kapitel 9 beschriebenen Experimente an Wasser-Modellen haben gezeigt, daß eventuell aus dem Kernverband herausragende Brennelemente mit Hilfe des Ultraschall-Reflexions-Verfahrens lagebestimmt werden können. Hierzu dient ein

axial drehbares Schutzrohr, das an seinem in den Ortungsbereich hineinragenden Ende einen oder mehrere Schallköpfe enthält, die - ähnlich dem Radarprinzip - Ultraschallimpulse aussenden und deren Echos wieder aufnehmen. Als Referenzmaßstab können das Rückwandecho oder bekannte Einbauten des Tanks bei der jeweiligen Winkelstellung des Tastarms herangezogen werden, so daß störende Zustandsgrößen des Natriums weitgehend kompensiert werden. Bild 22 zeigt schematisch die Wirkungsweise des Ultraschall-Tastarms. Der in einem Rohr gegen die Natriumatmosphäre geschützte Sensor S_0 dreht sich mit der Kreisgeschwindigkeit ω und sendet dabei Ultraschallimpulse in den zu überwachenden Natriumraum. Solange keine Störung durch den gebündelten Schallstrahl getroffen wird, nimmt der Sensor lediglich das Rückwandecho E_r nach Durchlaufen der Strecke r_0 auf. Gelangt hingegen ein Hindernis in den Ortungsbereich, so wird zusätzlich zum Rückwand-(Referenz)-Echo ein Störecho E_s mit einer um das Verhältnis r_1/r_0 kürzeren Laufzeit gemessen. Bild 23 zeigt das Monitorbild einer Störungsortung zusammen mit dem Rückwandecho. r_0 markiert hierbei den Startimpuls und somit den Nullpunkt für den Zeitmaßstab. Letzterer dient bei bekannten Schallparametern des Natriums als Weg-Maßstab. S_0 stellt die Strecke für die Entfernung des Sensors von der gegenüberliegenden Tank-Innenwand bei einem vorgegebenen Winkel ϕ dar, während die Entfernung der Störstelle durch die Strecke S_0 - E_s gekennzeichnet ist. Durch die teilweise Verdeckung der Rückwand durch das Störvolumen von E_s erscheint ein gewähltes Rückwandecho. Neben der nach ϕ und r_1 möglichen lokalen Ortung einer Störung gestattet das hier genannte Verfahren über das Verhältnis der Echointensitäten E_s und E_r auch eine Aussage über das Störvolumen.

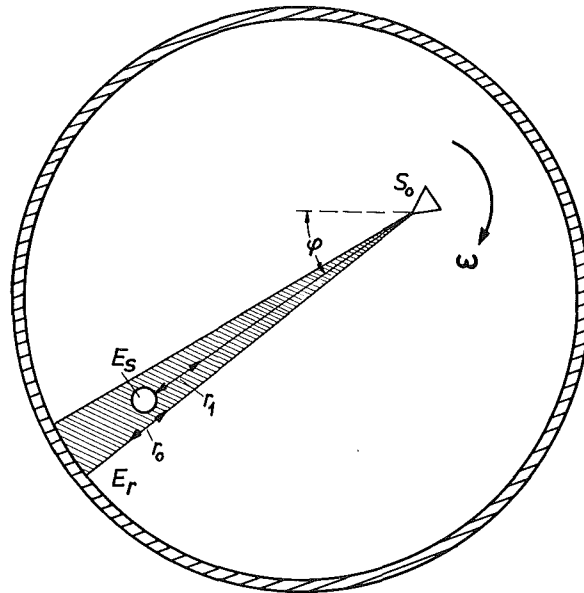


Bild 22: Schematische Darstellung des Ultraschall-Tastarms. S_0 stellt den rotierenden Sensor dar, in dessen Schallfeld (schraffiert) die Störung E_s gelangt ist. Zur Lagebestimmung werden der Positionierungswinkel ϕ und die Laufzeit des Echos E_s für die Wegstrecke $r_1 = S_0-E_s$ gemessen.

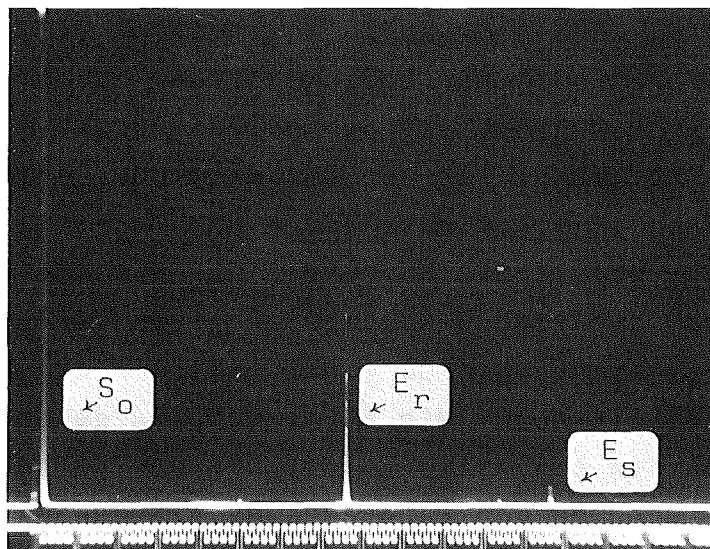


Bild 23: Monitoraufzeichnung eines Störstellen-Echos (Bildmitte) mit geschwächtem Rückwandecho als Abstandsreferenz. Ein mitgeschriebener Wegmaßstab in X-richtung markiert die Abstände der Störstelle und der Rückwand vom Sensor links im Bild.

7.1 Testeinrichtung

Als Testbehälter diente ein offenes, rundes Stahlbecken mit den Abmessungen 2000 Ø x 900 mm, das mit Wasser gefüllt war (Bild 24). Kurze Rohrstücke mit unterschiedlichen Durchmessern und Wandstärken wurden als Ortungsobjekte benutzt. Eine Vorrichtung gestattete dabei diese Einbauten zu neigen. Zur Simulation der Brennelementköpfe wurden drei Dummys aus Edelstahl W.St. 4571 in den Originalabmessungen hergestellt, die als zusätzliche Referenz-Schallfläche einen plangedrehten konzentrischen Absatz aufwiesen.

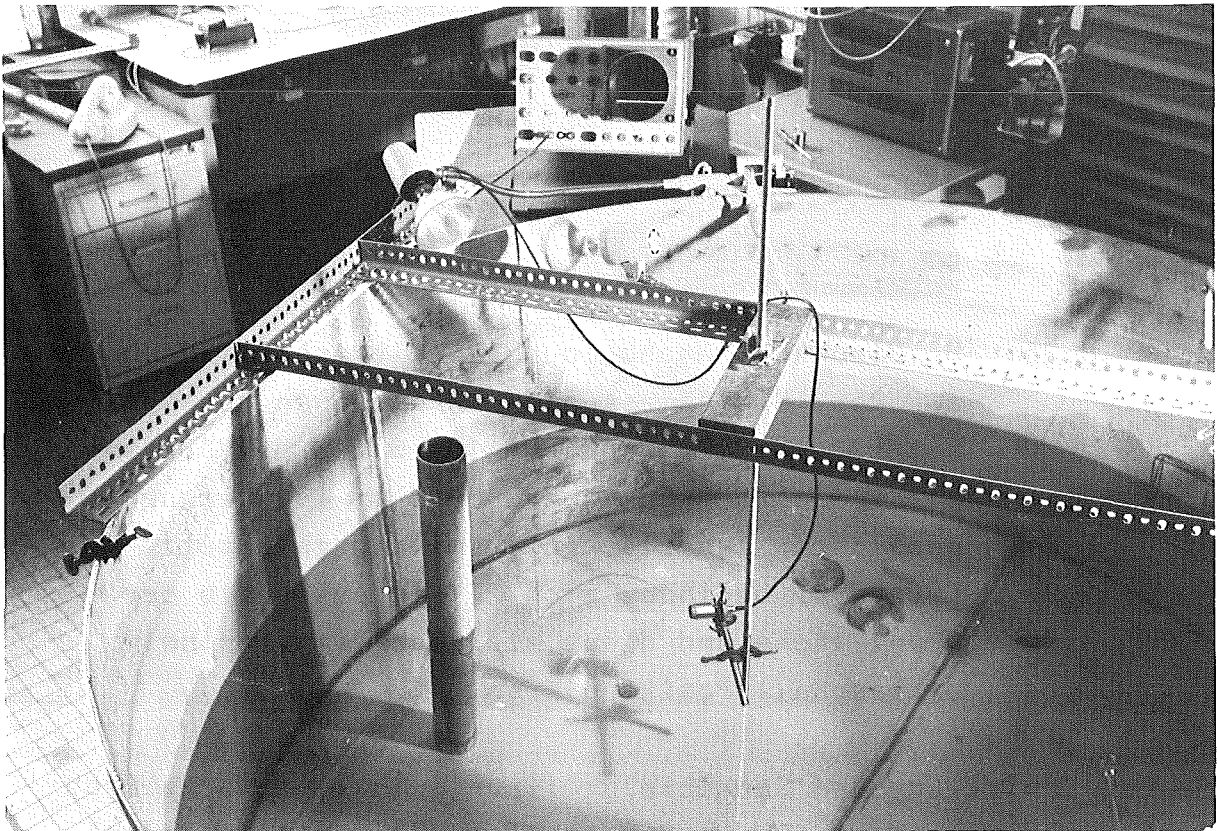


Bild 24: Testbehälter zur Erprobung der Ultraschall-BE-Positionierung und zur Simulation des Ultraschall-Tastarms bei reaktorähnlichen geometrischen Abmessungen.

Über mehrere, unterschiedlich ausgeführte Drehhalterungen, die an ihrem unteren Ende den Ultraschallsensor enthielten, wurden die Sensoren in allen drei Raumkoordinaten bewegt. Winkel-Messungen des Drehwinkels wurden über eine Winkelscheibe vorgenommen.

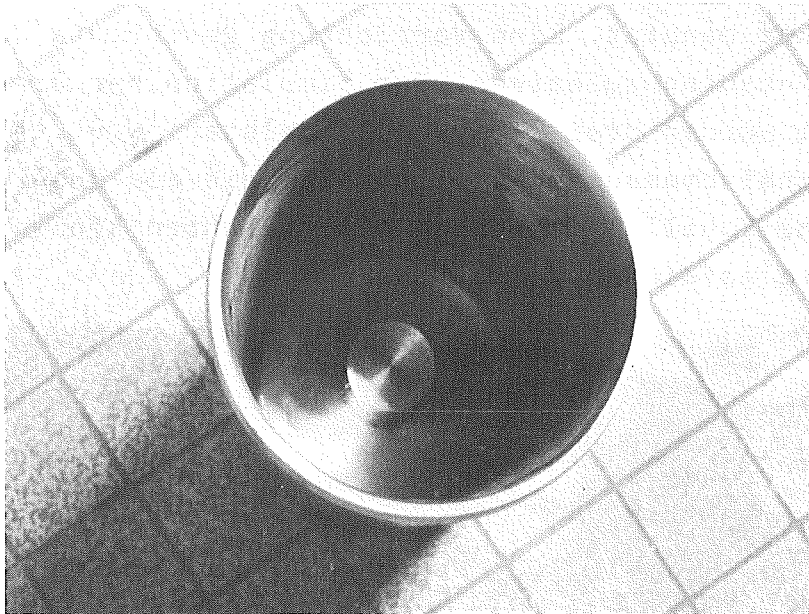


Bild 25: BE-Mischkopf-Nachbildung zu Ultraschall-Ortungszwecken. Die Abmessungen entsprechen den Originalgrößen im Reaktor von 104 \varnothing x 3 mm für den plangedrehten Kranz bzw. 30 \varnothing mm für den nachgebildeten zentrischen Vermischungseinsatz. Letzterer befindet sich 225 mm unterhalb der Kranzfläche und dient als Echo-Referenz beim Ultraschall-Positionieren.

Zur Ermittlung des Schallfeld-Öffnungswinkels und zu Eichzwecken der Apparatur wurden massive zylindrische Probekörper aus W.St. 4571 mit unterschiedlichen Abmessungen hergestellt. Diese dummys wurden auf den Boden des Testbeckens gestellt und dienten bei bekanntem Abstand x von

der Störfläche bis zur Ortungsoberfläche des Probestücks der Bestimmung des Ausbreitungskoeffizienten c im Wasser. Auf diesem Wege wurden auch störende Einflüsse untersucht, die durch Verunreinigungen oder durch Temperaturänderungen des Wassers bewirkt werden.

Bild 26 zeigt die schematische Anordnung. Mit E_1 wird der Weg des Ultraschall-Impulses bezeichnet, während E'_1 den Wegverlauf des Echoimpulses vom Probestück zum Sensor zurück bedeutet. Die Echozeit ist somit das Verhältnis der Summe der Wegstrecken $x_{E_1} + x_{E'_1} = 2x$ zur Ausbreitungsgeschwindigkeit c

$$t_{\text{Echo}} = \frac{x_{E_1} + x_{E'_1}}{c} = \frac{2x}{c}$$

Der Abstand x ist eine vorgegebene Größe, die Laufzeit des Echoimpulses t_{Echo} wird elektronisch mit einem Quarz-Zeitbasis-Signal verglichen und kann mit einer Genauigkeit von besser 10^{-5} bestimmt werden. Somit erhält man nach obiger Beziehung mit $c = \frac{2x}{t_{\text{Echo}}}$ den Ausbreitungskoeffizienten für das Simulationsmedium Wasser. Es wurden bei allen Experimenten c -Werte zwischen 1477,6 und 1481,1 m/s bei Wassertemperaturen von 17,5 °C bis 19,5 °C gemessen.

Die Untersuchungen haben weiterhin gezeigt, daß eine Ortungsgenauigkeit von 10^{-3} erreicht werden kann, wenn der Schallfeldöffnungswinkel hinreichend klein ist und keine Interferenzen mit Vielfachechos vom dummy-Boden oder von der Wasseroberfläche vorliegen. Auf die Berechnung der Halbwertsbreite des Schallfeldes wird in Abschnitt 9.1 näher eingegangen; das Zustandekommen von Neben- und Doppelechos wird anhand der Abbildungen 32 bis 36 erläutert.

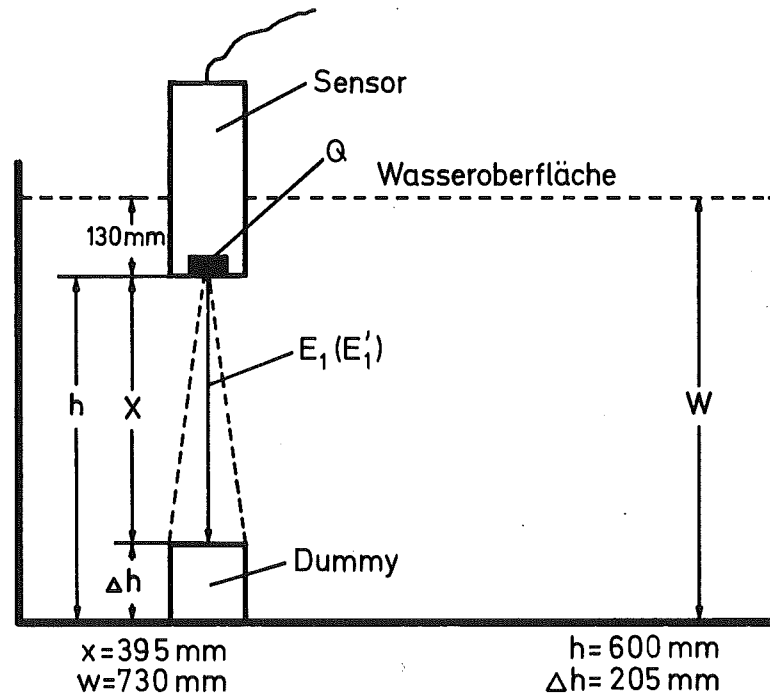


Bild 26: Wasser-Testeinrichtung mit einem Probestück zur Bestimmung des Schallfeldöffnungswinkels α und des Schallausbreitungskoeffizienten c . Es wurden Schallköpfe mit Resonanzfrequenzen zwischen 1 und 8 MHz erprobt. Die Wandlermaterialien waren Bariumtitanat (PXE 4 und 5), sowie Quarz (SiO_2) im x-Schnitt.

7.2 Experimente

Die im folgenden beschriebenen Einzelexperimente wurden sowohl mit Koppelstangen-Sensoren als auch mit direkt wasserimmersierten Ultraschallköpfen durchgeführt. Wegen der in Kap. 5 bereits geschilderten Einschränkungen durch die Vielfachen der Haupt- und Nebenechos an den Grenzflächen der Koppelstäbe wurde diese Technik nicht mehr weiterverfolgt. Für die Abschätzung der zu erwartenden Genauigkeiten im Rahmen der Ultraschallverfahren zur Positionierung und zur Abtastung der BE-Köpfe ist die Kenntnis des Schallfeldöffnungswinkels eine wesentliche Voraussetzung.

7.3 Bestimmung der Halbwertsbreite des Schallfeldes

Treffen die scheinwerferartig von einem Ultraschallgeber ausgehenden Wellen auf eine ebene Fläche, so erfolgt eine Reflexion nach den bekannten Winkelgesetzen. Bei einer hinreichend hohen Schallfeldbündelung genügt eine relativ kleine Ausdehnung der Reflexions-Ebene, um den Sensor den überwiegenden Teil der reflektierten Impulsenergie wieder aufnehmen zu lassen. Zur Bestimmung desjenigen Schallöffnungswinkels, bei dem die Schallstärke (Watt/cm²) auf -6 db abgefallen ist - auch "Halbwertsbreite" genannt -, wurde ein Probekörper mit 50 mm Durchmesser und 205 mm Länge in einer Anordnung nach Bild 26 eingesetzt. Für Ultraschallköpfe mit runden Wandlern erhält man

$$\sin \alpha_{-6\text{db}} \approx 0,55 \frac{\lambda}{D_{\text{eff}}} = 0,55 \frac{c}{f \cdot D_{\text{eff}}} \quad (\text{Gl. 2})$$

D_{eff} = wirksamer Wandler-Durchmesser = 0,9 · D_w

D_w = mechanischer Wandler-Durchmesser

c und f , sowie D_w sind bekannte Größen. Es folgt für einen 5 MHz-Wandler mit $D_{\text{eff}} = 0,9 \cdot D_w = 13 \text{ mm}$:

$$\sin \alpha_{-6\text{db}} = 0,0125 \quad \text{oder} \quad \alpha_{-6\text{db}} = 0,72^\circ$$

für den Halbwerts-Winkel. Für $x = 395 \text{ mm}$ ergibt sich auf dem Probestück eine Echofläche mit dem Durchmesser $D_E = 9,9 \text{ mm}$ bezogen auf die -6db-Grenze. Bei einem 50 mm-Durchmesser des dummies werden demzufolge keine zusätzlichen zeitverzögerten Echos von dem tiefer liegenden ($\Delta h = 205 \text{ mm}$) Boden des Behälters erwartet. Im Bild 27 ist in der rechten Bildhälfte der Echoimpuls von der dummy-Oberfläche über dem mitgeschriebenen Quarz-Zeitmaßstab zu sehen. Das Flächenverhältnis $D : d$ verhält sich dabei wie $(\frac{50}{9,9})^2 = 25,5 : 1$.

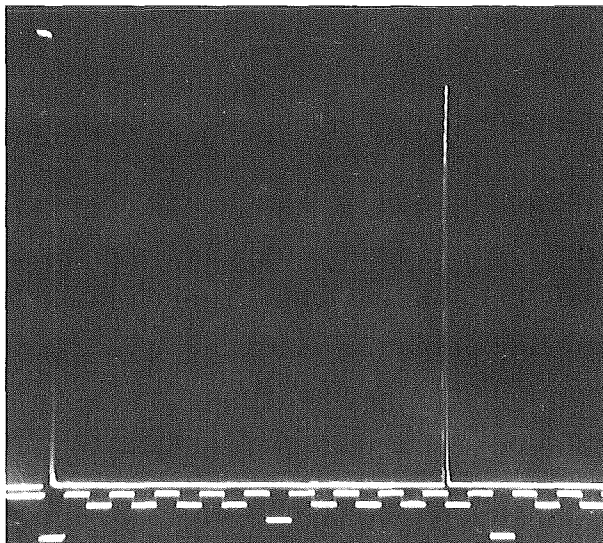


Bild 27: Echoimpuls einer Ortungsfläche $D = 50 \text{ mm } \varnothing$ im Abstand $x = 395 \text{ mm}$ vom Ultraschallgeber. Resonanzfrequenz = 5 MHz , Schallöffnungs-Winkel: $\alpha_{-6\text{db}} = 0,72^\circ$. Impuls: Störabstand besser 40 db . Unterer Bildrand: Mitgeschriebener Zeitmaßstab in $20 \text{ } \mu\text{sec}$ -Schritten.

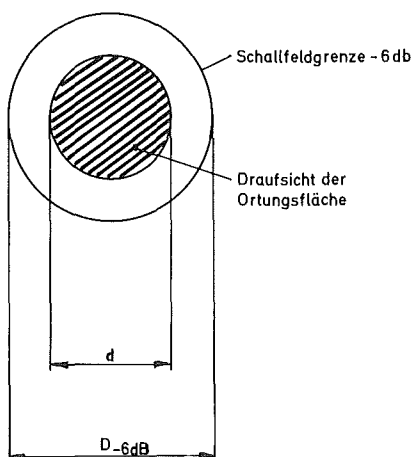


Bild 28:

Konzentrische Impulsbeschallung mit einem zu weiten Schallfeld-öffnungswinkel. Ein Teil der Impulsenergie wird von der tiefer liegenden Bodenfläche reflektiert und tritt als zeitverzögertes Echo in Bild 29 = 3. Impuls von links auf.

Sowohl zu große Öffnungswinkel als auch teilweise "Überlotungen" von Ortungszielen rufen Zweideutigkeiten hervor. Eine klare Aussage wird nur erhalten, wenn die Nebenechos aufgrund bekannter geometrischer Gegebenheiten bekannt sind und interpretiert werden können. Hierzu zählt im vorliegenden Fall das Echo des Beckenbodens. Im Bild 29 ist außerdem

das Echo von der Wasseroberfläche (rechter Impuls) zu sehen, das nach den Weg-Zeit-Gesetzen als Echo mit der längsten Laufzeit auftritt (= E_3).

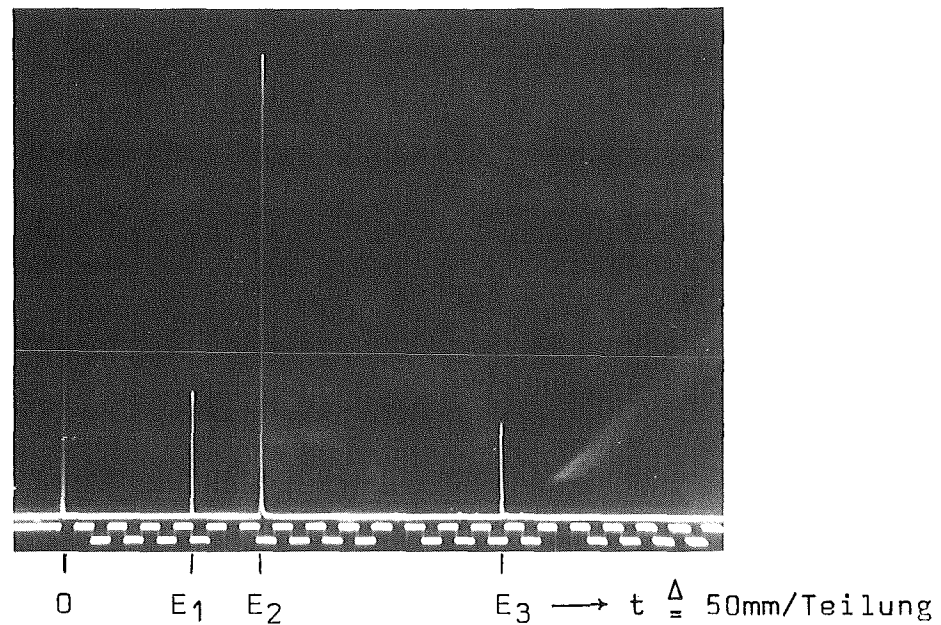


Bild 29: Echogramm einer Ziel-Überlotung

Vom Ziel (E_1) wird nur ein Teil der Impulsenergie reflektiert, da die Ortung nicht zentral erfolgt. Nach Abb. 31 erscheint das Bodenecho entsprechend einer Reflexionsfläche F_3-F_2 mit deutlich höherer Intensität (E_2). Es ist das Echo der Wasseroberfläche, das wegen der größeren Weglänge zeitlich verzögert eintrifft. Die im Bild dargestellte Zeitachse t enthält einen über die Ausbreitungsgeschwindigkeit umgerechneten Weg-Maßstab mit 50 mm pro Teilung.

Die zeitlichen Verhältnisse werden in Abb.30 wiedergegeben.

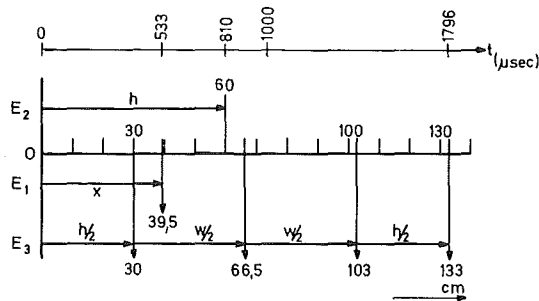


Bild 30: Weg-Zeit-Diagramm der Ultraschall-Echos bei einer Überlotung nach Bild 32. Alle Maßangaben in cm.

E_1 = Echo der Störung im Abstand $x = 39,5$ mit einer Laufzeit $t_1 = \frac{2x}{c} = 533 \mu\text{sec}$.

E_2 = Bodenecho aus 60 cm Tiefe, entsprechend Wegstrecke $2 \cdot h$ in Bild 32, $t_2 = \frac{2h}{c} = 810 \mu\text{sec}$.

E_3 = Boden-Wasseroberflächen-Echo, entsprechend den einfachen Wegsummen $(h + w) + (w' + h')$ = $2(h + w) = 266 \text{ cm}$ nach Bild 32, somit $t_3 = \frac{2(h + w)}{c} = 1,796 \text{ msec}$.

Außer den in Bild 29 enthaltenen Echoimpulsen E_1 bis E_3 werden in geringem Maße auch die Vielfach-Echos der 2. und 3. Ordnung gemessen, die im vorliegenden Falle bereits im Rauschen enthalten und bei voller Signalverstärkung eben noch sichtbar sind. Alle Echos 2. Ordnung weisen die doppelte Laufzeit auf und würden sich - betrachtete man sie allein - in einem Echogramm mit einem doppelten Wegmaßstab abbilden. Da die gleichen Voraussetzungen und Zuordnungen hinsichtlich der Reflexionsstellen Gültigkeit behalten, bleibt auch das Verhältnis der Intensitäten der Echos höherer Ordnung zu denen der ersten Ordnung unverändert.

Teilweise Überlotung vom Störungs-Einbau

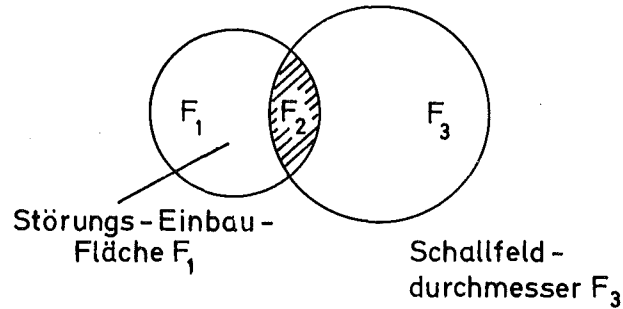


Bild 31: Eine Überlotung einer zu ortenden Störstelle liegt dann vor, wenn das auf die Störung projizierte Schallfeld F_3 die Störung mit der Sichtfläche F_1 nicht zentrisch trifft. Die aus der Restfläche F_2 reflektierte Gesamt-Impuls-Energie ist dann deutlich geringer. Eine Überlotung findet auch dann statt, wenn der Schallfeldöffnungs-Winkel zu groß wird, so daß bei zentrischer Ortung $F_3 > F_1$ ausfällt.

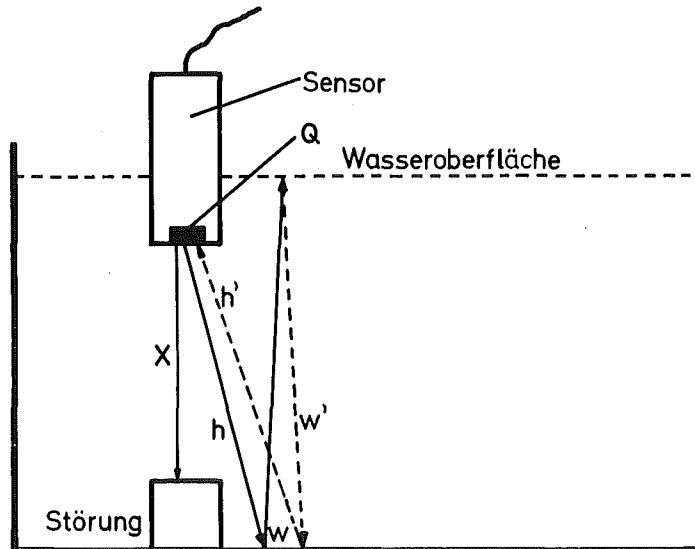


Bild 32: Echoverlauf zum Oszillogramm nach Bild 30 mit Bodenwasserflächen-Echo.

Um die Echoverhältnisse noch weiter zu verdeutlichen, zeigt das Echogramm in Bild 33 neben dem Hauptecho E_1^0 von der zentral georteten Störungsstelle das Bodenecho E_2 sowie das Echo zwischen der Störungsstelle und der Wasseroberfläche E_3 . Schließlich tritt auch noch das Doppelecho E_1^1 von E_1^0 zwischen Störungsoberfläche und Sensor auf, das auf einer Doppelreflexion beruht. Bedingt durch den Energieverlust an den Reflexionsflächen, den Streuungen an den Grenzflächen und aufgrund der endlichen Schallfeld-Öffnungswinkel, die von jeder Grenzfläche ausgehend betrachtet werden müssen, erscheint E_1^1 mit einer eben noch meßbaren Amplitude.

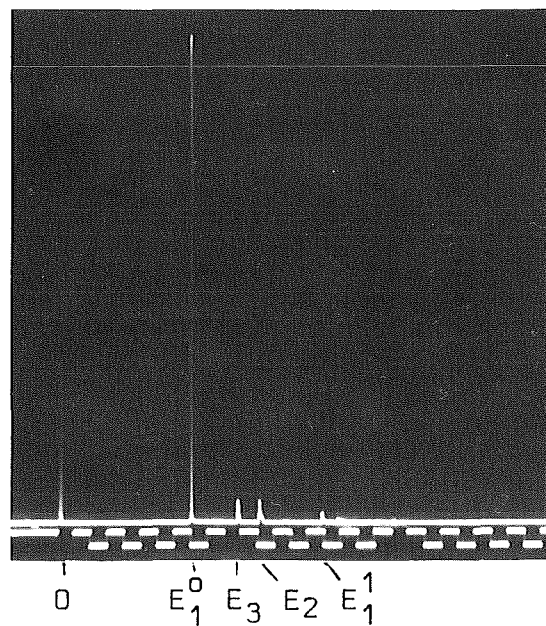


Bild 33: Echogramm einer zentralen Störungs-Ortung mit dem Hauptecho E_1^0 und dessen Doppelecho E_1^1 , sowie mit Bodenecho E_2 und Nachecho von der Wasseroberfläche E_3 . Unterer Bildrand: Elektronischer Maßstab mit 50 mm pro kleinster Teilung.

Der Verlauf der Echowege der zentralen Ortung der Störstelle (=Dummy) ist in Bild 34 schematisch wiedergegeben. Hierbei wurde die gleiche Weglänge x und die gleiche Wasserfüllstandshöhe w sowie dummies mit jeweils 205 mm Höhe über dem Boden des Testbeckens eingestellt bzw. angeordnet, so daß die Versuchsergebnisse der Messungen mit versetzter Ortung und zentraler Ortung verglichen werden können. Bild 35 gibt die Weg-Zeitverhältnisse wieder. Mit dem bekannten c -Wert lassen sich die oszillografisch gemessenen Echolaufzeiten wieder als Wegstrecken ausdrücken.

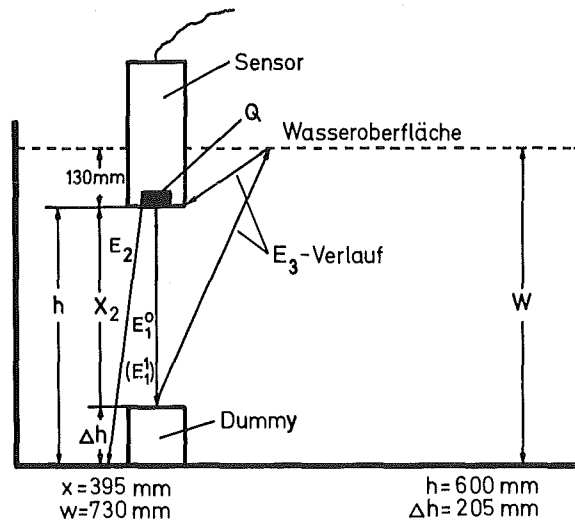


Bild 34: Echoverlauf zum Echogramm nach Bild 33.

E_1^0 = Hauptecho der Störung

E_1^1 = Doppelecho von E_1^0 mit doppelter Laufzeit

E_2 = Bodenecho

E_3 = Nebenecho von der Wasseroberfläche

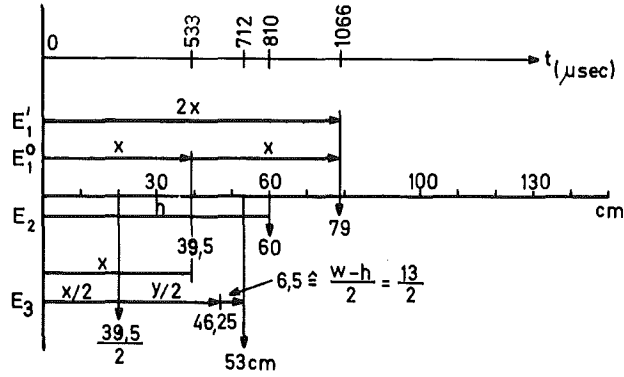


Bild 35: Weg-Zeit-Diagramm der Ultraschall-Echos bei einer zentralen Überlotung einer Störstelle nach Bild 34. Alle Laufzeit-Werte beziehen sich auf $c = 1481,0 \text{ m/sec}$ in entgastem Wasser bei $19 \text{ }^\circ\text{C}$.

Die Experimente haben gezeigt, daß sich die nach Gleichung 2 berechneten Schallfeldöffnungswinkel für die Halbwertsbreite für Barium-Titanat-Schwinger ohne Koppelstäbe in guter Übereinstimmung mit den gemessenen Werten befinden. Für SiO_2 -Wandler gilt dies nicht in jedem Falle. Die Abweichungen betragen bis zu 30 % und äußern sich in zu kleinen Öffnungswinkeln.

Am besten läßt sich die Halbwertsbreite angeben, wenn das Störecho und das von einer wenig tiefer liegenden Referenzfläche, z.B. vom ebenen Boden des Testbeckens stammende Nebenecho, gleich groß sind. Nach Bild 31 sind dann die beiden Echo-Flächen F_2 und F_3 äquivalent und stellen zwei Ortungsflächen mit einem gleich großen Schallimpulsdruck dar. Unabhängig von der Wellenform fordert der Energiesatz, daß die auf die Grenzfläche (Wasser:Stahl) anfallende Ultraschall-Intensität J gleich der Summe aus der durchgetretenen und reflektierten Intensität ist:

$$\frac{1}{2} \rho_1 c_1 u_{01}^2 = \frac{1}{2} \rho_1 c_1 u_{01}'^2 + \frac{1}{2} \rho_2 c_2 u_{02}^2 \quad (\text{Gl. 3})$$

Darin bedeutet u_0 die Schallschnelle einer Welle mit der Amplitude ξ_0 in der Beziehung $u_0 = w\xi_0$; weiterhin ist das Produkt aus Dichte und Schallausbreitungsgeschwindigkeit gleich dem akustischen Kennwiderstand $Z_a = \rho c$. Mit den Indizes 1 bzw. 2 werden die Medien Wasser und Stahl gekennzeichnet. Die Intensität J läßt sich nicht nur durch Frequenz, Amplitude und Phasengeschwindigkeit des ausklingenden Wellenzuges des Ultraschallimpulses beschreiben, sondern wird auch durch die Schallschnelle und durch die Druckamplitude beschrieben:

$$J = \frac{1}{2} \cdot \Delta p_0 \cdot u_0 = \frac{1}{2} \frac{(\Delta p_0)^2}{\rho \cdot c} \quad (\text{Gl. 4})$$

Die Echoflächen F_2 und F_3 erfahren also beim Auftreffen des Ortungs-Impulses einen einseitig wirkenden Schall-Strahlungsdruck. Für $F_2 = F_3$ ist dieser nur dann auf jeder der beiden Flächen gleichgroß, wenn sowohl Probestück als auch Beckenboden im vorliegenden Versuch aus einem Material mit dem gleichen $\rho \cdot c$ -Produkt bestehen.

Beim Verfahren des Ultraschallsensors in der x-y-Ebene wurden in der benutzten Testeinrichtung stets das Bodenecho E_2 , sowie das Rückecho E_3 von der Wasseroberfläche gemessen. Letzteres war jedoch bereits stark gedämpft und konnte über eine Diskriminatoreinrichtung unterdrückt werden. Im Falle einer BE-Positionierung würde E_3 von der Natrium-Oberfläche herrühren, wobei die Grenzfläche Na : Covergas einen vergleichbaren Reflexionsgrad für die Schallintensität aufweist wie der Übergang Wasser : Luft ($r_{\text{Na}/c} : r_{\text{W}/L} = 1 : 1,43$). Ein Bodenecho wird jedoch nicht erwartet, da E_2 aus dem Bereich der wesentlich tiefer liegenden Gitterplatten und Abstandshaltern stammen müßte. Wegen der erheblich längeren Laufzeit von E_2 reicht eine Zeit-Diskreminierung aus, um die unerwünschten Zusatzechos aus diesem Bereich zu unterdrücken.

Bild 36 zeigt das Echogramm einer nicht konzentrisch erfolgten Objektortung. Der Sensor erfaßt dabei nur 50 % der effektiven Echofläche der Störstelle, während sich die restlichen Echoimpulsintensitäten auf die Echoimpulse des Bodens und der Wasseroberfläche verteilen.

Das Verhältnis der Echointensitäten $E_1 : E_2$ ändert sich beim Durchfahren in der x-y-Ebene über der Störstelle. Der Winkel für die Halbwertsbreite ergibt sich dann aus der geometrischen Versetzung von Sensor und Störstelle, wenn - wie in Abbildung 36 ersichtlich - die Amplituden von E_1 und E_2 gleichgroß sind.

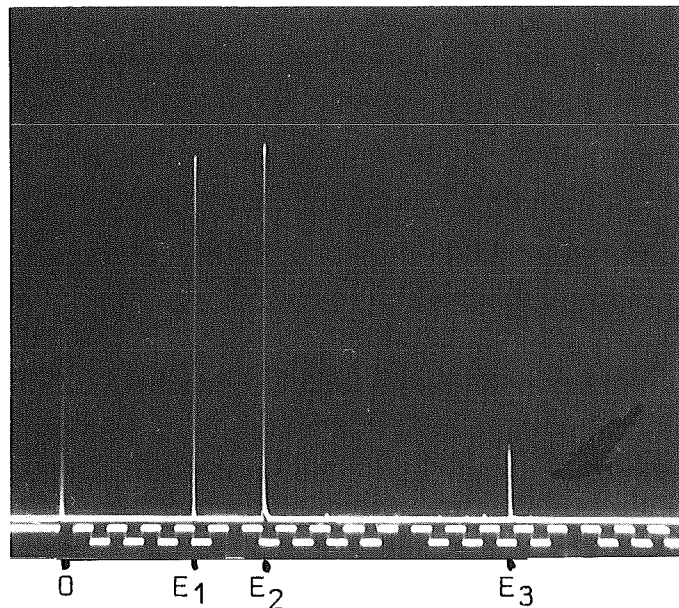


Bild 36: Echogramm einer Halbwertsbreiten-Impulsechobelastung. Die Störstelle wird im vorliegenden Falle nur zur Hälfte erfaßt. E_1 = Echo der Störstelle, E_2 = Bodenecho aus einer um 205 mm tiefer liegenden Ebene, E_3 = Wasseroberflächen-Echo, über den Boden reflektiert. Der mitgeschriebene Entfernungsmaßstab entspricht 50 mm für die kleinste Teilung. Amplitudenmaßstab = logarithmisch; das lineare Amplitudenverhältnis von $E_1 : E_3$ beträgt 25 : 1, d.h. E_3 erscheint um den Faktor 25 geschwächt.

Die in der nachstehenden Tabelle aufgeführten Halbwertsbreiten-Werte vergleichen die gerechneten Werte mit den gemessenen. Eine gute Übereinstimmung wurde gefunden:

Tabelle Schallöffnungs-Winkel $\alpha_{-6\text{db}}$ für die Halbwertsbreite mit $J_{\alpha} = 0,5 \cdot J_0$ in Wasser mit $T = 19 \text{ }^{\circ}\text{C}$ und $c = 1481 \text{ m/sec.}$ - Mittelwerte aus mehreren Messungen -

Errechnete Werte in Klammern () nach Gl. 2

f (MHz)	Scheibendurchmesser (geometrisch) der Wandler					
	10 Ø		15 Ø		20 Ø	
0,5	-	(10,4°)	8°	(7,2°)	-	(5,2°)
1	6°	(5,2°)	4°	(3,6°)	-	(2,6°)
2	3°	(2,6°)	2°	(1,8°)	-	(1,3°)
4	1,6°	(1,3°)	1°	(0,9°)	0,8°	(0,65°)
5	1,1°	(1,0°)	0,7°	(0,7°)	0,6°	(0,52°)
8	0,7°	(0,65°)	-	(0,45°)	-	(0,32°)
10	0,6°	(0,52°)	-	(0,36°)	-	(0,26°)

Alle Schallfeldmessungen gehen davon aus, daß die verwendeten Prüfköpfe mit runden Wandlern ein rotationssymmetrisches Schallbündel erzeugen. Durch axiales Drehen der Sensoren um 90° § konnte dies auch bestätigt werden. Die immer auftretenden Seiten-"patterns", Nebenzipfel des Hauptschallfeldes, die durch Interferenzen zustande kommen, hatten für den praktischen Einsatz der Sensoren keinen Einfluß.

Die Seiten- bzw. Rückstrahlungs-Dämpfung lag bei über 50 db, also bei weniger als 0,3 % der gemessenen Hauptimpuls-Intensität.

Abstandsortungen konnten auf ± 1 mm genau in Wasser und im Bereich $x = 20$ bis 2000 mm vorgenommen werden. Dabei ist es unerheblich, ob das Ortungsziel eine ebene Fläche oder eine sphärische Geometrie der Oberfläche aufweist. Es konnten im Abstand bis zu 2000 mm dünne Drähte mit 0,4 mm \varnothing sicher geortet werden. Hierzu zählen auch dünnwandige Rohre, z.B. 1 $\varnothing \times 0,1$ mm. Kleine Metallkugeln, die an Fäden befestigt waren, konnten bis herab auf 1 mm Durchmesser mit 20 db über dem Rauschen auf eine Entfernung von 2 m lagebestimmt werden. Die Resonanzfrequenzen der dabei eingesetzten Ultraschallsensoren lagen zwischen 2 und 5 MHz und zeigten nur wenig Unterschiede bezüglich ihrer Ortungsempfindlichkeit. Bei der Impuls-Ortung von VA-Rohren konnte aufgrund der Mehrfachechos an der dem Sensor zugewandten Oberfläche des Rohres und der Rohrrückwand durch den Laufzeitunterschied der beiden Echos der Durchmesser des Rohres bestimmt werden. Gleichzeitig bilden sich zusätzliche Echos im Wandmaterial des Rohres aus, die es gestatten, die Wandstärke des Rohres anzugeben. Bild 37 zeigt eine Anordnung mit drei versetzt angeordneten und verschieden dicken Rohren, die als Störstellen dienen. Der Sensor wurde auf die Hauptstörstelle S_0 gerichtet. Dabei entstand das in Bild 38 wiedergegebene Oszillogramm: Das Hauptecho E_1 der Störung S_0 tritt mit der höchsten Intensität auf. Gleichzeitig - jedoch geschwächt - erscheint das Rückwandecho E_3 , da S_0 die Wand des Tanks nicht voll abdeckt. Der mitgeschriebene Wegmaßstab mit der Teilung 50 mm/Einheit gibt die Entfernungen von S_0 mit 450 mm bzw. der Rückwand mit $L=1860$ mm wieder. Eine auf einige Millimeter genaue Bestimmung ist über eine elektronische Bildlupe möglich, die eine Bildspreizung bis auf

das 50-fache erlaubt. Der Wegmaßstab kann ebenfalls im Verhältnis 10 : 1 unterteilt werden. Das Oszillogramm zeigt einen Zweitimpuls E_2 nach dem Hauptecho E_1 . Hierbei handelt es sich um das vom Sensor abgewandte Wandecho des Rohres S_0 . Über die Weg-Eichung wird eine Rohrstärke von 55 mm abgelesen, die mit dem tatsächlichen Rohrdurchmesser übereinstimmt. Schließlich wird die Wandstärke des Rohres aus den Nebenechos in E_1 oder E_2 ermittelt. Hierzu ist im vorliegenden Beispiel E_2 elektronisch gespreizt und die Verstärkung entsprechend erhöht worden. Bild 39 zeigt das Oszillogramm des um den Faktor 6 gedehnten Impuls-Echo-Zugs von E_2 . Die abgebildeten Vielfachimpulse stellen die Vielfachen des Wand-Dicken-Echos dar. Hierzu ist zur Ermittlung der Wandstärke eine Korrektur des Wegmaßstabs vorzunehmen, da dieser für $c = 1481 \text{ m/sec} \hat{=} \text{Wasser}$ eingestellt war. Mit $c_w = 5840 \text{ m/sec}$ in Stahl ist der Maßstab im Verhältnis $\frac{5840}{1480} = 3,94$ für Stahl (W.St 4571) zu multiplizieren. Es werden 11 Wand-Echos ausgezählt, die in einem Zeit-Intervall auftreten, in dem ein Echoimpuls in Wasser 10 mm zurücklegt. Es folgt daher mit

$$t = \frac{x}{c} = \frac{10 \text{ mm}}{1481 \cdot 10^3 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}} = 6,75 \text{ } \mu\text{sec}$$

Laufzeit in Wasser für 10 mm Weg. Somit für die Laufzeit t_w eines Echos in der Rohrwand w:

$$t_w = \frac{w}{c_w} = \frac{1}{11} \cdot 6,75 = 0,614 \text{ } \mu\text{sec}$$

und mit $c_w = 5840 \text{ m/sec}$ folgt für die Wandstärke w:

$$w = t_w \cdot c_w = 0,614 \cdot 10^{-6} \cdot 5840 = 3,5 \text{ mm Wand-}$$

stärke.

Die Messungen des Schallfeld-Öffnungswinkels und die Ermittlung der Detektionsempfindlichkeit des Ultraschall-Ortungsverfahrens wurden in einem Wassermodell durchgeführt. Die in einem Versuchstank zur Verfügung stehende maximale Wegstrecke von 2 m entspricht hinsichtlich der Echolaufzeit des Ultraschall-Impulses und unter der Berücksichtigung der unterschiedlichen Schallausbreitungsgeschwindigkeiten von Wasser und Natrium einem Ortungsweg von etwa 3,4 m in Natrium.

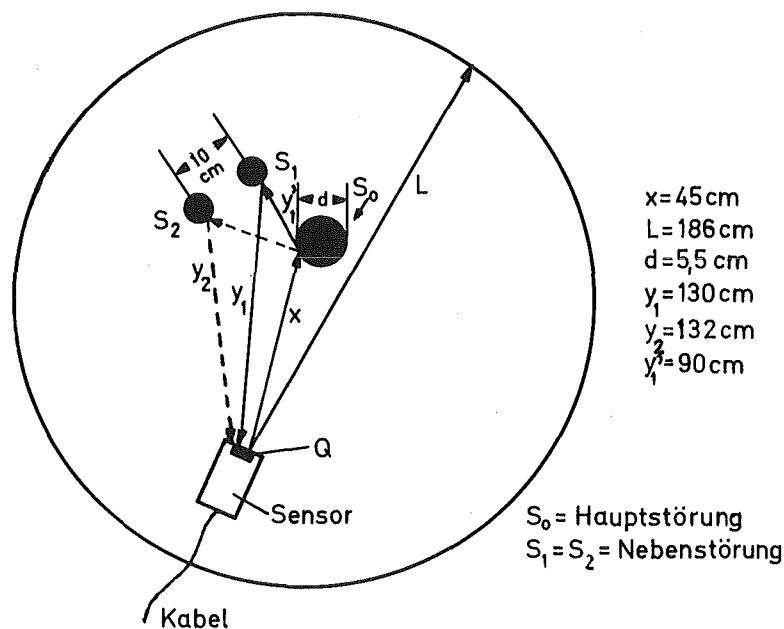


Bild 37: Schematische Darstellung einer Ultraschall-Tastarmsimulation mit mehreren Störungen S₀..S₂.

Als Ortungsziele wurden VA-Rohre mit verschiedenen Außendurchmessern und Wandstärken sowie Vollstäbe aus Edelstahl in den Ortungsraum eingebracht. Die dünnsten, noch ortungsfähigen Ziele bestanden aus 0,4 mm starken Metalldrähten, die aus einer Entfernung von 1,9 m noch sicher detektiert werden konnten. Dabei wurden mehrere Sensoren mit Betriebsfrequenzen zwischen 0,8 und 15 MHz getestet und die jeweiligen Schallfeldöffnungswinkel ermittelt.

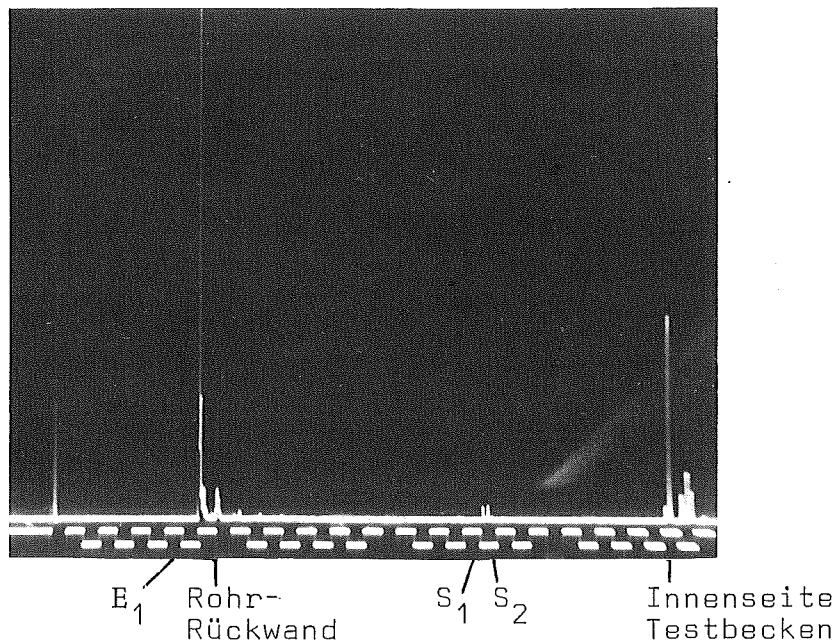


Bild 38: Echogramm einer Anordnung von Störstellen nach Abb. 37. Der erste Hauptechoimpuls E_1 stammt von der nahezu zentral georteten Störstelle S_0 . Es folgt unmittelbar rechts davon das Rohr-Rückwand-echo des 55 mm dicken Rohres. Der rechts im Bild hohe Impuls stammt von der Innenseite des Testbeckens. Zusätzlich treten Scatter-Echos zwischen der Störstelle S_0 und der Innenseite des Testbeckens auf (ganz rechts im Bild). Weiterhin beobachtet man zwei kleine, dicht beieinander liegende Nebenechos. Sie stammen von den zusätzlich vorhandenen Störstellen S_1 und S_2 im Abstand von 1300 bzw. 1320 mm vom Sensor und geben Aufschluß darüber, wie gut die räumliche Winkelauflösung dicht beieinander angeordneter Störstellen ist. Ein mitgeschriebener Weg-Maßstab dient als Referenz für die Bestimmung der Abstände der georteten Störungen vom Sensor.

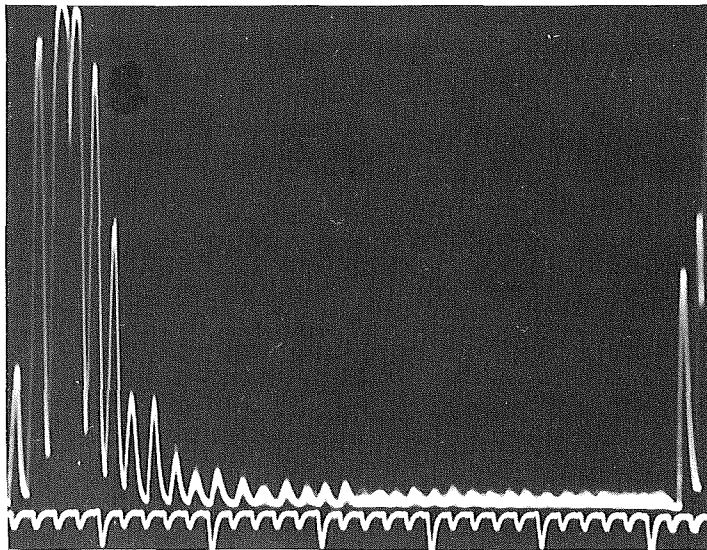


Bild 39: Ausschnittsvergrößerung des gedehnt dargestellten Rohr-Rückwandechos E_2 , das eine Vielzahl von Nebenechos in der Rohrwand selbst enthält. Der mitgeschriebene Weg-Maßstab entspricht für Wasser 1 mm für die kleinste Teilung, bzw. 3,94 mm für Stahl mit $c = 5840$ m/s. Zur Bestimmung der Wandstärke werden wenigstens 10 Echos ausgezählt und mit dem entsprechenden Wegmaßstab referiert.

Von großem Vorteil ist hierbei eine elektronische Lupe, die es gestattet Einzelabschnitte des Echogramms gespreizt darzustellen. Der Weg-Maßstab kann ebenfalls gedehnt abgebildet werden, so daß selbst bei Echowegen von einigen Metern Störstellen mit Ausdehnungen von 5 mm dargestellt werden können. Zu einer verbesserten Auflösung von Echoimpulsen verhilft die Wahl einer höheren Ultraschall-Frequenz. Die jedoch mit dem Quadrat der Frequenz zunehmende Schallwellen-Absorption setzt der Wahl einer möglichst hohen Arbeitsfrequenz Grenzen.

8. Übergang an Grenzflächen

Zu den wesentlichen störenden Einflüssen zählen Inhomogenitäten des Wellenleiters. Während in metallischen Werkstoffen (Koppelstange, Membrane, Diaphragma) Strukturübergänge an Korngrenzen oder an Mosaikflächen den Ultraschallimpuls streuen und dämpfen, sind es in flüssigen Medien Verunreinigungen, Zwei-Phasen-Zustände (z.B. Wasser/Luft) und Temperatur-Verschichtungen, die die Genauigkeit der Ortung bestimmen.

Unabhängig von der Wellenart gilt das Snellius'sche Brechungsgesetz an Grenzflächen:

$$\frac{\sin\alpha'}{\sin\beta'} = \frac{c_1}{c_2} \quad (\text{Gl. 5})$$

worin α' der Einfallswinkel der zentralen Schallfeldachse zum Lot auf der Grenzfläche und β' den Austrittswinkel in das Medium mit der Schallausbreitungskonstanten c_2 bedeuten. Bild 40 zeigt den Verlauf einer Longitudinalwelle L_0 , den Übergang R vom Medium 1 mit der Phase c_1 , ρ_1 , T_1 in die Phase 2 mit den Kenngrößen c_2 , ρ_2 und T_2 unter dem Winkel β' . Gleichzeitig erfolgt eine Reflexion in Richtung L_0' . Die Winkelabweichung des Wellenverlaufs L_1 vom L_0 beträgt $\Delta\phi = \alpha' - \beta'$.

Die Koeffizienten c_1 und c_2 sind die Schallausbreitungsgeschwindigkeiten longitudinaler Wellen der beiden Flüssigmedien. Eine Grenzfläche in einem einzigen Medium bildet sich insbesondere dann aus, wenn unterschiedliche Temperaturen ($T_1 \neq T_2$), z. B. in Temperaturschlieren oder Verschichtungen vorliegen. Diese Verhältnisse werden im folgenden für das Medium Natrium näher betrachtet und in den Abbildungen 40 bis 42 veranschaulicht.

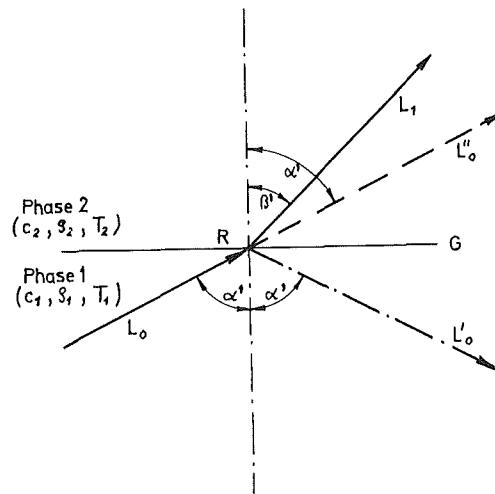


Bild 40: Übergang einer Longitudinalwelle an einer Grenzfläche, die durch die Verschichtung von Flüssignatrium mit unterschiedlichen Temperaturen entsteht.

Zur Bestimmung der Winkelabweichung $\Delta\phi$ und des Reflexionsfaktors m bei verschichtetem Flüssignatrium mit den Phasentemperaturen T_1 und T_2 sind die temperaturabhängigen c - und ρ -Größen zu berücksichtigen. Für Natrium gilt:

$$c(t) = 2577,250 - 0,524T \quad \text{m/s} \quad (\text{Gl. 6})$$

$$\rho(t) = 0,949 - 223 \cdot 10^{-6}T - 17,5 \cdot 10^{-9}T^2 \quad (\text{g/cm}^3) \quad (\text{Gl. 7})$$

Eingesetzt in Gl. 5 folgt allgemein:

$$\frac{\sin\alpha'}{\sin\beta'} = \frac{2577,250 - 0,524 \cdot T_1}{2577,250 - 0,524 \cdot T_2} \quad (\text{Gl. 8})$$

und für die Intensität der reflektierten Welle L'_0 :

$$J_{\text{Refl.}} = J_0 \frac{\left(m \frac{\cos\beta'}{\cos\alpha'} - 1\right)^2}{\left(m \frac{\cos\beta'}{\cos\alpha'} + 1\right)^2} \quad (\text{Gl. 9})$$

Hierin bedeuten $m = \frac{c_1 \rho_1}{c_2 \rho_2}$ = Reflexionsfaktor und

J_0 = die Intensität der Welle L_0 .

Mit den bekannten Werten aus Gl. 6 und 7 erhält man in Gl. 9 eingesetzt:

$$J_{\text{Ref1.}} = J_0 \cdot \left[\frac{2577,50 - 0,524 \cdot T_1}{0,929 - 223 \cdot 10^{-6} T_1 - 17,5 \cdot 10^{-9} T_1^2} \cdot \frac{\cos \beta'}{\cos \alpha'} - 1 \right]^2 \quad (\text{Gl. 10})$$

$$\left[\frac{2577,250 - 0,524 \cdot T_2}{0,929 - 223 \cdot 10^{-6} T_2 - 17,5 \cdot 10^{-9} T_2^2} \cdot \frac{\cos \beta'}{\cos \alpha} - 1 \right]^2$$

Für die Bestimmung der Winkelabweichung $\Delta\phi$ wird zunächst angenommen, daß eine Phasengrenze vorliegt. Weiterhin soll der ungünstigste Fall einer extremen Flacheinstrahlung mit $\alpha' = 89^\circ$ angenommen werden, da dieser Wert gut mit dem Schallöffnungswinkel von etwa $\phi = 1^\circ$ übereinstimmt ($\alpha' = 90^\circ - \Delta\phi$). Schließlich wird ein Temperaturunterschied von $\Delta T = T_2 - T_1 = 1^\circ\text{C}$ angenommen. Bei einer Natrium-Temperatur $T_1 = 400^\circ\text{C}$ ergibt sich nach Gl. 8:

$$\beta' = 88,43^\circ$$

und für die Winkelabweichung $\Delta\phi = \alpha' - \beta'$

$$\Delta\phi = 0,57^\circ$$

Bei einer Ortungsweglänge von 3,8 m - dies entspricht der maximalen Ortungstiefe bei der Plenum-Abtastung im SNR 300 - erhält man einen Fehler von $\Delta z = 37,8$ mm in Form einer azimutalen Versetzung des zentralen Hauptschall-Strahls. In der Regel sind derartige Fehler ohne Bedeutung, da ein Schallöffnungswinkel von $1,5^\circ$ bei $L_0 = 3,8$ m bereits eine Ortungsbreite in z-Richtung von 100 mm bewirkt. Für die Lagebestimmung (Bild 41) des georteten Ziels werden die Laufzeit von L_2 und der räumliche Drehwinkel ω gemessen. Der Fehler Δx bei der Abstandsbestimmung wird aus der Laufzeitdifferenz Δt von Δx sehr einfach ermittelt:

$$\Delta t = \frac{\Delta x}{c_2} = \frac{L_2 - L_0}{c_2} = \frac{0,188 \text{ mm}}{2367,126 \cdot 10^3 \text{ mm} \cdot 5^{-1}} = 0,079 \text{ } \mu\text{sec.}$$

Mit den heute verfügbaren Impulsecho-Geräten läßt sich ein Laufzeitunterschied in dieser Größenordnung nicht mehr auflösen. Der Fehler bei der Entfernungsbestimmung - bezogen auf die Gesamtlänge von 3800 mm - beträgt 0,188 mm und ist vernachlässigbar.

Die oben aufgeführten Ergebnisse beruhen auf einer vereinfachten Annahme. In der Regel werden Temperaturgradienten bis zu 5 °C in einer Verschichtung von Flüssignatrium erwartet, Auch unter diesen Bedingungen erhält man Fehler von $\Delta x_{\max} = 2,2$ mm bei der Lagebestimmung in radialer Richtung. Der rechnerische Gesamtfehler beläuft sich somit auf $\frac{\Delta x}{L_0} = 0,058$ %.

In der Praxis werden Fehler von etwa 1 % gemessen.

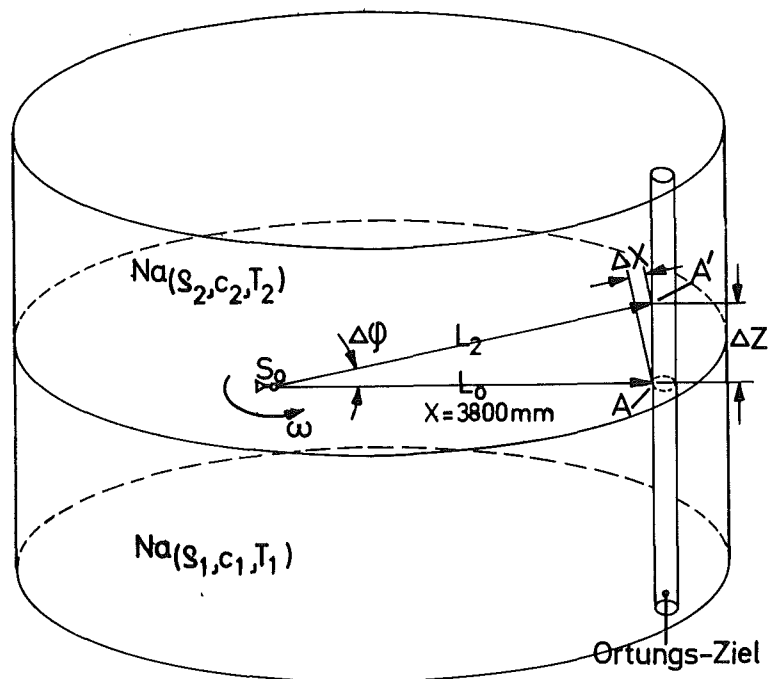


Bild 41: Fehllortung bei Schrägeinfall der Ultraschall-Wellenfront an einer Grenzfläche mit Natrium unterschied-

licher Temperatur. Das Ziel wird nicht an der Stelle A getroffen, sondern bei A' mit einer Versetzung Δz geortet. Zur Fehlerabschätzung wurden die geometrischen Verhältnisse des SNR-300-Tanks zugrunde gelegt. S_0 = Ultraschall-Sensor.

Liegen Temperaturschlieren nach Bild 42 vor, die im Beispiel durch sieben Phasen mit den Zustandsgrößen c_n , ρ_n und T_n gekennzeichnet sind, und setzt man voraus, daß die Phase 0 mit der Phase 6 identisch sei, so breitet sich eine Ultraschall-Impulswelle nach den bekannten Gesetzen der Brechung bei Schrägeinfall auf die Phasengrenze bei R_1 wie gezeigt aus. Es resultiert eine Versetzung Δz , die wiederum den Ortungsfehler in z-Richtung bestimmt. Es werden im Vergleich zum vorigen Beispiel (Bild 40 und 41) bei Ortungslängen von 3800 mm erheblich kleinere Fehler gemessen. Diese liegen bezüglich der Δz -Versetzung bei etwa der Hälfte des Schlierenfeld-Durchmessers $\Delta z \approx \frac{1}{2} \Delta s$ und bewirken Laufzeitdifferenzen von wenigen Nanosekunden, die nicht mehr meßbar sind.

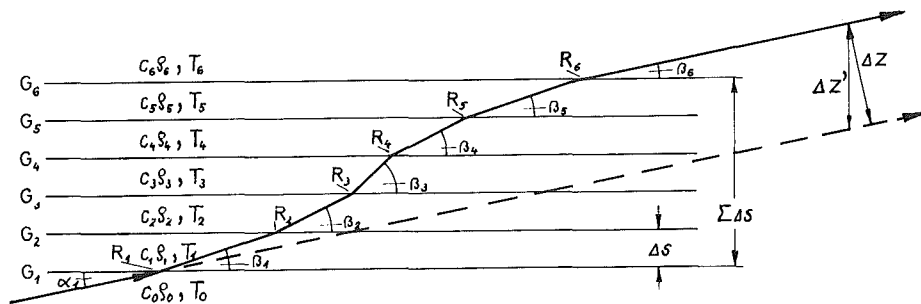


Bild 42: Ultraschallwellen werden beim Schrägeinfall auf Flüssigmetall-Grenzflächen mit unterschiedlichen Temperaturen (Schlieren) abgelenkt und bewirken einen Ortungsfehler, der einer geometrischen Versetzung Δz entspricht.

Eine Abschätzung der Reflexionsverluste beim Übergang an einer Grenzfläche mit $\Delta T = 1 \text{ }^\circ\text{C}$ nach Gl. 10 ergibt bei einem Schrägeinfall der Welle mit $\alpha' = 89^\circ$ \ddagger

$$J_{\text{Refl.}} \approx 5,4 \cdot 10^{-4} \cdot J_0$$

Die Intensitätsverluste durch die Reflexionen an den Grenzschichten fallen gegenüber der reinen Streckendämpfung nicht ins Gewicht. Über die frequenzabhängige Dämpfung einer Ultraschall-Natrium-Teststrecke wurde bereits in (2) berichtet. Nach (1) erfährt eine 5 MHz-Schallwelle eine Dämpfung von $-10\text{db}/0,1\text{m}$ bei $400 \text{ }^\circ\text{C}$. Da bei einer Fernortung einfache Wege bis zu $3,8 \text{ m}$ in Betracht zu ziehen sind, erfährt die Impuls-Intensität eine Abschwächung von über 40 db ($J_{3,8\text{m}} = 0,01 \cdot J_0$), und für ein Echo - Streuverluste und Anteil der in das Ortungsobjekt eingetretenen Intensität nicht mitgerechnet - wenigstens 46 db Streckendämpfung. In Wasser wurden bei 2 m Ortungslänge Dämpfungswerte um 50 db gemessen. Dieses Ergebnis liegt um das $1,7$ -fache über dem theoretischen Wert.

9. Schlußfolgerungen

Der vorliegenden Bericht zeigt, daß die in einem Wasser-Modell erreichten Meß-Ergebnisse die in die Ultraschallmeßverfahren in Natrium gesetzten Erwartungen an Ortungsgenauigkeit und Interpretation der Meßwerte erfüllen. Voraussetzung ist der Einsatz von sog. "Direkt-Sensoren" mit einer ausreichenden Standzeit bezüglich Temperatur und Strahlenbelastung. Derartige Ultraschall-Sensoren sind in Arbeit, Prototyp-Sensoren mit Lithium-Niobat-Kristallen wurden im Institut für Reaktorentwicklung bereits unter Natrium Bedingungen getestet. Spezielle Lötverfahren zur Kontaktierung der Piezo-Kristalle wurden angewendet und

werden weiter verfolgt, da mit Hochtemperatur-Klebern und Zementen keine befriedigenden Ergebnisse erzielt werden konnten. Die Kontakt-Anpreßmethode wird hierzu parallel verfolgt.

Erfahrungen mit Koppelstangen zeigen, daß diese wegen der auftretenden Vielfachechos nach Mod-Umwandlungen nur in eng begrenzten Geometrien eingesetzt werden können. Sie bieten jedoch für die niederfrequenten Ultraschall-continuous-wave (cw)-Verfahren eine gute Temperaturkopplung und arbeiten mit verrippten Oberflächen zufriedenstellend.

10. Anhang

10.1 Echogramme mit Koppelstäben

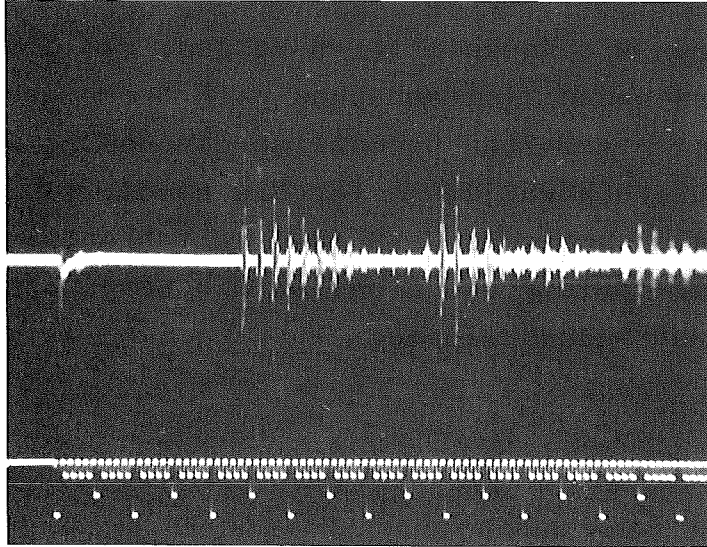


Bild 43: Vielfach-Echos in einem Koppelstab WSt. 4571
mit den Maßen $L = 236 \text{ mm}$, $D = 25 \text{ mm } \emptyset$
Weg-Maßstab $\hat{=} 200 \text{ mm / große Teilung}$
Wandler: Polykristalliner Piezoxid-Wandler
 $f_0 = 4 \text{ MHz}$
PXE 5/VALVO
Die Nebenechos (= "trailing pulses") erscheinen
in äquidistanten Abständen entsprechend $6,47 \text{ } \mu\text{sec}$
Zeitintervallen.

Für den gleichen Koppelstab wurde das erste Hauptecho mit
seinen Nachechos aus Bild 43 als Ausschnittsvergrößerung
in Bild 44 aufgenommen:

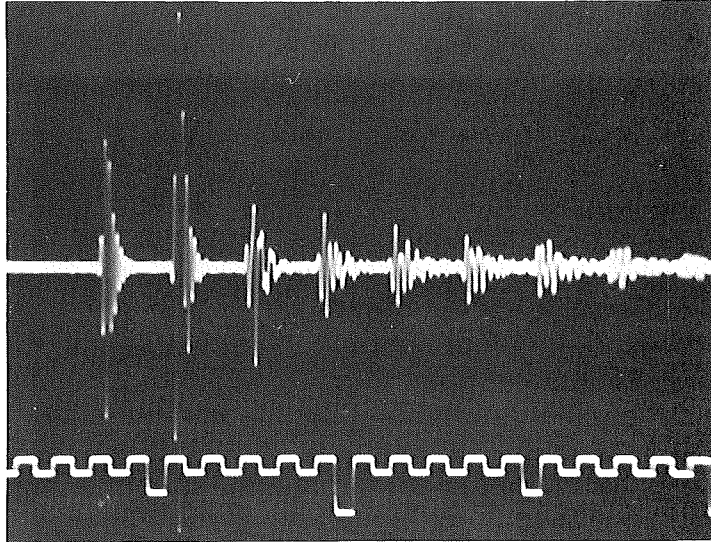


Bild 44: Vergrößerter erster Hauptimpuls-Echo-Zug aus Bild 43. Die schnell abklingenden Eigenschwingungen des 4-MHz-Ultraschall-Wandlers sind hier bereits deutlich zu erkennen.

Eine Vielzahl von Haupt- und Nach-Echos höherer Ordnung wird bei glatten Koppelstäben erreicht. Bestehen diese aus guten Schallmaterialien, wie z.B. aus Aluminium 99,5 %, so erhält man ein Echogramm nach Bild 45. Betrag und Phase der Einzelimpulse bestimmen die Interferenzfelder und ergeben mit zunehmender Laufzeit ein nur noch "verwaschenes" Bild.

Für die Vielzahl der beobachteten Reflexionen gibt es zwei Gründe: Die Schallabsorption in Aluminium beträgt nur etwa ein Fünftel im Vergleich zu den ebenfalls untersuchten und geometrisch vergleichbaren austenitischen Edelstählen. Die Schallhärten von Aluminium und Piezo-Material unterscheiden sich kaum, so daß ein Leistungsübergang an der Grenzfläche der beiden Materialien ohne nennenswerte Reflexionsverluste möglich ist. Aluminium-Koppelstäbe eignen sich daher vorzüglich für alle akustischen Transducer, an die keine Anforderungen hinsichtlich der Temperaturverträglichkeit, der Verschweißbarkeit mit Edelstahl oder der Verträglichkeit mit Natrium gestellt werden.

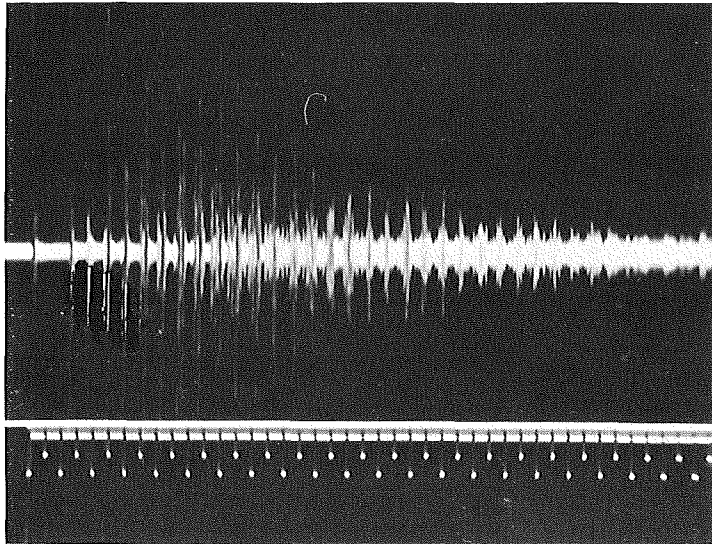


Bild 45: Koppelstab-Vielfachechos eines Aluminium-Koppeltransducers $L = 120$ mm, $D = 60$ mm. Die Ultraschalldämpfung beträgt nur etwa 20 % vom vergleichbaren VA-Koppelstab. Quarz: 2 MHz-Eigenresonanz, PXE-5-Material.

Werden zwei getrennte Koppelstäbe benutzt, die axial aufeinander ausgerichtet sind und in ihrer Mitte eine Natrium-Teststrecke einschließen, so überlagern sich die Nachechos im Empfängerkoppelstab nach Bild 46. In diesem Beispiel wurde der 1. Stab als Empfängertransducer eingesetzt. Beide Koppelstäbe besitzen Ultraschallwandler mit gleicher Resonanzfrequenz $f_0 = 5$ MHz. Eine derartige Anordnung wurde u. a. für die Ultraschallblasendetektion verwendet, die nach dem kontinuierlichen Durchschallungsprinzip arbeitete /3/. Die beim Impulsecho-Verfahren auftretenden Interferenzen der Vielfachechos machen jedoch den Einsatz eines Zwei-Stab-Transducers in dieser Form ungeeignet.

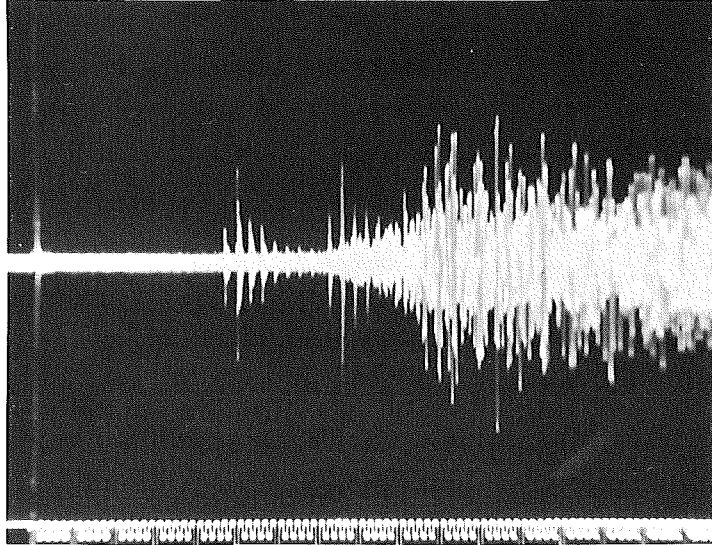


Bild 46: Überlagerung der Vielfach-Nachechos aus zwei getrennten Koppelstäben (1 x Sender + 1 x Empfänger-Stab). Der im Bild gut erkennbare erste Impulszug stammt aus dem Senderkoppelstab, danach folgt das Echo aus dem Natrium-Raum = Anfang des axial ausgerichteten Empfängerstabes (Bildmitte), schließlich überlagern die Vielfach-Nebenechos das Empfängerkoppelstabecho 1. Ordnung, das als höchster Impuls (2. Bild-drittel) gerade noch erkennbar ist.

Der Einfluß von Verrippungen auf die Vielfach-Nebenechos wird auch bei wenig tiefen Rippen, wie z.B. bei metrischen Gewinden mit Einstichwinkeln von 60° § in den Bildern 47 und 48 deutlich:

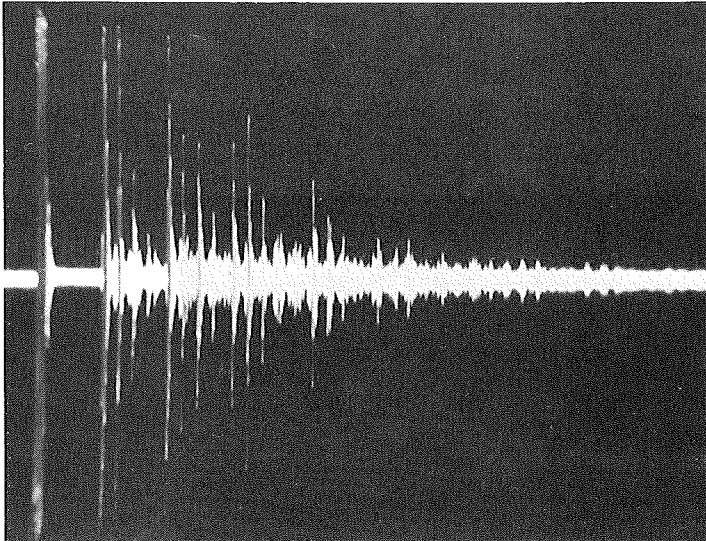


Bild 47:

Echogramm einer glattwandigen Koppelstange mit den Abmessungen $L = 500 \text{ mm}$, $D = 40 \text{ mm } \varnothing$. Neben dem Hauptecho treten unmittelbar gefolgt eine Vielzahl von Nebenechos im Abstand von $10,36 \text{ } \mu\text{sec}$ auf, die teilweise - bedingt durch ihre Phasenlage - mit den Hauptechos höherer Ordnung interferieren.

Resonanzfrequenz des Wandlers = 4 MHz

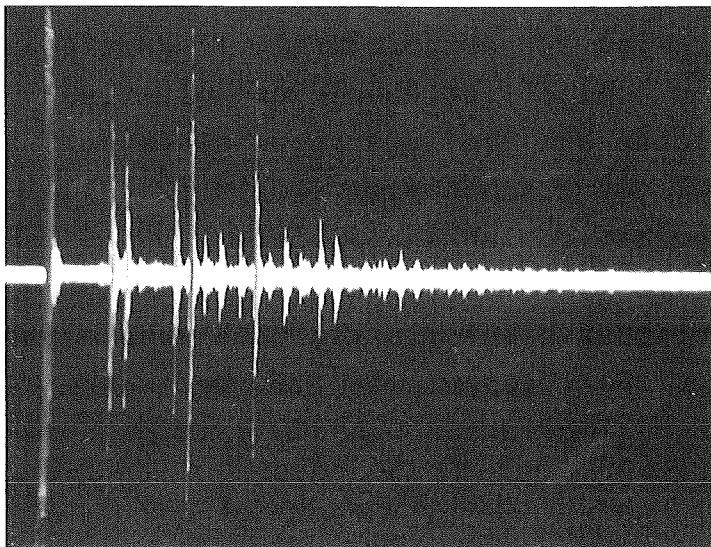


Bild 48:

Wie Bild 47, jedoch Koppelstab mit Gewindeoberfläche $M40 \times 1,5$ - Feingewinde.

Bei gleicher Verstärkungseinstellung treten bereits sichtbar weniger Echos höherer Ordnung auf.

Wie sehr Vielfachechos stören und die Interpretation des Ergebnisses erschweren, zeigen die folgenden Bilder 49 und 50. Ein Koppelstab von 850 mm Länge und 25 mm \emptyset wird in einem Wasserversuch verschieden tief über dem Meßobjekt positioniert: Nur solange die Laufzeit des Echoimpulses nicht in den Laufzeitbereich des 1. und 2. Koppelstabechos fällt, tritt ein meßbares Echo auf. Dabei ist das Intensitätsverhältnis der Stabeigen-Echos zum Meßecho extrem hoch, da der Phasenübergang Stahl : Wasser (2-mal !) mit $m = \frac{c_1 \rho_1}{c_2 \rho_2} = 33$ eine Reflexion von 94 % im metallischen Werkstoff bewirkt. Nur 6 % der Intensität J_0 werden vom Wasser übernommen. Da das Echo aus dem Wasserbereich jedoch ein zweitesmal die Phasengrenzfläche durchtritt, erhält man nur noch ca 3 % Echointensität vom Objekt selbst.

Die Echogramme in den folgenden Bildern wurden wegen des ungleichen Verhältnisses der einzelnen Echointensitäten in einer Darstellung gewählt, die es gestattet, nach einer elektronischen Gleichrichtung und teilweisen Siebung der Impulszeitfunktionen eine Begrenzung der Stabechos vorzunehmen und kleinere Amplituden höher zu verstärken.

In dieser Art der Bilddarstellung fehlen die hochfrequenten Schwingungen des Transducers, so daß eine klare Bildaussage möglich ist. Die abgebildeten Impulse stellen nach Gleichrichtung der Echosignale die Umhüllenden dieser Impulse dar.

Die Möglichkeiten der Signalaufbereitung erlauben das Rauschen weitgehend zu unterdrücken und den Bildinhalt von Störeinflüssen frei zu halten, wie dies ein Vergleich der Abbildungen 53 und 54 zeigt.

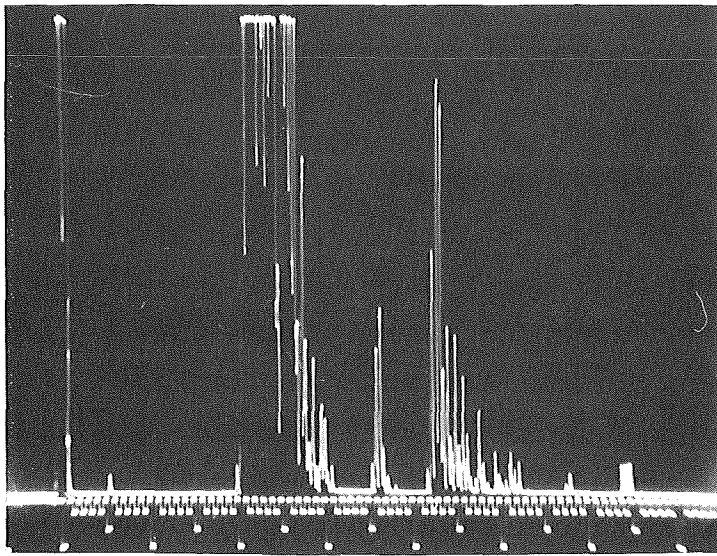


Bild 49:

Das Echogramm zeigt in Bildmitte den weniger als halbhohen Echoimpuls eines georteten Objekts in 150 mm Wassertiefe, links davon: 1. Hauptecho des Koppelstabes, rechts davon: 2. Hauptecho des Koppelstabes. In beiden Fällen erscheinen viele Nebenechos im Abstand von $6,47 \mu\text{sec}$. Ein drittes Hauptecho ist ganz rechts im Bild gerade noch auszumachen. Als Wegreferenz dient nun der Abstand von Beginn des Hauptechos des Stabes bis zum eigentlichen Echo des Objekts. In diesem Fall werden $x = 150 \text{ mm}$ abgelesen (kleinste Teilung $\cong 10 \text{ mm}$). Wandlerresonanz = $4,5 \text{ MHz}$.

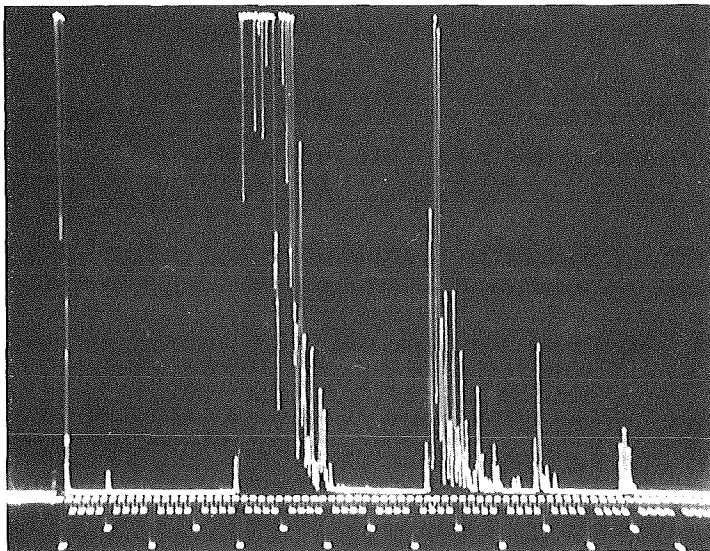


Bild 50: Gleiche Verhältnisse wie bei Bild 49, jedoch beträgt der Abstand der Unterkante des Koppelstabes

zum georteten Objekt $x = 340$ mm. Das Meßecho vom Objekt hat beim Ziehen des Koppelstabes von $x = 150$ auf 340 mm den 2. Hauptechobereich nach rechts durchlaufen und erscheint nun als zweiter Impuls von rechts.

Die vorstehenden Echogramme machen deutlich, daß im Bereich $x = 0$ bis 100 mm, sowie $x = 210$ bis 300 mm keine Ortung möglich ist. Damit erfährt die Anwendung des Koppeltransducerverfahrens eine empfindliche Einschränkung und kann nur innerhalb abgegrenzter und vorbestimmter Ortungstiefen eingesetzt werden.

Bild 51 zeigt in einer Gegenüberstellung einen "Direkt"-Sensor (oben) und eine 850 mm lange Koppelstange mit einer teilweisen Oberflächenverrippung (unten).

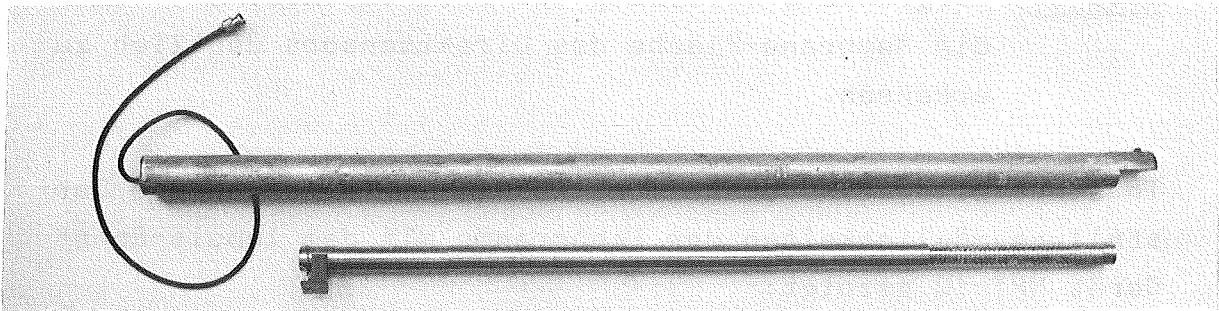


Bild 51:

Direktsensor (oben) und Koppelstransducer bestehend aus Wandler und Koppelstange (unten). Der Direktsensor benutzt einen Piezowandler auf der Innenseite der ebenen Einstich-Fläche (rechts oben) und das Rohr als Schutzhülle für Kabel und Sensor. Mit Hilfe des Direktsensors wurden die Echogramme der Bilder 23, 27, 29, 33 u.f.erzielt. Diese sind frei von Nebenechos (trailing-pulses) und machen die Vorteile des Direktsensors gegenüber dem Koppelstab-Prinzip deutlich.

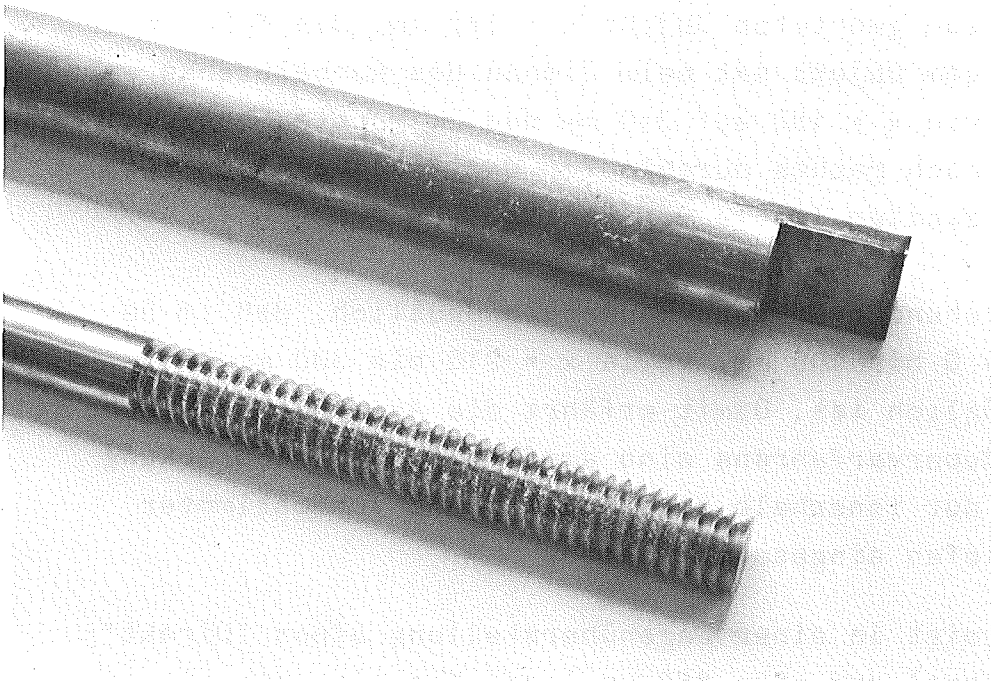


Bild 52: Vergrößerte Abbildung von Bild 51. Hier ist (oben) die Membrane-Fläche des Direktsensors deutlich zu erkennen.

In einer Bildgegenüberstellung werden im folgenden die Darstellungsmöglichkeiten der Echogramme mit dem Impuls-Echo-Gerät MPT-10 gezeigt:

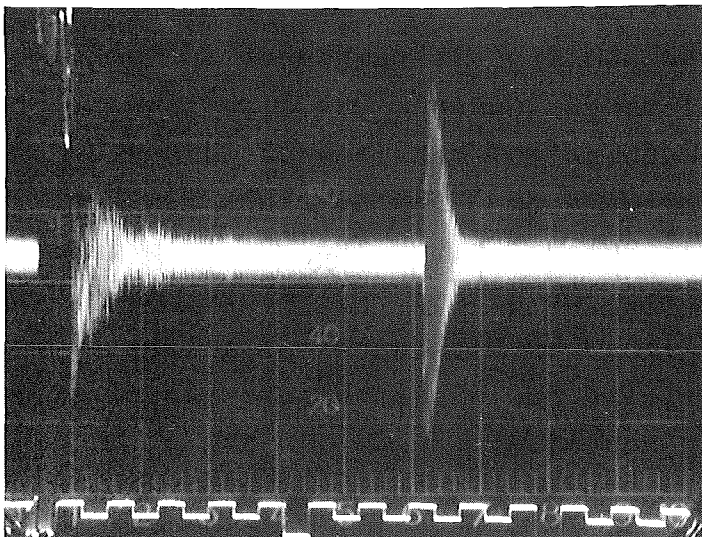


Bild 53: Ein Echoimpuls, aufgenommen mit einem Lithium-

Niobat-Kristall $f_0 = 6,33$ MHz aus 75 mm Objektentfernung. Die Darstellung erfolgt ungesiebt, der Impuls-Untergrund ist nicht unterdrückt, als breites "Band" erscheint das weiße Rauschen mit dem Störuntergrund.

Das Impulsechogerät kann in mehreren Stufen nach erfolgter Gleichrichtung elektronisch sieben. Hierbei werden durch eine Zusatzeinrichtung die hochfrequenten Siebreste unterdrückt. Das Rauschen, sowie der Störuntergrund werden diskriminiert, so daß eine Darstellung nach Bild 54 möglich ist.

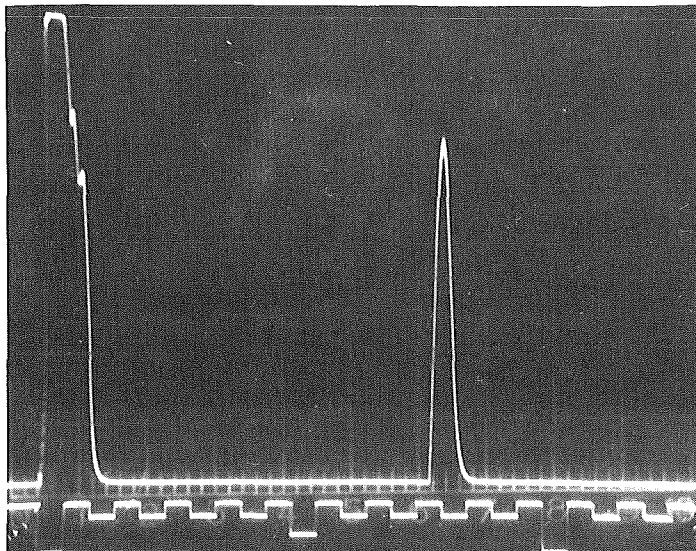


Bild 54: Gleichrichtung, Siebung und Diskriminierung des Störuntergrundes ermöglichen eine einfache und sichere Auswertung des Echogramms. Die Bilder 53 und 54 stammen aus dem gleichen Versuch unter Verwendung des gleichen Ultraschall-Kopfes.

Wird die Kleinsignal-Unterdrückung (Diskriminierung) nicht benutzt, so werden auch nach der Gleichrichtung der Impulse alle Nebenechos abgebildet. So zeigt das Echogramm in Bild 55 die Vielfachen der Nebenechos einer 5 m langen VA-Koppelstange bis zur 220-ten Ordnung im äquidistanten trailing-puls-Abstand von 7,77 μsec , entsprechend einem Koppelstangen-Durchmesser von 30 mm.

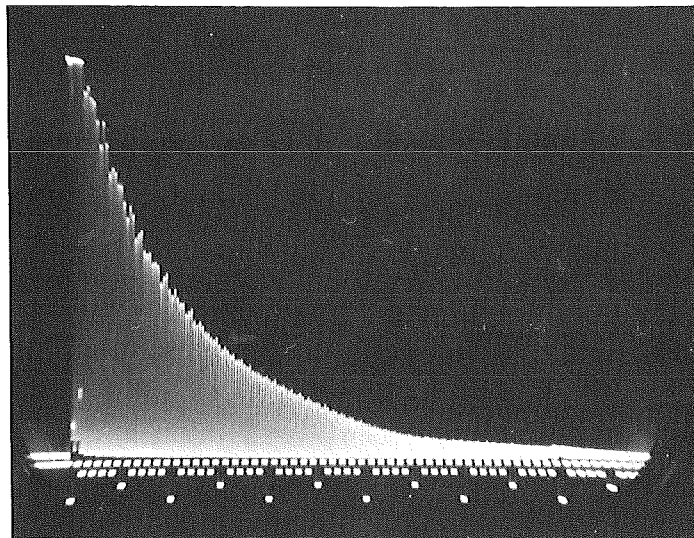


Bild 55: Echogramm einer 5 m-Koppelstange mit Vielfach-Nebenechos bis zur 220. Ordnung. Wandler-Resonanz = 4 MHz, Koppelstange aus WSt. 4571, $D = 30 \text{ mm } \varnothing$.

12.2 Versuchseinrichtung

Bild 56 zeigt das über den gesamten Versuchszeitraum benutzte Impulserzeugergerät.

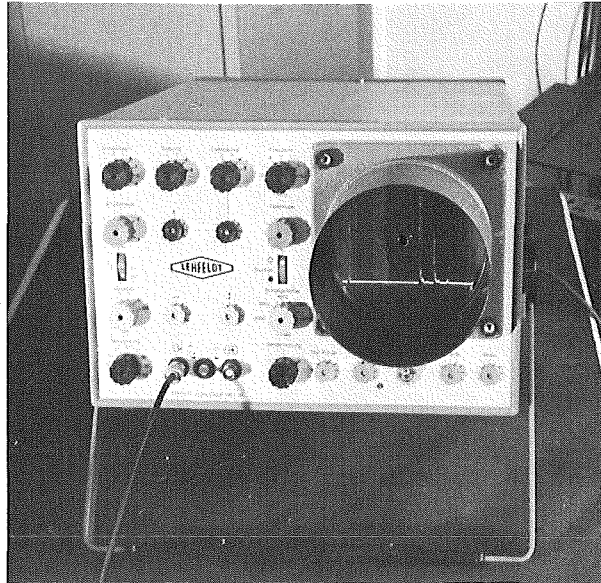


Bild 56: MPT-10-Impulserzeugergerät für den Bereich 0,2 ÷ 15 MHz. An dieses Gerät können Ultraschallköpfe mit Schwingern aus Barium-Titanat, SiO_2 (Quarz), Barium-Blei-Zirkonat und LiNbO_3 (Lithium-Niobat) angeschlossen werden.

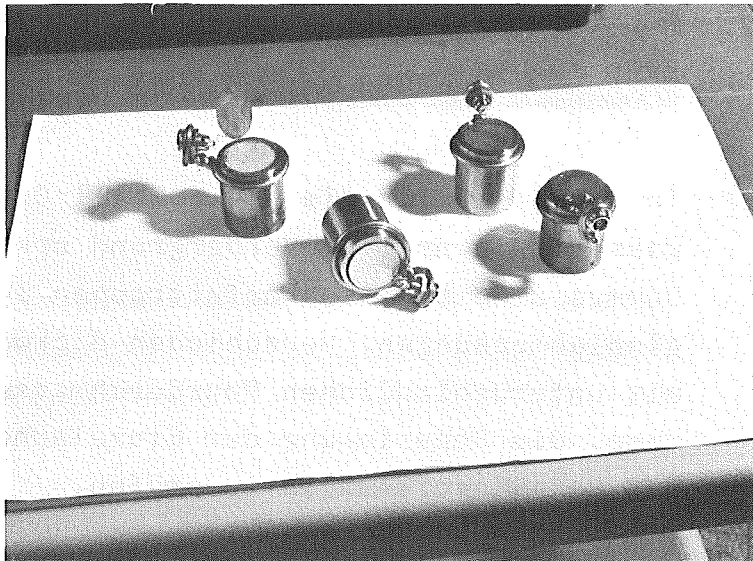


Bild 57: Lötproben mit Barium-Blei-Zirkonat-Schwingern auf VACON und WSt. 4571-Koppelstangen

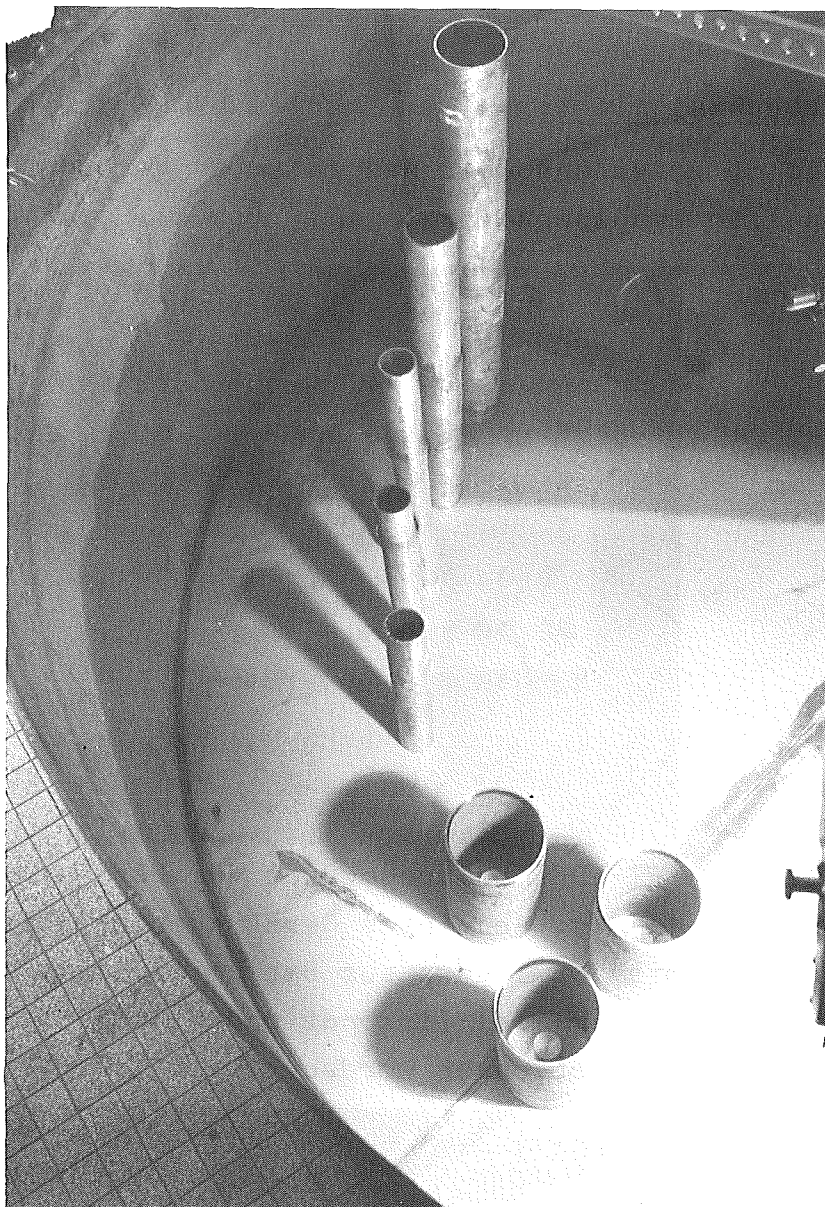


Bild 58: Test-Objekte für die Ultraschall-Ortung unter Wasser. Die drei im Vordergrund erkennbaren Dummies sind BE-Mischkopfatrappen in den Originalabmessungen. Verschieden dickwandige Rohre mit unterschiedlichen Rohrdurchmessern dienen dazu, die Separierung der Einzelechos bei dichten Objektanordnungen zu prüfen.

Literatur

- (1) S.C. Abrahams, H.J. Levinstein, J.M. Reddy:
Phys. Chem. Solids 27 (1966) 1019/26, 1022.
- (2) C.A. Smolenskii, V.V. Zhsanova et.al.:
Phys. Status Solidi 13 (1966) 309/14.
- (3) H. A. Rohrbacher:
Die Bestimmung von Störzentren in Natrium-
Kreisläufen mit Hilfe der Ultraschall-Optik.
KFK-Nachrichten 2/70