

ISBN 3-88314-289-1

Forschungsbericht 95

BUNDESANSTALT FÜR
MATERIALPRÜFUNG (BAM)

BERLIN

Über die Fokussierung des Schallfeldes von Ultraschall-Prüfköpfen mit Fresnelschen Zonenplatten

von Dr.-Ing. Manfred Römer

August 1983

40 Seiten, 80 Abbildungen, 5 Tabellen

Herausgegeben von der
Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM)
Unter den Eichen 87, 1000 Berlin 45
Telefon 030/8104-1 Telex 183261 bamb d

Copyright © 1983 by Wirtschaftsverlag NW
Verlag für neue Wissenschaft GmbH, Bremerhaven

Verlag und Vertrieb:
Wirtschaftsverlag NW
Verlag für neue Wissenschaft GmbH
Postfach 10 11 10, 2850 Bremerhaven 1
Telefon 0471/46093-95

Zusammenfassung

Für die Fehlerbeschreibung bei der zerstörungsfreien Prüfung mit Ultraschall wurden Ultraschall-Prüfköpfe, deren Schallfeld mit Fresnelschen Zonenplatten fokussiert wird, berechnet, konstruiert und für verschiedene Anwendungsfälle erprobt.

Zunächst wurden einfache Näherungsformeln ermittelt, die den Zusammenhang zwischen Schallfeldwerten und Konstruktionsdaten der Zonenplatten beschreiben. Weitere theoretische und experimentelle Untersuchungen dienten der Auswahl geeigneter Zonenplatten-Bauformen. Zwei Typen von Phasenzonenplatten wurden ausgewählt, die für eine Fehlerrandabtastung bei Frequenzen von 1 bis 4 MHz geeignet erschienen:

- vorgesezte Zonenplatte; sie wird auf einen konventionellen Ultraschall-Prüfkopf aufgesetzt, ist auswechselbar und besitzt eine feste Brennweite
- integrierte Zonenplatte; sie wird direkt in den Ultraschall-Schwinger eingearbeitet, ist nicht auswechselbar, ermöglicht jedoch die Variation der Brennweite durch das Durchstimmen der Frequenz („Zoomeffekt“).

Beide Zonenplatten-Typen wurden an Werkstücken mit Testreflektoren und natürlichen Fehlern erprobt. Die theoretisch vorhergesagten erreichbaren kurzen Brennweiten bei gleichzeitigem hohem Fokussierungsgrad und die frequenzabhängige Brennweitenvariation wurden experimentell bestätigt.

Abstract

For the evaluation of flaw indications during nondestructive testing by ultrasound ultrasonic focusing probes were calculated, built up and tested out at different applications. The sound field of these probes is focused by Fresnel zone plates.

Simple approximation formulas were determined describing the dependence of sound field data on the construction data of the zone plates. A selection of qualified types of zone plates was made during further theoretical and experimental investigations. Two types of phase reversal zone plates are suitable for evaluating the scanning of the defect border of frequencies between 1 and 4 MHz:

- zone plates placed before a standard ultrasonic probe; they are exchangeable and have a fixed focal distance.
- integrated zone plates diving the ultrasonic transducer itself into Fresnel zones they are not exchangeable. The focal distance may be varied by wobbling the ultrasonic frequency (“zoom effect”).

Both types of focusing transducers were tested on specimens with artificial and natural flaws. The predicted attainable short focal distances together with a high focusing factor as well as the acoustic zoom by frequency wobbling were experimentally demonstrated.

Vorwort

Diese Arbeit wurde während meiner Tätigkeit in der Fachgruppe 6.2 „Zerstörungsfreie Prüfung“ in der Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM) in Berlin angefertigt.

Den Mitarbeitern des Laboratoriums 6.24 „Verfahren zur zerstörungsfreien Untersuchung von Werkstoffeigenschaften“ danke ich sehr für ihre Unterstützung bei der Durchführung dieser Arbeit.

Mein besonderer Dank gilt:

Herrn Prof. Dr. E. Mundry, der mich in zahlreichen Besprechungen bei der Klärung der Probleme der Arbeit unterstützt hat,

Herrn Prof. W. Bergmann für die Erörterung der Ergebnisse und wertvolle Hinweise,

Herrn Dr. E. Neumann für viele Diskussionen und kritische Stellungnahmen,

Herrn Dr. H. Wüstenberg für zahlreiche Anregungen und Hinweise,

den Herren Dipl.-Ing. K. Matthies, Dipl.-Ing. R. Schmied, Dipl.-Ing. R. Thiel und W. Gieschler für ihre stete Diskussionsbereitschaft sowie für ihre wertvollen Hilfen bei den Versuchsdurchführungen und bei der Rechnerbenutzung.

Frau Haustein danke ich für die mit Sorgfalt und Geduld ausgeführten Schreibearbeiten.

1.	Einleitung	1
1.1	Aufgabenstellung	1
1.2	Zielsetzung	2
2.	Schallfeldfokussierung mit einer Fresnelschen Zonenplatte	2
2.1	Prinzip und Konstruktion einer Zonenplatte	2
2.2	Schallfeldberechnung	3
2.2.1	Mathematische Erfassung der Fresnelschen Konstruktion	3
2.2.2	Konstruktive Realisierung einer Zonenplatte	5
2.2.2.1	Absorptionszonenplatte	5
2.2.2.2	Phasenzonenplatte	6
2.2.3	Numerische Schallfeldberechnung	6
2.2.4	Programme	6
2.2.5	Anwendung	7
2.3	Ermittlung des Zusammenhanges zwischen Prüfkopf- und Schallfelddaten	8
2.4	Einfluß von Bandbreite und Anregungsfrequenz	11
2.4.1	Gültigkeit der Betrachtungsweise bei mehrfrequenter Anregung	11
2.4.2	Variation der Brennweite	11
2.5	Aufbau des fokussierenden Prüfkopfes	12
2.5.1	Prüfkopfmaterialien	12
2.5.2	Herstellung von Absorptions- und Phasenzonenplatten	13
2.5.3	Maßnahmen zur Vergrößerung der Bandbreite	15
2.5.3.1	Elektrisches Ersatzschaltbild eines Piezoschwingers	15
2.5.3.2	Bestimmung des Schallwellenwiderstandes	15
2.5.3.3	Auswahl der Materialien für Dämpfungskörper	16
3.	Meßeinrichtungen zur Schallfeldcharakterisierung	16
3.1	Allgemeines	16
3.2	Tauchtechnik-Meßeinrichtung	16
3.2.1	Mechanischer Aufbau	16
3.2.2	Reflektor	17
3.2.2.1	Abmessungen	17
3.2.2.2	Einfluß des Kugelreflektordurchmessers auf das Spektrum des Echos	18
3.3	Kontakttechnik-Meßeinrichtung	19
3.3.1	Meßaufbau	19
3.3.2	Testkörper für Kontakttechnik-Messungen	20
3.4	Elektrische Anregung von Zonenplatten-Prüfköpfen	20
4.	Versuchsdurchführung und Meßergebnisse	21
4.1	Einflußfaktoren auf die Fokussierungseigenschaften des Prüfkopfes	21
4.1.1	Sendeimpuls	22
4.1.2	Sendeimpulsbandbreite	22
4.1.3	Prüfkopfspektrum	23
4.1.4	Dicke einer vorgesetzten Zonenplatte	24
4.2	Tauchtechnikmessungen	24
4.2.1	Voruntersuchungen	24
4.2.1.1	Vergleich von sin- und cos-Zonenplatten	24
4.2.1.2	Vergleich von vorgesetzter Absorptions- und Phasenzonenplatte	25
4.2.1.3	Vergleich von integrierten Absorptions- und Phasenzonenplatten	25
4.2.2	Vergleich von berechneten und gemessenen Schallfelddaten	27
4.2.3	Variation des Fokusabstandes	30
4.3	Kontakttechnik-Messungen	30

4.3.1	Prüfkopf mit konstantem Fokusabstand	30
4.3.2	Variation des Fokusabstandes	32
5.	Diskussion der Meßergebnisse	32
5.1	Tauchtechnikuntersuchungen	32
5.1.1	Voruntersuchungen	32
5.1.1.1	Sinus- und Cosinuszonenplatte	32
5.1.1.2	Vorgesetzte und integrierte Absorptions- bzw. Phasenzonenplatte	32
5.1.2	Schallfelddaten	33
5.1.3	Fokusverschiebung	33
5.2	Kontakttechnik-Messungen	33
5.2.1	Konstanter Fokusabstand	33
5.2.1.1	Empfindlichkeitskurve	33
5.2.1.2	Abtasten von Flachlochbohrungen	34
5.2.1.3	Abtasten eines natürlichen Fehlers	34
5.2.2	Variabler Fokusabstand	34
6.	Zusammenfassung	34
7.	Literaturverzeichnis	35

Inhaltsverzeichnis des Anhanges

A 1	Physikalische Grundlagen	37
A 1.1	Theoretische Beschreibung des Schallfeldes	37
A 1.2	Fresnelsche Näherung	37
A 1.3	Die Fresnelsche Formel für einen kreisförmigen Schwinger	38
A 2	Programmübersichten	39
A 2.1	Programm „FRELI“	39
A 2.2	Programm „EBENE“	40
A 2.3	Programm „RAUM“	40

Symbole

Im Hauptteil verwendete Symbole:

A	Schwingungsamplitude	ν_P	Parallelresonanzfrequenz
$a = c_2 / c_1$	Verhältnis der Schallgeschwindigkeiten zweier Medien 1, 2	ν_S	Serienresonanzfrequenz
A_0	Maximalamplitude	ν_r	Anregungsfrequenz
b	Schwingerradius	ω	Kreisfrequenz
\bar{C}	Geschätzter Proportionalitätsfaktor	$p = f(r)$	Flächenintegral
C	Proportionalitätsfaktor	p_A	Schallerregung im Aufpunkt A
c	Schallgeschwindigkeit	p_ν	Frequenzabhängiger Schalldruck
C_P	Halterungskapazität	p_0	Konstanter Schalldruck auf dem Schwinger
C_S	Ersatzgröße für Elastizität	p_1	Ankommender Schalldruck
D	Schalldurchlässigkeit	p_2	Schalldruck in der Zwischenschicht
d	Dicke der Zonenplatte	p_3	Durchgelassener Schalldruck
D_F	Fokusschlauchdurchmesser	$q = Z_1 / Z_2$	Verhältnis der Schallwellenwiderstände zweier Medien 1, 2
D_0	Schwingerdurchmesser	Q_m	Mechanische Güte des Piezoschwingers
d_s	Innere Dämpfung des Piezoschwingers	R	Reflexionsfaktor
Δ	Wegdifferenz	r	Senkrechter Abstand eines beliebigen Punktes von der z-Achse
e	Eulersche Zahl	r_K	Kugelradius
f	Fokusabstand	$\Delta \rho$	Summationsschrittweite
F	Relativer Fehler	r'	Abstand zwischen beliebigem Schwinger- und Raumpunkt
f'	Fokussierungsfaktor	R_P	Verlustwiderstand
f_{ak}	Akustischer Fokusabstand	R_S	Ersatzgröße für abgestrahlte Energie
f_{opt}	Optischer Fokusabstand	R_t	Rillentiefe
γ	Phasenverschiebung	R_1	Ersatzgröße für mechanische Verluste
i	Imaginäre Einheit	ρ_n	Radius der n-ten Zone
j	Laufender Index	ρ'	Dichte
J_0	Besselfunktion nullter Ordnung	s	Schallweg
K	Konstante	t	Zeit
$k = 2 \pi / \lambda$	Wellenzahl	T	Schwingungsdauer
l_0	Nahfeldlänge	ΔT	Impulsverlängerung
$L_{0,1}$	Konstruktionshilfspunkte	T_E	Impulsdauer des Empfangssignals
L_S	Ersatzgröße für schwingende Masse	T_{Emin}	Minimale Impulsdauer des Empfangssignals
l_z	Fokusschlauchlänge	T_F	Impulsdauer im Fokus
Δl_z	Abstand vom Schalldruckmaximum zum vorderen 6 dB-Abfall	T_S	Impulsdauer des Sendesignals
λ	Wellenlänge	T_{Smin}	Minimale Impulsdauer des Sendesignals
n	Laufender Index	$T(\rho)$	Transparenzfunktion
$m = Z_3 / Z_2$	Verhältnis der Schallwellenwiderstände zweier Medien 2, 3	U_S	Sendespannung
ν	Frequenz	V	Verschieberegion des Schalldruckmaximums
ν_B	Bandbreite	W	Wellenfront
ν_0	Mittenfrequenz	ΔV	Verstärkungsdifferenz
		Δx	Auflösung

x, y, z	Kartesische Koordinaten	m	Laufender Index
Z	Schallwellenwiderstand	n	Laufender Index
Im Anhang verwendete Symbole:		$p_A (R)$	Schallerregung im Aufpunkt A
a	Substitutionsgröße	p_0	Konstanter Schalldruck auf dem Schwinger
b	Schwingerradius	p_Q	Schallerregung in einem Quellpunkt Q
$\cos(\vec{n}, \vec{r}')$	Richtungscosinus zwischen der Flächennormalen \vec{n} und der betrachteten Richtung \vec{r}' im Feld = Beugungswinkel	θ	Beugungswinkel
D_0	Schwingerdurchmesser	Q	Quellpunkt
F	Quellfläche = Schwingerfläche	R	Ort des Aufpunkts
dF	Element der Quellfläche	R_n	Restglied der Reihenentwicklung
i	Imaginäre Zahl	r'	Abstand zwischen Quell- und Aufpunkt
k	Wellenzahl	$\Delta r'$	Fehler der Reihenentwicklung
K	Konstante	ρ	Abstand eines Quellpunktes vom Koordinatenursprung
l_0	Nahfeldlänge	$T(\rho)$	Transparenzfunktion
λ	Wellenlänge des Ultraschalls	x, y, z	Kartesische Koordinaten

1. Einleitung

1.1 Aufgabenstellung

Die Tragfähigkeit geschweißter Konstruktionen wird durch die Qualität der Schweißverbindungen stark beeinflusst. Unter Qualität sind Eigenschaften wie die Zähigkeit im Schweißgut und in der Wärmeeinflußzone sowie die Fehlerfreiheit dieser Bereiche zu verstehen. Je nach chemischer Zusammensetzung des Stahls können in Schweißkonstruktionen unterschiedliche Fehlerarten auftreten. Bei austenitischen Stählen besteht besonders die Gefahr von Heißrisen, während bei ferritisch-perlitischen Stählen Kaltrisse, Wiedererwärmungsrisse, Terrassenbrüche und nur in geringerem Maße Heißrisse auftreten. Die Mechanismen des Entstehens und Wachstums dieser metallurgischen Fehler sind ebenso wie deren Lage und Größe unterschiedlich. Neben den genannten metallurgischen Fehlern gibt es handwerkliche Fehler. Das sind im wesentlichen Schlackeneinschlüsse, Bindefehler, Poren und Fremdmalleinschlüsse.

Für die Beurteilung der Wirkung von Fehlern auf die Tragfähigkeit einer Schweißverbindung müssen vor allem deren Lage und Größe bekannt sein. Deshalb ist es notwendig, geschweißte Bauteile nach Fehlern abzusuchen. Für die Entscheidung, ob registrierte Fehlerstellen belassen werden können oder nicht, ist neben der Kenntnis von Lage und Größe auch die Fehlerart wichtig, weil unterschiedliche Fehlerarten unterschiedliche Kerbwirkungen haben können.

Zum Ermitteln von Fehlern und deren Geometrie werden z. B. Röntgen-, elektrische und magnetische Verfahren und Ultraschallprüfverfahren [1] eingesetzt. Sie sollen folgende Forderungen erfüllen:

- hohes Auflösungsvermögen
- gute Reproduzierbarkeit
- Unabhängigkeit von Werkstoffstruktur (z. B. Gittermodifikation, Korngröße)
- Praxisreife
- geringer Aufwand (Prüfzeit, Materialaufwand) und damit geringe Kosten

Wegen relativ geringen Aufwandes und kurzer Prüfzeiten hat sich die Anwendung des Ultraschalls bei der Fehlerbeschreibung eine dominierende Stellung erobert. Eine Fehlerbeschreibung mit Ultraschall ist mit verschiedenen Verfahren wie z. B. der akustischen Holographie, der Entfaltung von Ultraschallechos und der Fehlerabastung mit fokussierenden Ultraschallprüfköpfen möglich.

Die akustische Holographie ist ein Verfahren zur Fehlerrekonstruktion [2]. Die Bildrekonstruktion wird heute meist numerisch vorgenommen und ist ziemlich zeitaufwendig. Eine Zeitersparnis läßt sich dadurch erreichen, daß die Rekonstruktion nur in einer Schnittebene anstatt im Halbraum erfolgt. Bei dieser Linienholographie [3] wird kein vollständiges Fehlerbild, sondern lediglich ein Schnittbild des Fehlers produziert. Da das Verhältnis zwischen Wellenlänge und technisch zu realisierender Aperturgröße, anders als in der Optik, relativ ungünstig ist, wird das Tiefenaufklärungsvermögen sehr stark reduziert. Die akustische Holographie liefert jedoch Bilder mit einer sehr guten Lateralaufklärung.

Ein weiteres Verfahren zur Beschreibung von Reflexionsstellen gewinnt man aus einem systemtheoretischen Ansatz, nämlich der Entfaltung von Ultraschallechos, der die Übertragungsfunktion oder die Impulsantwort des Reflektors liefert [4, 5]. Mit Hilfe der Entfaltungsoperation wird hierbei aus dem Ultraschallimpuls und dem Ultraschallecho die Impulsantwort des Reflektors berechnet, welche Aussagen über Größe, Orientierung und Gestalt des Reflektors liefert. Zur Zeit ist der erfolgreiche Einsatz

des Verfahrens noch auf einfache Fälle beschränkt, z. B. ebene Reflektoren regelmäßiger Form.

Ein gegenwärtig häufig in der Praxis eingesetztes Verfahren zur Fehlerbeschreibung ist wegen seiner relativ einfachen Handhabbarkeit die Fehlerabastung mit fokussierenden Prüfköpfen [6]. Die Genauigkeit dieses Verfahrens hängt insbesondere von der erreichbaren räumlichen Auflösung ab, die sich aus lateraler Auflösung und Tiefenaufklärung zusammensetzt. Die Tiefenaufklärung wird durch die Länge der gesendeten Ultraschallimpulse bestimmt, während die laterale Auflösung dem Schallbündeldurchmesser umgekehrt proportional ist, d. h. eine gute laterale Auflösung erfordert einen sehr geringen Schallbündeldurchmesser. Dies wird üblicherweise durch Hohlspiegel, gekrümmte Schwinger oder Ultraschalllinsen erreicht, wobei der Effekt der Fokussierung auf der Laufzeit- oder phasenrichtigen Überlagerung der von einem Ultraschallschwinger ausgesendeten Schallwellen an einem vorher bestimmten Ort beruht. Das Ergebnis ist eine Schalldruckerhöhung an diesem Ort. Die Fokussierung nach dem Prinzip der Reflexion unter Verwendung von gekrümmten Spiegeln, die den Schallstrahl in die gewünschte Richtung lenken und gleichzeitig fokussieren, hat sich wegen des komplizierten Aufbaus nur in einigen Spezialfällen, wie z. B. bei der Innenprüfung von Rohren mit kleinem Durchmesser, bewährt [7].

In letzter Zeit sind auch Fokusprüfköpfe mit einer sogenannten dynamischen Fokussierung und Fokussierung durch Gruppenstrahler-Anordnungen vorgestellt worden [8, 9]. Die Prüfköpfe dieser Systeme bestehen entweder aus einem Ultraschallschwinger, der in Segmente unterteilt ist, oder aus einer Vielzahl von Einzelschwingern. Die Segmente bzw. Einzelschwinger werden einzeln und untereinander laufzeitverzögert angeregt, wobei die Laufzeitverzögerung so gewählt wird, daß sich in der gewünschten Brennweite die gesendeten Schallwellen aller Einzelsegmente phasenrichtig überlagern. Die elektronische Erzeugung der Laufzeitverzögerung ermöglicht die Anwendung kürzerer Impulse als bei herkömmlichen Ultraschalllinsen, wodurch die Tiefenaufklärung verbessert wird. Gleichzeitig ist bei der dynamischen Fokussierung die Brennweite durch Wahl der Laufzeitverzögerung einstellbar. Zusätzlich ermöglichen Gruppenstrahler noch ein Schwenken des Schallbündels. Aus ihrem Funktionsprinzip ist jedoch schon erkennbar, daß diese Art der Fokussierung zusätzlich elektronischen Aufwand erfordert.

Bei der Linsenanordnung wird eine aus einem Festkörper hergestellte Linse unmittelbar vor den eigentlichen Schwinger gesetzt und somit in den Prüfkopf integriert. Der Fokussierungseffekt wird durch Brechung erreicht. Beiträge zur theoretischen Erfassung der durch Linsen fokussierten Schallfelder für die Anwendung in der zerstörungsfreien Prüfung sind unter anderem von Schlengermann und Wüstenberg [10, 11] bekannt. Wichtige Voraussetzung für einen sinnvollen praktischen Einsatz der Prüfköpfe ist die Schaffung einfacher mathematischer Zusammenhänge für die Prüfkopf- und Schallfeldberechnung, wie sie in [12] hergestellt werden. In [11, 13] wird ihr praktischer Einsatz bei der Fehlerabastung an verschiedenen Beispielen demonstriert. Die Grenzen dieses Verfahrens ergeben sich aufgrund von physikalischen und werkstofftechnischen Bedingungen. Zur Fertigung von Brechungslinsen werden üblicherweise zwei schalldurchlässige Werkstoffe mit annähernd gleichen Schallwellenwiderständen und möglichst unterschiedlichen Schallgeschwindigkeiten verwendet. Diese Forderungen sind nur teilweise erfüllbar. Bei der Herstellung solcher Linsen treten folgende Probleme auf:

- 1) Unterschiedliche Schallwellenwiderstände der Linsenwerkstoffe erzeugen Reflexionen, die zu Störungen führen. Diese Störungen können sich eventuellen Fehleranzeigen überlagern und dadurch deren Interpretation erschweren.
- 2) Linsenwerkstoffe mit nur geringen Schallgeschwindigkeitsunterschieden ermöglichen keine Fokussierung in Prüfköpfnähe.

- 3) Durch die Krümmung entsteht eine vom Radius abhängige Linsendicke, wodurch an den Grenzschichten kein optimaler Schalldurchgang erreicht wird.
- 4) Die Fertigung derartiger Linsen ist aufwendig, da die beiden gekrümmten Linsenteile genau aneinander angepaßt werden müssen.

Es erscheint deshalb sinnvoll, eine weitere Möglichkeit zur Schallfeldfokussierung zu untersuchen. Anstelle von Linsen sollen Fresnelsche Zonenplatten, bei denen das Schallfeld durch Beugung fokussiert wird, verwendet werden. Die grundsätzliche Anwendbarkeit der Zonenplatten zur Fokussierung von Ultraschall wurde bereits in einer Vielzahl von Veröffentlichungen [14 — 22] überprüft. Am umfassendsten behandelt Farnow [16] dieses Problem mit dem Ziel, eine Abbildung mittels Ultraschall im Tauchtechnikverfahren zu erreichen. Da im Wasser nur eine geringe Schallschwächung auftritt, arbeitet er im Bereich von 10 MHz bzw. 1,5 GHz. Aufgrund der hohen Frequenz und der damit verbundenen kleinen Ringabstände müssen ganz andere Arten von Zonenplatten entwickelt werden, als sie für die Werkstoffprüfung im Frequenzbereich von 1 — 4 MHz sinnvoll sind. So kommt Farnow z. B. zu dem Ergebnis, daß sich Zonenplatten wegen der erforderlichen kleinen Ringabstände nicht durch Vorsetzen vor den Schwinger realisieren lassen. Dagegen bewirken die hohen Frequenzen, daß auf einem bestimmten Durchmesser des Schwingers viele Zonenplattenringe untergebracht werden können. Die große Ringanzahl bewirkt eine gute Fokussierung, so daß das Problem des Störuntergrundes und der Nebenmaxima keine Rolle spielt. Ganz anders ist es nach [14] bei den in der Werkstoffprüfung relevanten Frequenzen. Assenza und Pappalardo kommen für niedrige Frequenzen (1 — 4 MHz) zu der Auffassung, daß eine Fokussierung mit niedriger Ringanzahl zu keinem befriedigenden Ergebnis führt, weil der Abstand des Nutzsignals zum Störuntergrund kaum besser als bei einem unfokussierten Prüfkopf ist. Es soll deshalb überprüft werden, unter welchen Bedingungen eine Fokussierung möglich ist.

1.2 Zielsetzung

In Anlehnung an die Erfahrungen über den Einsatz von Brechungslinsen zur Schallfeldfokussierung in der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung und unter Ausnutzung der vorliegenden Kenntnisse über die Schallfeldfokussierung von Fresnelschen Zonenplatten hat diese Arbeit folgendes Ziel:

Es soll überprüft werden, ob Zonenplatten im Frequenzbereich der zerstörungsfreien Prüfung von 1 — 4 MHz eine den Linsenprüfköpfen vergleichbare Fokussierung des Schallfeldes liefern.

Im einzelnen sind dazu folgende Aufgaben zu lösen:

- Mathematische Erfassung des Zusammenhanges zwischen Schallfeld- und Prüfkopfdaten in Anlehnung an [12]
- Konstruktion und Bau geeigneter Zonenplattenprüfköpfe für einen praktischen Einsatz zur Fehlerrandabastung
- Anwendung der von Pohlman [23] publizierten und von Farnow nachgewiesenen Veränderung des Fokusabstandes durch Variation der Frequenz für die zerstörungsfreie Prüfung
- Elektrische Anregung durch handelsübliche Ultraschallgeräte
- Nachweis der Funktion und Vergleich verschiedener Zonenplatten-Typen durch Schallfeldmessung und Messungen an Testreflektoren

Im Rahmen von Vorveröffentlichungen wurde zu einigen dieser Punkte bereits berichtet [24 — 29].

2. Schallfeldfokussierung mit einer Fresnelschen Zonenplatte

2.1 Prinzip und Konstruktion einer Zonenplatte

Eine anschauliche Erklärung für die beugungsbedingte Intensitätsverteilung hinter einem Schirm mit kreisrunder Öffnung liefert das Huygenssche Prinzip, auf dessen Grundlage Fresnel 1823 die nach ihm benannte „Zonenplatte“ zur Lichtkonzentration konstruierte.

Nach Huygens ist jeder Punkt einer Wellenfläche, bzw. wie im vorliegenden Fall eines Kolbenschwingers, Ausgangspunkt einer Elementarwelle. Die daraus resultierende Welle ist mit der ursprünglichen identisch. Um den Schwingungszustand in einem Punkt A nach Amplitude und Phase im Wellenfeld zu ermitteln, ging Fresnel von den Überlagerungen der einzelnen Elementarwellen in diesem Punkt aus.

Da die gemeinsame Front der einfallenden Elementarwellen, die von einem ebenen Kolbenschwinger ausgehen, wiederum eben ist, kann man folgende Konstruktion durchführen (Abb. 2/1):

Um den gewünschten Fokuspunkt A werden Kreise dergestalt gezogen, daß diese die gedachte Wellenfront W, die der Schwingerfläche entspricht, so schneiden, daß die Schnittpunkte L_0, L_1, L_2, \dots jeweils eine halbe Wellenlänge weiter von A entfernt sind.

$$\text{Es sind } s_1 = f + \lambda/2, s_2 = f + 2\lambda/2, \dots, s_n = f + n\lambda/2$$

$$\text{mit } n = 1, 2, 3, \dots \text{ und } f = \overline{AL_0}$$

Verbindet man den Fokuspunkt A mit den Schnittpunkten auf der

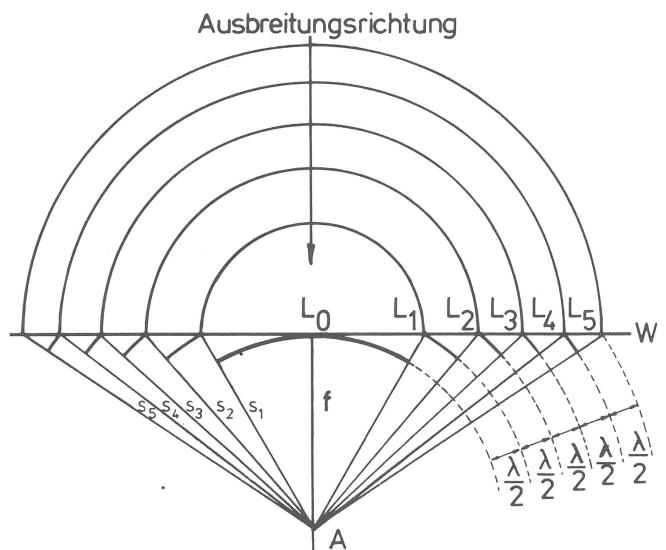


Abb. 2/1
Konstruktion der Fresnelschen Zonen [30]

Wellenfront, so ergibt sich eine Schar von Kegeln, die den Schwinger in konzentrischen Kreisen schneiden. Diese kreisförmigen Flächenstücke heißen *Fresnelsche Zonen*, deren Radien $\overline{L_0L_1} = \rho_1, \overline{L_0L_2} = \rho_2, \dots, \rho_n$ sich dann unter der Annahme $f \gg \lambda$ mit

$$\rho_n = \sqrt{nf\lambda} \quad (2/1)$$

berechnen lassen.

Es läßt sich leicht zeigen, daß die Flächeninhalte der einzelnen Fresnelschen Zonen gleich groß sind, d. h. von jeder Fresnelschen Zone gehen gleich viele Elementarwellen aus [31].

Die Wirkung aller Elementarwellen einer Fresnelschen Zone wird durch die Wirkung der beiden Hälften der unmittelbar benachbarten Zonen näherungsweise aufgehoben. Im Punkt A bleibt dann bei unendlich ausgedehnter Zonenplatte die Hälfte der Erregung der ersten Fresnelschen Zone übrig.

Gelingt es jedoch, jede zweite Zone schallundurchlässig zu machen, so ist eine stark vermehrte Intensität in A zu beobachten. Dies ist darauf zurückzuführen, daß die angenäherte Interferenzauslöschung benachbarter Zonen nicht mehr stattfinden kann, sondern es dort zu einem Interferenzmaximum der nahezu gleichphasig eintreffenden Elementarwellen kommt. Eine solche Zonenplatte, die für die Hälfte der einfallenden Energie durchlässig ist, wird als Absorptions-Zonenplatte bezeichnet.

Setzt man an die Stelle der schallundurchlässigen Zonen solche, die gegenüber ihren benachbarten Zonen eine 180°-Phasenverschiebung bewirken, so läßt sich die vorher in ihnen absorbierte Energie zusätzlich nutzbar machen, und man erhält durch die Überlagerung aller Anteile bezogen auf die Absorptions-Zonenplatte eine Verdoppelung des Schalldrucks im Aufpunkt A. Diese Anordnung wird als Rayleigh-Woodsche-Phasenzonenplatte bezeichnet [32].

2.2 Schallfeldberechnung

2.2.1 Mathematische Erfassung der Fresnelschen Konstruktion

Nach den im Anhang A 1 zusammengefaßten physikalischen Überlegungen ergibt sich im vorliegenden Fall das tatsächliche fokussierte Schallfeld einer endlich begrenzten Kolbenmembran, indem der mathematische Ausdruck für das Schallfeld dieser Kolbenmembran mit einer Transparenzfunktion, die zur Fokussierung führt, multipliziert wird.

Das Schallfeld dieser Kolbenmembran wird durch die Beziehung A 15 (vgl. Anhang A 1.3) in der Form

$$p_A(r, z) = 2\pi p_0 K \int_{\rho=0}^b T(\rho) e^{i \frac{k\rho^2}{2z}} J_0(kr\rho) \rho d\rho \quad (A 15)$$

beschrieben.

Eine geschlossene analytische Lösung dieses Integrals ist nicht bekannt, da der Abstand zwischen jedem Punkt auf dem Schwinger und einem beliebigen Raumpunkt variabel ist, so daß sich für jeden Punkt auch der Wert der Besselfunktion J_0 ändert. Es wird deshalb eine numerische Berechnung vorgenommen. Zunächst ist jedoch noch die Transparenzfunktion $T(\rho)$ zu ermitteln.

Die Transmission einer Zonenplatte läßt sich auf einfache Weise durch die Anwendung des Reziprozitätstheorems [33] finden, d. h. die Berechnung erfolgt nicht von der Zonenplatte zum Fokus, sondern es wird die Amplitudenverteilung in der Ebene mit dem Abstand $r'=f$ von einer im Fokus A startenden Kugelwelle bestimmt (Abb. 2/2).

Diese Verteilung wird in ihrer allgemeinen Form durch

$$p = p_c \cdot \frac{1}{r'} \cdot e^{ikr'} \quad (2/2)$$

beschrieben.

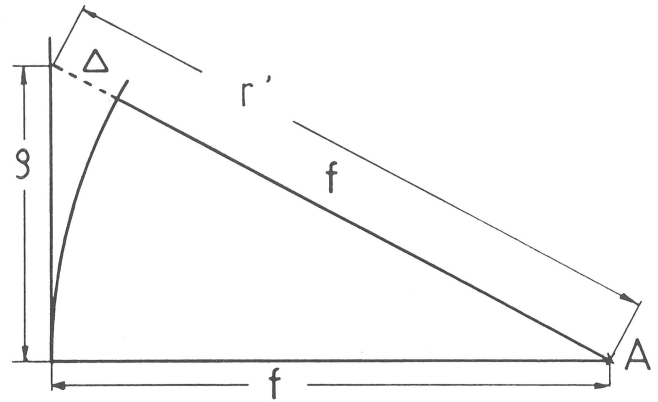


Abb. 2/2
Darstellung einer vom Punkt A kommenden Kugelwelle in einer Ebene

Da aber zur Berechnung nur die Verteilung für einen festen, aber beliebig wählbaren Zeitpunkt nach Amplitude und Phase interessiert und dies dem Realteil von Gl. 2/2 entspricht, läßt sich für Gl. 2/2 auch

$$p = p_0 \cdot \frac{1}{r'} \cdot \cos kr' \quad (2/3)$$

schreiben.

Mit $r' = f + \Delta$ erhält man für den cos-Faktor, der die Amplitudenänderung in der Ebene beschreibt, $\cos(kf + k\Delta)$. Aus Abb. 2/2 folgt für $f \gg \Delta$, daß man für $\Delta = \rho^2/2f$ schreiben kann. Damit erhält man aus der Beziehung 2/3 für $kf = 2\pi m$ mit $m = 0, 1, 2, \dots$

$$p = p_0 \cdot \frac{1}{r'} \cdot \cos \frac{k\rho^2}{2f} \quad (2/4)$$

und für $kf = (4m + 1)\pi/2$ mit $m = 0, 1, 2, \dots$

$$\cos \left(\frac{k\rho^2}{2f} + \frac{\pi m}{2} \right) = -\sin \frac{k\rho^2}{2f} \quad (2/5)$$

Der cos- bzw. sin-Term in Gl. 2/4 bzw. Gl. 2/5 entspricht also, bis auf einen konstanten Faktor, der angestrebten Amplitudenverteilung einer zu konstruierenden Zonenplatte. Sie stellen somit die geforderten Transmissionen dar. Ebenso ist aus diesen Gleichungen ersichtlich, daß eine kontinuierliche Phasenverschiebung über den Zonenplattenradius ρ erfolgt. Diese Transmissionen sind für $\lambda = 1,48$ mm (1 MHz in Wasser) und einen Fokusabstand von $f = 40$ mm in Abb. 2/3 für $\rho = 16$ mm

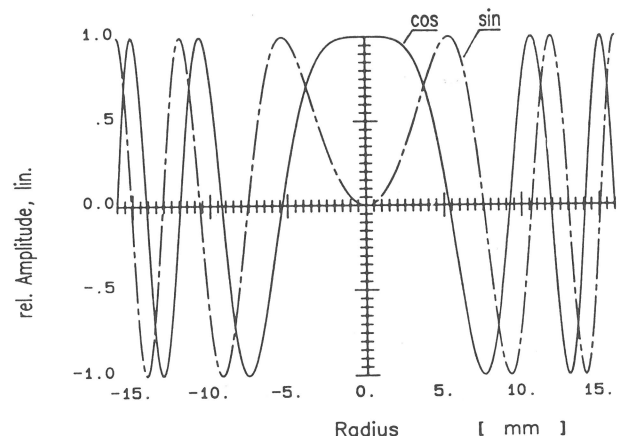


Abb. 2/3
sin- und cos-Transparenzfunktion für $\lambda = 1,48$ mm und $f = 40$ mm

dargestellt, während aus Abb. 2/4 der Phasenverlauf in Abhängigkeit vom Zonenplattenradius ρ für diese Werte hervorgeht. Eine Zonenplatte mit dieser Transmission würde

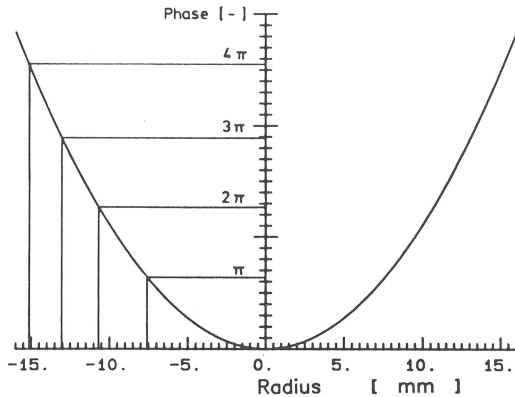


Abb. 2/4
Theoretischer Phasenverlauf in Abhängigkeit vom Radius einer cos-Zonenplatte für $\lambda = 1,48 \text{ mm}$ und $f = 40 \text{ mm}$

also bei Beleuchtung mit einer ebenen Welle eine Fokussierung im Abstand von 40 mm von dieser Zonenplatte hervorrufen, wenn $\lambda = 1,48 \text{ mm}$ beträgt.

Dabei ist allerdings zu beachten, daß die minimale Impulslänge mindestens so groß sein muß, daß sich der in Abb. 2/4 dargestellte Phasenverlauf einstellen kann. Im gewählten Beispiel mit einem Zonenplattenradius von $\rho = 16 \text{ mm}$ muß also eine Dauer, die mindestens $4\pi = 2$ Wellenlängen entspricht, eingehalten werden.

Eine derartige Transmission ist für Licht zwar leicht, für Schallwellen aber technisch so gut wie nicht herstellbar, da eine kontinuierlich veränderliche Schwächung in der Zonenplatte kaum realisierbar ist, so daß man auf Näherungen zurückgreifen muß. Es bietet sich an, die sinusförmigen Verteilungen durch Rechtecke zu ersetzen. Nach Abb. 2/3 ist es sinnvoll, dafür die cos-Funktion zu verwenden, da die mittlere Zone der cos-Funktion besser durch Rechtecke angenähert werden kann als die der sin-Funktion.

Durch diese Näherung erhält man folgende Transparenzfunktion

$$T(\rho) = f(x) = \begin{cases} 1 & \text{für } x \geq 0 \\ -1 & \text{für } x < 0 \end{cases} \quad (2/6)$$

mit $x = \cos(k\rho^2/2f)$

Technisch herstellbar sind aber nur Transmissionen von 1, also volle Durchlässigkeit oder 0, keine Durchlässigkeit. Eine negative Transmission bedeutet aber nach Gl. 2/4 nur eine Phasenverschiebung um π , die technisch realisierbar ist. Zur Berechnung einer derartigen Zonenplatte benötigt man somit zunächst die Nullstellen der geforderten Transmission, d. h. aus Gl. 2/4 folgt

$$\cos \frac{k\rho^2}{2f} = 0.$$

Diese Forderung ist erfüllt für $\pi/2, 3\pi/2, \dots, (2n-1)\pi/2$ mit $n = 1, 2, 3, \dots$, d. h.

$$k\rho_n^2/2f = (2n-1)\pi/2 \quad (2/7)$$

Aus dieser Gleichung und der Substitution

$$\sigma^2 = f/k \quad (2/8)$$

ergeben sich die Ringradien zu

$$\rho_n = \sigma \sqrt{\pi(2n-1)} = \sqrt{\pi(2n-1)f/k} \quad (2/9)$$

Durch analoge Vorgehensweise folgt aus Gl. 2/5

$$\sin \frac{k\rho^2}{2f} = 0 \quad \text{für } n\pi = \frac{k\rho_n^2}{2f} \quad \text{mit } n = 0, 1, 2, \dots$$

$$\rho_n = \sigma \sqrt{2n\pi} \quad (2/10)$$

Gl. 2/10 ist mit der zeichnerisch gewonnenen Form (2/1), S. 3, identisch. Ein Vergleich der Gl. 2/9 und 2/10 zeigt, daß die Verwendung einer cos-Funktion zur Ermittlung der Nullstellen auch deshalb sinnvoll ist, weil dadurch bei gleicher Ringzahl n der Gesamtradius um ca. die Hälfte der letzten Zone kleiner ist als bei Verwendung der sin-Funktion. Zu beachten ist, daß bei Verwendung der cos-Funktion Gl. 2/9 die Phase an der Stelle ρ_1 erst den Wert $\pi/4$ angenommen hat, während zwischen allen anderen Radien eine Phasendifferenz von $\pi/2$ auftritt. Dies ist eine Abweichung von der ursprünglichen Idee, die der Konstruktion der Fresnelschen Zonenplatte zugrunde lag. Auf die Auswirkungen dieser Veränderungen wird im Kapitel 2.2.5 eingegangen.

Die so ermittelten Ringradien geben die jeweiligen Grenzen der entsprechenden Transmissionsbereiche wieder, d. h. auf eine Zone mit der Transmission 1 folgt eine Zone, die durch eine vorzunehmende Phasenverschiebung von 180° der Transmission -1 entspricht usw. Diese als Phasenzonenplatte bezeichnete Zonenplatte, deren konstruktive Lösung im Kapitel 2.2.2, S. 5, beschrieben wird, muß durch die vorgenommene Näherung durch Rechtecke etwas andere Fokussierungseigenschaften besitzen, die sich aber durch die Fourierkoeffizienten einer Rechteckfunktion berechnen lassen. Danach lassen sich Rechteckzonenplatten als lineare Überlagerung von sinusförmigen Zonenplatten beschreiben, d. h. jede mit ihren eigenen Fokuspunkten.

Da die Fourierreihe einer Rechteckfunktion beschrieben wird durch

$$y \sim \sin x + \frac{\sin 3x}{3} + \frac{\sin 5x}{5} + \dots, \quad (2/11)$$

erhält man neben dem gewünschten Fokuspunkt noch Fokuspunkte bei $\pm f/3, \pm f/5, \dots$. Das von den virtuellen Fokuspunkten ausgehende divergente Schallbündel erscheint auf der Schlierenaufnahme (Abb. 2/5) bei den reellen Fokuspunkten als Untergrund. Mit Hilfe von Schlierenaufnahmen ist es möglich, Schallfelder sichtbar zu machen, wobei eine quantitative Auswertung derartiger Aufnahmen sehr schwierig ist.

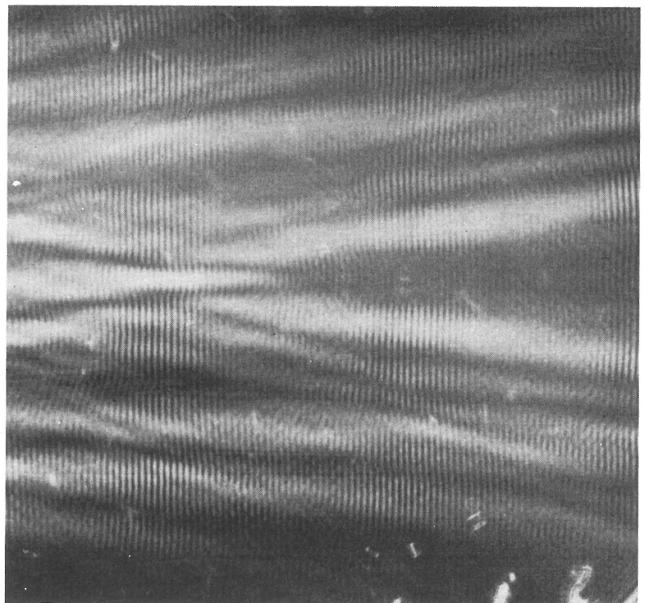


Abb. 2/5
Schlierenbild eines fokussierten Schallfeldes

Zur Verdeutlichung zeigt die Abb. 2/6 den berechneten relativen Schalldruck einer Rechteckzonenplatte auf der Längsachse im Vergleich zu einer cos-Zonenplatte.

Analog zu den Abb. 2/3 und 2/4 lassen sich auch für die

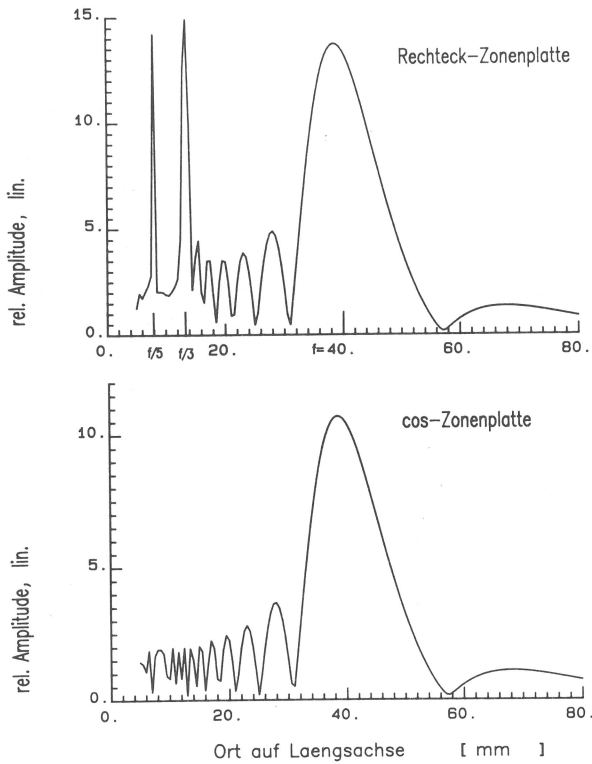


Abb. 2/6
Berechnete Schalldruckverteilungen einer Rechteck- (oben) und einer cos-Zonenplatte für $\lambda = 1,48 \text{ mm}$ und $f = 40 \text{ mm}$

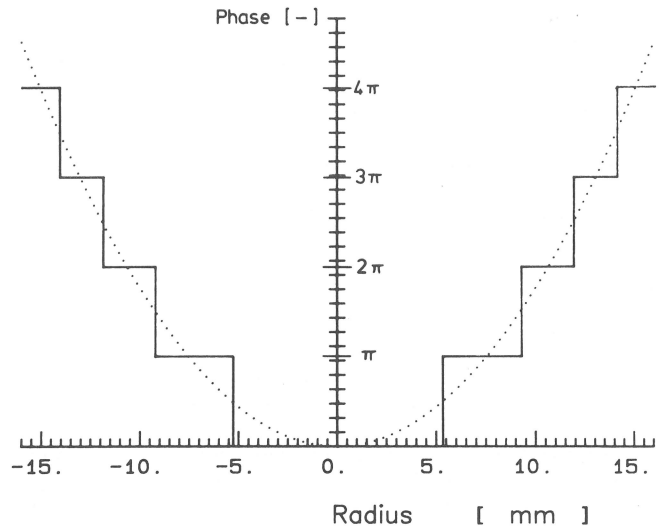


Abb. 2/8
Phasenverlauf in Abhängigkeit vom Radius einer durch Rechtecke angenäherten cos-Zonenplatte für $\lambda = 1,48 \text{ mm}$ und $f = 40 \text{ mm}$

wobei sich die Grenzen der Funktion $f(x)$ aus den Ringradien ρ_n ergeben.

Für einen Kreiskolbenschwinger ist die Durchlässigkeit eins, so daß die Transparenzfunktion

$$T(\rho) = f(x) = 1 \quad (2/13)$$

lautet.

2.2.2 Konstruktive Realisierung einer Zonenplatte

2.2.2.1 Absorptionszonenplatte

In diesem Abschnitt sollen lediglich prinzipielle Überlegungen, die für die Berechnung der Konstruktionsdaten der Zonenplatte wichtig sind, angestellt werden. Detaillierte Fertigungshinweise werden später im Abschnitt 2.5 gegeben.

Wählt man den Aufbau des Fokus-Prüfkopfes so, daß vor dem Kreiskolbenschwinger eine z. B. aus Plexiglas bestehende Zonenplatte angeordnet wird, so lassen sich die benötigten Kreisringe durch Ausstechen von rechteckförmigen Profilen auf der Drehbank herstellen. Werden die ausgestochenen Kreisringe z. B. mit Luft oder Kork gefüllt, so entsteht eine Absorptionszonenplatte, da an diesen Stellen kein Schall austreten kann.

Einen stark vergrößerten Ausschnitt einer Zonenplatte mit dahinter angeordnetem Schwinger zeigt Abb. 2/9.

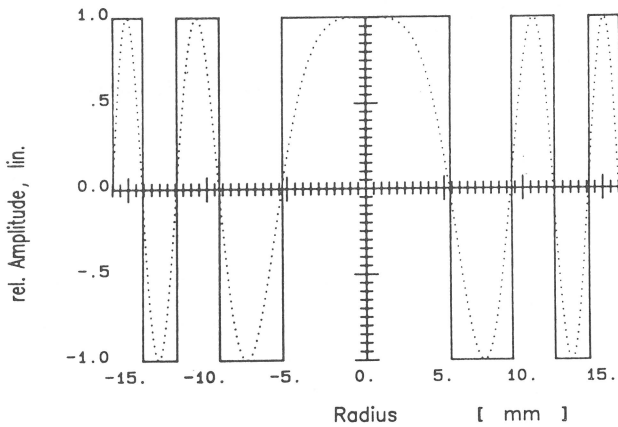


Abb. 2/7
Rechteckförmige Annäherung der cos-Transparenzfunktion von Abb. 2/3 mit den Grenzwerten der Transparenz von +1 und -1

Rechteckzonenplatte die Amplitudenverteilung und die Phasenverteilung über dem Radius ρ darstellen (Abb. 2/7 und 2/8).

Zu beachten ist hierbei, wie schon erwähnt, daß bei der konstruktiven Lösung die negative Transmission durch eine positive Transmission mit einer Phasenverschiebung von 180° ersetzt wird.

Da die Fokussierung durch phasenrichtige Überlagerung aller Schallwellenanteile im Fokuspunkt erfolgt, ist es einsichtig, daß auch durch Ausblendung der Zonen mit negativer Transmission trotzdem eine Fokussierung erfolgt, d. h. $T=0$ anstelle von $T=-1$. Der Schalldruck wird dann allerdings um den Anteil der fehlenden Zonen vermindert.

Diese sogenannten Absorptions-Zonenplatten besitzen eine Transmission der Form

$$T(\rho) = f(x) = \begin{cases} 1 & \text{mit } x \geq 0 \\ 0 & \text{mit } x < 0 \end{cases} \quad (2/12)$$

mit $x = \cos(k\rho^2/2f)$,

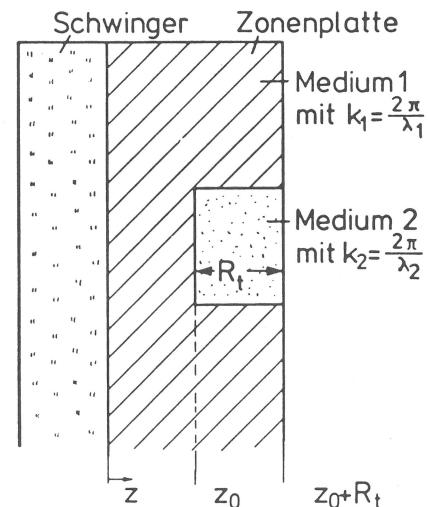


Abb. 2/9
Vergrößerter Ausschnitt aus einer Zonenplatte

2.2.2.2 Phasenzonenplatte

Füllt man dagegen diese Kreisinge mit einem schalldurchlässigen Medium (Medium 2, Abb. 2/9), das eine vom Plexiglas verschiedene Schallgeschwindigkeit besitzt, so läßt sich nach einem bestimmten Laufweg die für eine Phasenzonenplatte geforderte Phasenverschiebung von 180° erreichen.

Für die Amplitude A einer harmonischen Schwingung an einem bestimmten Ort z_0 gilt

$$A = A_0 \cdot \sin kz_0$$

Für die Stelle $z = z_0 + R_t$ gilt dann

$$\begin{aligned} A_1 &= A_0 \sin [k_1 (z_0 + R_t)] && \text{für das Medium 1} \\ A_2 &= A_0 \sin (k_1 z_0 + k_2 R_t) && \text{für das Medium 2} \end{aligned}$$

Da der jeweilige Schwingungszustand nur vom Laufweg abhängig ist, kann durch Vorgabe einer bestimmten Phasenverschiebung γ der dazugehörige Laufweg R_t ermittelt werden durch

$$\sin (k_1 z_0 + k_2 R_t \pm \gamma) = \sin (k_1 z_0 + k_1 R_t).$$

Für den Laufweg, der der Rillentiefe entspricht, folgt damit

$$R_t = \pm \frac{\gamma}{k_1 - k_2} \quad \text{oder} \quad R_t = \pm \frac{\gamma}{2\pi} \cdot \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2} \quad (2/14)$$

Somit ergibt sich für eine Zonenplatte, die aus zwei Werkstoffen besteht, deren Schallgeschwindigkeiten im Verhältnis $c_2/c_1 = a$ stehen, für $\gamma = \pi$ folgende Rillentiefe

$$R_t = \pm \frac{c_1}{2\nu} \cdot \frac{a}{1-a} \quad (2/15)$$

2.2.3 Numerische Schallfeldberechnung

Die Schallfeldberechnung erfolgt mit der Formel A 15 (s. Anhang A 1) in der Form

$$p_A(r, z) = 2\pi K p_0 \int_0^b T(\rho) e^{i \frac{k\rho^2}{2z}} J_0(kr\rho) \rho d\rho.$$

Durch Anwendung der Rechteckregel [34] läßt sich für dieses Integral eine numerische Näherungslösung dadurch finden, daß die Fläche unter der Funktion $P = f(r)$ stückweise durch kleine Rechtecke approximiert wird. Da außerdem $T(\rho)$ nach den Gl. 2/6, 2/12 und 2/13 nur die Werte 1, 0, -1 annehmen kann, wird aus Gl. A 15

$$\begin{aligned} &\int_0^b T(\rho) e^{i \frac{k\rho^2}{2z}} \cdot J_0(kr\rho) \rho d\rho \approx \\ &0 \\ &\approx \Delta\rho \sum_{m=1}^n T(\rho) e^{i \frac{k\rho_{j-1/2}^2}{2z}} J_0(kr\rho_{j-1/2}) \cdot \rho_{j-1/2} \end{aligned} \quad (2/16)$$

$m = 1, 2, \dots, n$ Anzahl der Zonen
 $\rho_{j-1/2}$ Funktionswert an der Stelle $j-1/2$ mit $j = \dots, n$, d. h. in der Mitte des j -sten Rechteckes
 $\Delta\rho$ Schrittweite

Da der Fehler dieser Näherungslösung dem Quadrat der Schrittweite $\Delta\rho$ proportional ist, der Rechenaufwand bei der Wahl einer kleinen Schrittweite jedoch im gleichen Verhältnis ansteigt, wurde zur Beurteilung der Rechengenauigkeit die Schrittweite bei mehreren Rechnungen für einen Ort (r, z) soweit verkleinert, daß für die Differenz zweier Schalldruckwerte am gleichen Ort gilt:

$$p(\Delta\rho_1) - p(\Delta\rho_2) \leq \pm p(\Delta\rho_1) \cdot 1/100 \quad (2/17)$$

mit $\Delta\rho_1 > \Delta\rho_2$

Zur Ermittlung der Schrittweite $\Delta\rho$, die diese Bedingung erfüllt, wurde die in Abb. 2/10 grafisch dargestellte Fehlerabschätzung vorgenommen. Hierbei wurde der relative Fehler bei der Berechnung des Schalldrucks am Ort (r, z) über der Integrations-schrittweite aufgetragen. Der relative Fehler ist auf den Schalldruckwert bezogen, dem sich die Ergebnisse der Schalldruckberechnung bei ständiger Verringerung der Schrittweite asymptotisch nähern. Die Berechnung wurde für mehrere verschiedene Punkte auf einer Ebene im Schallfeld im Abstand $z = f/2$ ausgeführt. Der Abstand wird deshalb gewählt, weil für jeden größeren Wert der Fehler kleiner ist und damit im Arbeitsbereich des Prüfkopfes bei $z = f$ eine bessere Rechengenauigkeit erzielt wird. Es ergibt sich, daß die Bedingung 2/17 für die Schrittweite

$$\Delta\rho \leq \lambda/25 \quad (2/18)$$

erfüllt ist. Der relative Fehler ist immer $F \leq 2\%$.

Die Wahl der Schrittweite $\Delta\rho$ als Funktion der Wellenlänge im Prüfmateriale ist deshalb sinnvoll, weil damit die Möglichkeit gegeben ist, den Rechenaufwand bei vergleichbarer Genauigkeit der jeweils zu berechnenden Zonenplatte anzupassen.

Bei der Auswertung der Schallfelder wird die Schalldruckverteilung des gesamten Feldes betrachtet. Die momentane Phasenlage der Einzelanteile wird nicht berücksichtigt. Nach der Berechnung des Schalldrucks der komplexen Größe $p_A = f(r, z)$ wird deshalb nur der Betrag abgespeichert.

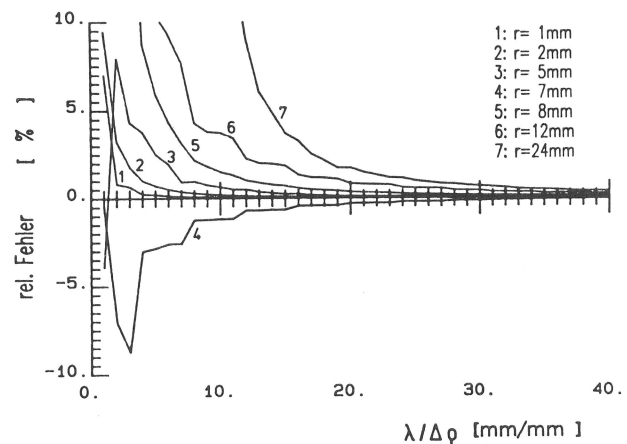


Abb. 2/10
 Relativer Fehler in Abhängigkeit von der Integrationsschrittweite

2.2.4 Programme

Das Rechenprogramm „Frel“ ist so aufgebaut (s. Programmübersicht 1, Anhang A 2), daß neben den Konstruktionsdaten der gewünschten Zonenplatte auch das durch diese Zonenplatte erzeugte Schallfeld berechnet werden kann.

Zunächst werden die Radien ρ_n und die Rillentiefe R_t der Zonenplatte, die von dem Schwingerdurchmesser D_0 , der Prüffrequenz ν , dem Fokusabstand f und den Schallgeschwindigkeiten c abhängen, ermittelt.

Nach Auswahl des gewünschten Zonenplattentyps — Absorptions- oder Phasenzonenplatte — kann dann mit Hilfe der eingegebenen und der berechneten Daten die durch die Zonenplatte erzeugte Schalldruckverteilung $p_A = f(z, r)$ berechnet werden. Diese berechneten Schalldruckwerte werden in einem Plattenfile abgespeichert und können vom Zeichenprogramm „Ebene“ (s. Programmübersicht 2, Anhang A 2) oder „Raum“ (s. Programmübersicht 3, Anhang A 2) abgerufen werden.

Mit Hilfe des Zeichenprogramms ist es also möglich, den Schalldruck sowohl zweidimensional als Funktion von z (längs

der Achse) und als Funktion von r (quer zur Achse) als auch dreidimensional darzustellen, wobei die Ausgabe auf einem x, y-Schreiber erfolgt.

Bei der zweidimensionalen Darstellung ist die Möglichkeit vorhanden, den Schalldruck längs der Achse ($p_A = f(z)$) als auch quer dazu ($p_A = f(r)$) darzustellen. Außerdem können zum direkten Vergleich mehrere Kurven, also z. B. Rechnung und Messung in einem Diagramm dargestellt werden.

Die Überprüfung der Rechenprogramme erfolgte für den Sonderfall der Zonenplatte mit $n = 1$, die zur Schalldruckverteilung des Kreiskolbenschwingers führte.

2.2.5 Anwendungen

Die Leistungsfähigkeit der Programme wird am Vergleich zweier Zonenplatten-Typen mit gleicher Ringanzahl n demonstriert. Zunächst werden mit dem Programm „Frel“ die Radien der einzelnen Ringe nach den Gl. 2/9 und 2/10

$$\rho_n = \sqrt{\lambda f (2n - 1) / 2} \quad (= \text{Näherung einer cos-Platte})$$

$$\rho_n = \sqrt{\lambda f n} \quad (= \text{Näherung einer sin-Platte})$$

für $f = 40 \text{ mm}$ und $\lambda = 1,48 \text{ mm}$ ermittelt (s. Tabelle 1).

Tabelle 1

Radialen ρ_n von Zonenplatten mit sin- und cos-Näherung

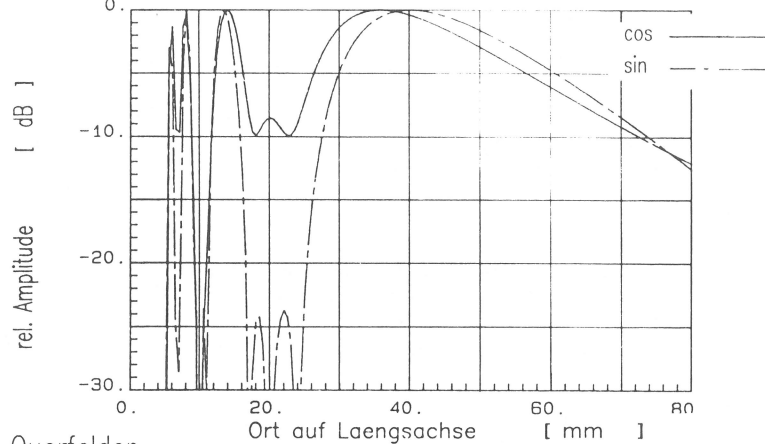
ρ_n [mm]	cos	sin
ρ_1	5,44	7,69
ρ_2	9,42	10,88
ρ_3	12,17	13,33
ρ_4	14,39	15,39
ρ_5	16,32	17,20
ρ_6	18,04	18,85
ρ_7	19,62	20,36

Mit dem gleichen Programm können für diese Werte die Schallfelder berechnet werden, die die jeweiligen Zonenplatten erzeugen. Das soll am Beispiel für $n = 3$ erfolgen. Das Programm „Frel“ erzeugt ein Datenfile, in dem die Schalldruckwerte des jeweiligen Raumpunktes abgespeichert sind. Mit Hilfe des Programmes „Ebene“ kann nun der Schalldruck in einer beliebigen Ebene längs oder quer zur Schallausbreitungsrichtung gezeichnet werden. Die Abb. 2/11 zeigt für das gewählte Beispiel die Schalldruckdarstellungen in Schallausbreitungsrichtung für $r = 0 \text{ mm}$ (oberer Bildteil) und quer zur Schallausbreitungsrichtung im jeweiligen Maximum des Längsfeldes und in den 3 dB-Abfällen vor und nach dem Schalldruckmaximum (unterer Bildteil). Die räumliche Darstellung des Schalldruckes für diesen Vergleich wird mit dem Programm „Raum“ erzeugt (Abb. 2/12).

Diese Zeichenprogramme ermöglichen eine einfache und anschauliche Auswertung berechneter und gemessener Schallfeld- und Zonenplattendaten. So wird aus Abb. 2/11 ersichtlich, daß die Schallfeldabmessungen der beiden berechneten Zonenplatten nahezu identisch sind, jedoch entsteht durch die cos-Näherung das tatsächliche Schalldruckmaximum bei einem kleineren z-Wert an der Stelle $z = f_{ak} < f$. f_{ak} wird als akustischer Fokusabstand bezeichnet. Die Verschiebung von f nach f_{ak} ist darauf zurückzuführen, daß die erste Zone nur halb so groß ist wie bei der sin-Näherung und entsprechend einen kleineren Nahfeldabstand $l_0 = D_0^2 / 4 \lambda$ besitzt. Bei geringer Ringanzahl n ist der Einfluß der inneren Zone entsprechend größer und führt zu einer Verlagerung von f nach f_{ak} .

Neben dem im Abschnitt 2.2.1 erwähnten Vorteil der erreichbaren kleineren Durchmesser der Zonenplatte (s. Tabelle 1) wird außerdem durch die cos-Näherung ein günstigeres Verhältnis des Schalldruckmaximums zu den Nebenmaxima erzielt (Beispiel Abb. 2/11: $\Delta V > 4 \text{ dB}$). Aus diesen Gründen sollen bei den weiteren Untersuchungen nur noch Zonenplatten Verwendung finden, deren Radien nach Gl. 2/9 (cos-Näherung) berechnet werden.

Laenasfelder



Querfelder

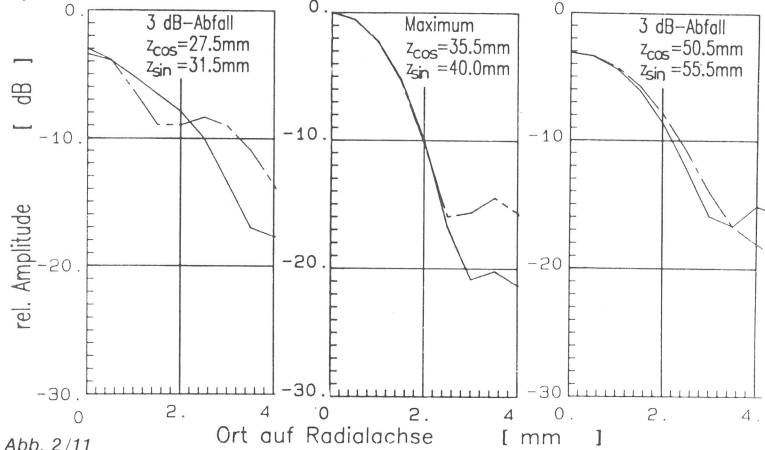


Abb. 2/11

Schallfelddarstellungen in verschiedenen Ebenen von Zonenplatten mit cos- und sin-Näherung

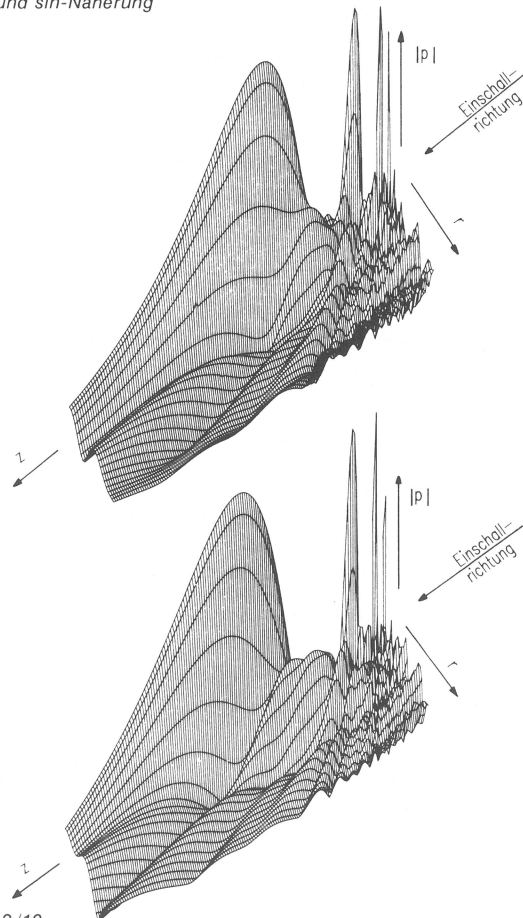


Abb. 2/12

Räumliche Schallfelddarstellung von Zonenplatten mit cos- (oben) und sin-Näherung (unten)

2.3 Ermittlung des Zusammenhanges zwischen Prüfkopf- und Schallfelddaten

Aus den bisherigen Berechnungen wird ersichtlich, daß die charakteristischen Größen des fokussierten Schallfeldes, die akustische Brennweite und die Fokusschlauchabmessungen, aus dem Schwingerdurchmesser D_0 , der Wellenlänge λ und der Brennweite f berechnet werden können, wobei die Fokusschlauchabmessungen außerdem von der Bandbreite beeinflusst werden (vgl. S. 11).

Abb. 2/13 zeigt das Schema eines fokussierenden Normalprüfkopfes mit den charakteristischen Prüfkopf- und Schallfeldgrößen. Die Bezeichnungen werden analog zu den bereits aus der Literatur [10 — 12] bekannten Größen gewählt.

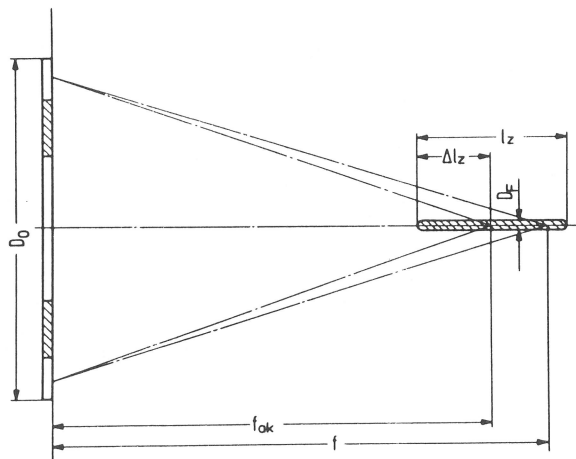


Abb. 2/13 Charakteristische Schallfeldgrößen eines Fresnelprüfkopfes

Da die Beugungsgleichung 2/16, S. 6, jedoch den direkten Schluß vom Schallfeld auf die Konstruktionsdaten der Zonenplatte nicht ermöglicht, einfache analytische Zusammenhänge dafür aus der Literatur nicht zu entnehmen waren und eine analytische Herleitung aus der Beugungsgleichung, die wahrscheinlich ebenfalls nur näherungsweise möglich wäre (vgl. Brechungslinsen [11]), zu aufwendig erscheint, werden aus einer Vielzahl von berechneten Schallfeldern Näherungsformeln für die Prüfkopfkonstruktion in folgender Weise ermittelt:

Mit dem Programm „Frelfi“ (Programmübersicht 1, Anhang A 2) werden zunächst tabellarisch für verschiedene $f < 600$ mm und $1 \leq n \leq 10$ die Schallfeldgrößen berechnet (Tabelle 2, S. 9). Zur Einschränkung des Rechenaufwandes und Verbesserung der Übersichtlichkeit wird der Schwingerdurchmesser D_0 auf die Wellenlänge λ bezogen und als Nahfeldlänge $l_0 = D_0^2 / 4 \lambda$ eingeführt. Damit ergibt sich der Schwingerdurchmesser D_0 aus den in der Tabelle 2 berechneten Werten für die jeweiligen l_0 - und λ -Werte.

Die grafische Auswertung der Tabelle 2 wird so vorgenommen, daß die charakteristischen Schallfeldgrößen und der Fokusabstand als Funktion der akustischen Brennweite mit der Ringanzahl $n = 1, \dots, 10$ als Parameter dargestellt werden (Abb. 2/14 — 2/18). Es wurde also ein Zusammenhang zwischen den Schallfeldgrößen und Konstruktionsdaten der Zonenplatte, wie es für den praktischen Einsatz dieser Prüfköpfe erforderlich ist, hergestellt.

Der Zusammenhang zwischen Fokusdurchmesser und akustischer Brennweite (Abb. 2/16) ähnelt Parabeln, während alle anderen Zusammenhänge linear sind, so daß folgende Ansätze gemacht wurden:

$$f = C \cdot f_{ak}$$

$$l_z \text{ bzw. } \Delta l_z = C \cdot f_{ak}$$

$$D_F = C \cdot \sqrt{f_{ak}}$$

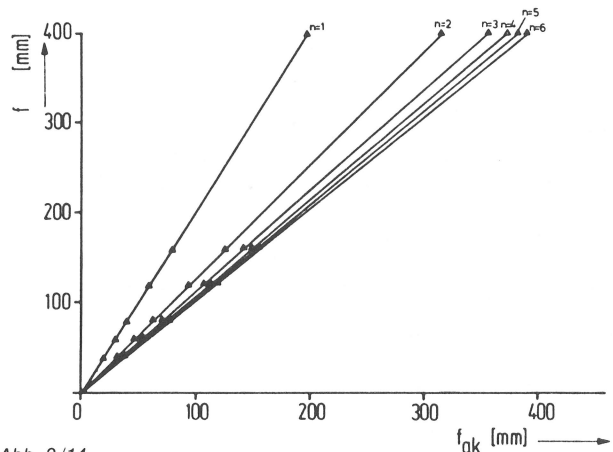


Abb. 2/14 Brennweite f als Funktion der akustischen Brennweite f_{ak}

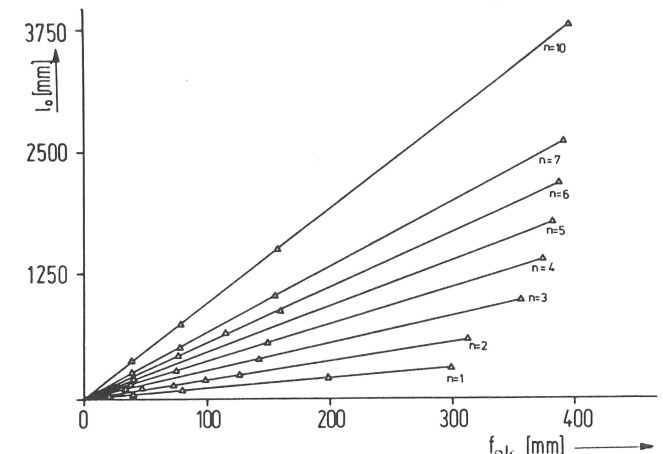


Abb. 2/15 Nahfeldlänge $l_0 = D_0^2 / 4 \lambda$ als Funktion der akustischen Brennweite f_{ak}

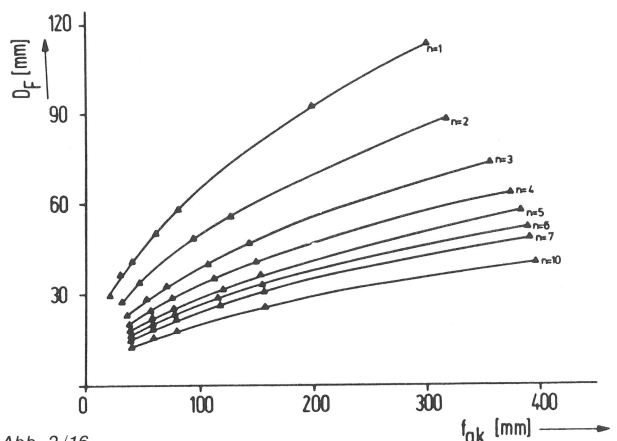


Abb. 2/16 Fokusdurchmesser D_F als Funktion der akustischen Brennweite f_{ak}

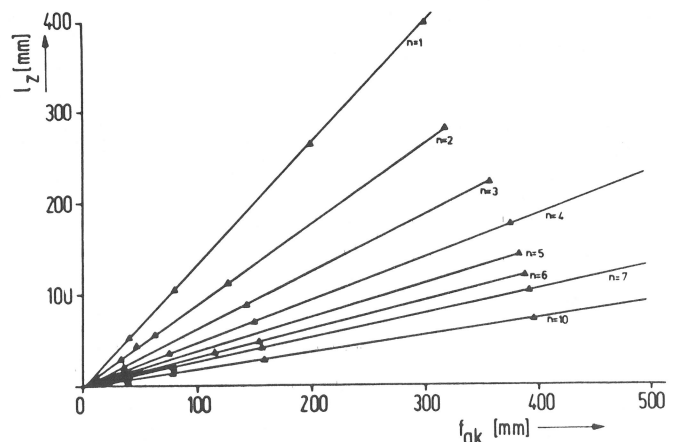


Abb. 2/17 Fokuslänge l_z als Funktion der akustischen Brennweite f_{ak}

n	f	20	40	60	80	100	120	160	200	400	600
		1	f _{ak}	10,00	20,00	30,00	40,00	50,00	60,00	80,00	100,00
D _F	2,06		2,91	3,56	4,11	4,60	5,04	5,82	6,50	9,20	11,26
l _z	13,26		26,58	39,88	53,18	66,46	79,77	106,37	132,98	265,98	398,94
Δl _z	3,32		6,65	10,00	13,32	16,66	19,99	26,65	33,30	66,60	99,92
f'	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
l _o	10		20	30	40	50	60	80	100	200	300
2	f _{ak}	16,00	32,00	47,50	63,50	80,00	95,50	127,00	159,00	318,00	477,00
	D _F	1,97	2,79	3,40	3,93	4,41	4,82	5,56	6,33	8,80	10,77
	l _z	14,00	28,00	42,01	56,01	70,04	84,02	112,03	140,05	280,14	420,19
	Δl _z	4,57	9,14	13,20	17,77	22,82	26,90	35,53	44,66	89,29	133,96
	f'	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53
	l _o	30	60	90	120	150	180	240	300	600	900
3	f _{ak}	18,00	35,50	53,50	71,50	89,00	107,00	143,00	178,50	357,00	535,00
	D _F	1,65	2,31	2,84	3,28	3,66	4,01	4,64	5,18	7,33	8,97
	l _z	11,12	22,26	33,39	44,52	55,65	66,77	89,04	111,28	222,60	333,88
	Δl _z	4,06	7,62	11,67	15,73	19,29	23,36	31,47	39,10	78,17	116,77
	f'	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36
	l _o	50	100	150	200	250	300	400	500	1000	1500
4	f _{ak}	18,50	37,50	56,00	75,00	94,00	112,50	150,00	187,00	374,50	561,50
	D _F	1,42	2,02	2,47	2,86	3,20	3,50	4,05	4,52	6,39	7,83
	l _z	8,85	17,69	26,55	35,39	44,25	53,09	70,79	88,48	176,89	265,47
	Δl _z	3,12	6,74	9,86	13,49	17,11	20,23	26,98	33,22	66,93	100,15
	f'	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27
	l _o	70	140	210	280	350	420	560	700	1400	2100
5	f _{ak}	19,00	38,50	57,50	76,50	96,00	115,00	153,50	191,50	383,50	575,00
	D _F	1,27	1,82	2,22	2,56	2,86	3,14	3,62	4,05	5,73	7,01
	l _z	7,23	14,46	21,70	29,93	36,15	43,40	57,68	72,33	144,59	216,91
	Δl _z	2,71	5,93	8,63	11,36	14,56	17,27	23,23	28,63	57,83	86,48
	f'	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21
	l _o	90	180	270	360	450	540	720	900	1800	2700
6	f _{ak}	19,50	39,00	58,50	77,50	97,00	116,50	155,50	194,00	388,50	583,00
	D _F	1,17	1,66	2,03	2,33	2,61	2,86	3,31	3,69	5,22	6,40
	l _z	6,07	12,15	18,23	24,31	30,38	36,46	48,62	60,77	121,51	182,27
	Δl _z	2,59	5,18	7,78	9,87	12,46	15,06	20,25	24,93	50,41	75,87
	f'	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18
	l _o	110	220	330	440	550	660	880	1100	2200	3300
7	f _{ak}	19,50	39,00	58,50	78,50	98,00	117,50	156,50	196,00	391,50	587,00
	D _F	1,08	1,52	1,87	2,16	2,42	2,65	3,05	3,42	4,83	5,91
	l _z	5,21	10,44	15,68	20,90	26,12	31,34	41,79	52,24	104,44	156,65
	Δl _z	2,14	4,29	6,44	9,09	11,23	13,38	17,67	22,47	44,49	66,50
	f'	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
	l _o	130	260	390	520	650	780	1040	1300	2600	3900
8	f _{ak}	19,50	39,50	59,00	79,00	98,00	118,00	157,00	197,00	393,00	590,00
	D _F	1,00	1,43	1,75	2,02	2,25	2,47	2,85	3,19	4,51	5,53
	l _z	4,57	9,14	13,71	18,29	22,86	27,43	36,58	45,73	91,43	137,17
	Δl _z	1,80	4,12	5,93	8,23	9,54	11,86	15,48	20,10	39,25	59,33
	f'	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13
	l _o	150	300	450	600	750	900	1200	1500	3000	4500
9	f _{ak}	19,50	39,50	59,00	79,00	99,00	118,00	158,00	197,00	395,00	592,00
	D _F	0,94	1,34	1,64	1,90	2,13	2,32	2,69	3,00	4,25	5,20
	l _z	4,08	8,12	12,19	16,24	20,31	24,38	32,49	40,62	81,23	121,84
	Δl _z	1,55	3,59	5,14	7,18	9,24	10,29	14,38	17,50	36,00	53,51
	f'	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12
	l _o	170	340	510	680	850	1020	1360	1700	3400	5100
10	f _{ak}	20,00	39,50	59,50	79,00	99,00	119,00	158,50	198,00	396,00	594,00
	D _F	0,91	1,27	1,56	1,80	2,01	2,21	2,55	2,85	4,03	4,93
	l _z	3,65	7,30	10,96	14,61	18,25	21,92	29,22	36,50	73,04	109,57
	Δl _z	1,83	3,17	5,02	6,36	8,19	10,03	13,21	16,42	32,79	49,17
	f'	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
	l _o	190	380	570	760	950	1140	1520	1900	3800	5700

Tabelle 2:
Berechnete Schallfeldgrößen

Definitionen:

f Angenommener Abstand zwischen letztem Schalldruckmaximum und Zonenplatte

f_{ak} akustischer Fokusabstand = Abstand des letzten Schalldruckmaximums von der Zonenplatte;
sin-Zonenplatte: f_{ak} = f,
cos-Zonenplatte: f_{ak} < f
(vgl. Abschnitt 2.2.5)

D_F Fokusschlauchdurchmesser = Abstand zwischen den beiden Punkten quer zur Schallausbreitungsrichtung, in denen ein Schalldruckabfall um 3 dB bzgl. des Schalldruckmaximums erfolgt ist.

l_z Fokusschlauchlänge = Abstand zwischen den beiden Punkten auf der akustischen Achse, an denen ein Schalldruckabfall um 3 dB bzgl. des Schalldruckmaximums erfolgt ist.

Δl_z Abstand zwischen Schalldruckmaximum und prüfkopfnahem 3dB-Schalldruckabfall auf der akustischen Achse

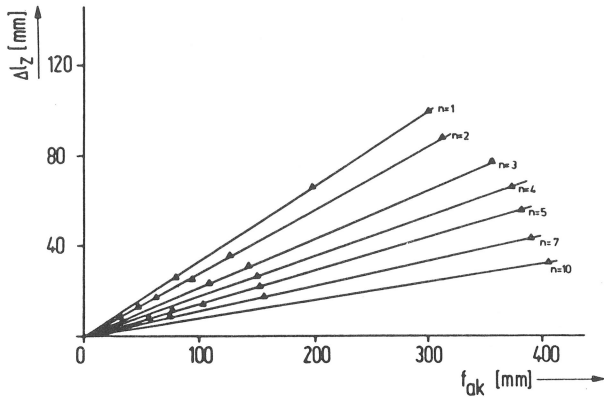


Abb. 2/18
Abstand des akustischen Fokus zum vorderen 3 dB-Abfall Δl_z als Funktion der akustischen Brennweite f_{ak}

Das Problem bei der analytischen Erfassung dieser Zusammenhänge besteht deshalb hauptsächlich in der Ermittlung der Proportionalitätskoeffizienten C in einer allgemeinen Form, durch welche die von der Zonenanzahl n abhängigen Kurvenscharen erfaßt werden.

Der Proportionalitätskoeffizient C jeder Kurve läßt sich als Quotient der Funktionswerte, d. h. als Anstieg der jeweiligen Kurve darstellen. Für jede Kurvenschar erhält man also eine Schar von Proportionalitätskoeffizienten. Für die Abhängigkeit dieser Proportionalitätskoeffizienten von der Ringanzahl läßt sich durch eine Regressionsrechnung näherungsweise ein analytischer Ausdruck finden. Aus dieser Formel kann dann an jeder Stelle ein sogenannter „geschätzter Proportionalitätsfaktor \bar{C} “ errechnet werden. Durch Vergleich von \bar{C} mit C ergibt sich der Grad der Übereinstimmung.

Aus der Tabelle 2 und den Kurvenscharen der Abb. 2/14 — 2/18 lassen sich mit

$$\begin{aligned} C_{\text{Index}} &= \text{Proportionalitätsfaktor} \\ \bar{C}_{\text{Index}} &= \text{geschätzter Proportionalitätsfaktor} \end{aligned}$$

folgende funktionale Zusammenhänge ableiten:

1. Fokusabstand f

$$f = C_{ak} \cdot f_{ak}$$

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
C_{ak}	2,00	1,25	1,12	1,07	1,04	1,03	1,02	1,02	1,01	1,01
\bar{C}_{ak}	2,00	1,25	1,11	1,06	1,04	1,03	1,02	1,02	1,01	1,01

Dieser Koeffizient läßt sich durch die Beziehung

$$\bar{C}_{ak} = 1 + 1/n^2$$

in sehr guter Näherung mit einem Fehler $F \leq 1\%$ angeben, so daß

$$f = (1 + 1/n^2) f_{ak} \quad (2/19)$$

wird.

Bei einem Vergleich des Fokusabstandes f nach Gl. 2/19 mit dem optischen [12] oder geometrischen [18] Fokusabstand *) f_{opt} ist zu beachten, daß bei der Ermittlung von f_{opt} der Beugungseinfluß der Linsenbegrenzung unberücksichtigt bleibt. Es wird also eine rein geometrische Berechnung ausgeführt. Dagegen wird bei der Ermittlung des Fokusabstandes der Zonenplatten die Beugung berücksichtigt. Da aber die Auswirkung in einer Verkürzung des Fokusabstandes bei beiden Fokussierungsarten besteht, ist ein Vergleich berechtigt, der durch Einführung des Fokussierungsfaktors f' für die Zonenplatte in Analogie zur Brechungslinse einfach ausführbar ist.

*) Nach [12, 13] ist $f_{opt} = f_{geo}$ durch Gl. 2/26 gegeben.

2. Fokussierungsfaktor f'

Der Fokussierungsfaktor ist als das Verhältnis des akustischen Fokusabstandes eines fokussierten Schallfeldes zum Nahfeldabstand l_0 definiert [10]:

$$f' = f_{ak} / l_0 \quad (2/20)$$

Da sich aus der Beziehung 2/7, S. 4, für

$$f = l_0 / (n - 1/2) \quad (2/21)$$

ergibt, kann man mit Gl. 2/19 den Fokussierungsfaktor (Gl. 2/20) als

$$f' = 2 n^2 / ((2 n - 1) (n^2 + 1)) \quad (2/22)$$

$$f' \approx 1/n$$

angeben. Der durch die Näherung auftretende relative Fehler ist

$$F = \left| \frac{\text{Näherungswert} - \text{wahrer Wert}}{\text{Näherungswert}} \right| \cdot 100 [\%] \leq 6\% \quad (2/23)$$

und verringert sich mit wachsender Ringanzahl n . Für den akustischen Fokusabstand ergibt sich aus den Gl. 2/20 und 2/22

$$f_{ak} = l_0 \cdot 2 n^2 / ((2 n - 1) (n^2 + 1)) \quad (2/24)$$

$$f_{ak} \approx l_0 / n$$

Mit der Näherung 2/22 folgt aus Gl. 2/19

$$f \approx (1 + f'^2) \cdot f_{ak} \quad (2/25)$$

Durch einen grafischen Vergleich von Gl. 2/25 mit dem optischen Fokusabstand (nach [12])

$$f_{opt} \approx \frac{(1 - 0,82 f' + 0,43 f'^2)}{1 - f'} \cdot f_{ak} \quad (2/26)$$

läßt sich zeigen, daß für gleiche Fokussierungsfaktoren beide Ausdrücke näherungsweise identisch sind. Die auftretende relative Abweichung bezüglich f beträgt

$$F = 1 - \frac{f}{f_{opt}} \cdot 100 [\%]$$

$$F = \frac{f'}{1 - f'} \cdot (0,18 - 0,57 f' + f'^2)$$

Die relative Abweichung bei $f' = 0,5$ beträgt 14,5 % und fällt mit Verringerung von f' .

3. Fokusedurchmesser D_F

Es wird der Ansatz

$$D_F = C_D \cdot f_{ak}^{0,5}$$

gemacht, da sich die Kurven in Abb. 2/16 durch Parabeln annähern lassen.

Aus der folgenden Tabelle

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
C_D	0,65	0,49	0,39	0,33	0,29	0,26	0,24	0,23	0,21	0,20
\bar{C}_D	0,66	0,47	0,38	0,33	0,30	0,27	0,25	0,23	0,22	0,21

läßt sich der Proportionalitätsfaktor durch die Beziehung

$$\bar{C}_D = 0,65 n^{-0,5}$$

mit einem Fehler $\leq 2\%$ gut annähern. Dieser Ansatz wird deshalb verwendet, da er auf den für Brechungsinsen gebräuchlichen Ausdruck

$$D_F = \frac{\lambda f_{ak}}{D_0} \quad (2/27)$$

führt (vgl. [12]). Der Fokusschlauchmesser kann somit durch

$$D_F \approx 0,53 \sqrt{f_{ak} \cdot \lambda / n} \quad (2/28)$$

beschrieben werden. Mit der Näherung $n \approx l_0 / f_{ak}$ aus Gl. 2/24 folgt aus Gl. 2/28

$$D_F \approx 1,06 \cdot \frac{\lambda f_{ak}}{D_0} \approx 0,26 \cdot \frac{D_0}{n} \quad (2/29)$$

Diese Beziehung entspricht mit einer Abweichung von 6 % — das entspricht dem relativen Fehler der Näherungs-Gl. 2/22 — dem für eine Brechungslinse errechneten Fokusschlauchmesser.

4. Fokusschlauchlänge l_z

Mit dem Ansatz

$$l_z = C_l \cdot f_{ak}$$

läßt sich C_l aus der Tabelle

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
C_l	1,33	0,88	0,62	0,47	0,38	0,31	0,27	0,23	0,21	0,18
\bar{C}_l	1,33	0,80	0,57	0,44	0,36	0,31	0,27	0,24	0,21	0,19

durch einen Ausdruck der Gestalt

$$\bar{C}_l = 4 / (2n + 1)$$

so annähern, daß der größte relative Fehler $F \leq 10\%$ ist, wobei sich mit wachsender Ringanzahl n der Fehler verringert.

Für die Fokusschlauchlänge folgt damit

$$l_z \approx 4 f_{ak} / (2n + 1) \quad (2/30)$$

Ein Vergleich mit der aus der Literatur [12] bekannten Form für die Fokusschlauchlänge von Brechungslinsen

$$l_z = l_0 \cdot f^2 / (1 + f^2) \quad (2/31)$$

zeigt, daß diese Gleichung unter Verwendung der Gl. 2/22 und 2/24 in die Form 2/30 überführbar ist. Bei gleichen Fokussierungsfaktoren besteht demnach kein Unterschied zwischen den Fokusschlauchlängen von Brechungslinsen und Fresnelschen Zonenplatten.

5. Abstand des akustischen Fokus zum vorderen 3dB-Abfall Δl_z

$$\Delta l_z = C_{\Delta l} \cdot f_{ak}$$

Der Proportionalitätsfaktor läßt sich hier durch eine Hyperbelfunktion der Form

$$\bar{C}_{\Delta l} = \frac{1}{n + 2}$$

mittels Regressionsrechnung, die mit einem Rechner durchführbar ist, annähern.

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$C_{\Delta l}$	0,33	0,28	0,22	0,18	0,15	0,13	0,11	0,10	0,09	0,08
$\bar{C}_{\Delta l}$	0,31	0,26	0,22	0,19	0,16	0,14	0,12	0,10	0,09	0,07

Der dabei entstehende relative Fehler ist $F \leq 3\%$. Für Δl_z folgt damit

$$\Delta l_z \approx \frac{1}{n + 2} \cdot f_{ak} \quad (2/32)$$

Die entsprechende, aus der Literatur [12] bekannte Näherungsformel für Brechungslinsen lautet

$$\Delta l_z \approx \frac{l_z}{4} [1 + (1 - f)^2] \quad (2/33)$$

Beide Formeln sind vergleichbar, wenn in Gl. 2/32 für f_{ak} die Gl. 2/30 eingesetzt wird. Es folgt damit

$$\Delta l_z \approx \frac{l_z}{4} \cdot \frac{2n + 1}{n + 2} \quad (2/34)$$

Die relative Abweichung beider Näherungsgleichungen ist nach Gl. 2/23 $F \leq 5\%$, so daß erwartungsgemäß auch bei dieser Schallfeldgröße Δl_z eine gute Übereinstimmung zwischen Zonenplatten und Brechungslinsen besteht.

2.4 Einfluß von Bandbreite und Anregungsfrequenz

2.4.1 Gültigkeit der Betrachtungsweise bei mehrfrequenter Anregung

Bei allen bisherigen Überlegungen wurde ein monochromatisches Wellenfeld vorausgesetzt. Der Prüfkopf müßte dazu mit einem monochromatischen, also unendlich langen Wellenzug angeregt werden.

Diese Art der Anregung ist aber in der Ultraschall-Prüftechnik nicht möglich, da der Prüfkopf auch als Empfänger arbeiten soll. Der Sendeimpuls muß also spätestens dann beendet sein, wenn der reflektierte Impuls den Prüfkopf erreicht. In der Praxis muß der Impuls kürzer sein, um ein ausreichendes Auflösungsvermögen zu erzielen.

Ein solcher Impuls kann aber nach [35] als Überlagerung einer Vielzahl von monochromatischen Wellen aufgefaßt werden. Das führt im Falle einer nichtmonochromatischen Schallerregung (Impulsbetrieb) zu einem Schallfeld, das sich aus einer Überlagerung aller zugehörigen monochromatischen Komponenten $p_\nu(r, z)$ zusammensetzt, also

$$p(r, z, t) = \int_{\nu = -\infty}^{\nu = +\infty} p_\nu(r, z) \cdot e^{-i2\pi\nu t} d\nu \quad (2/35)$$

Darin bedeutet ν die jeweilige Frequenz der Schallschwingung, wobei für jede dieser monochromatischen Wellen die Rayleigh-Sommerfeld-Gleichung (Anhang A 1) gilt.

Zu beachten ist dabei, daß die durch eine bestimmte Bandbreite gegebene Amplitudenabnahme in die Überlagerung eingeht. Das bedeutet, daß die Frequenz mit der größten Amplitude das Schallfeld am stärksten beeinflusst.

Bedingt durch die sehr aufwendige Berechnung des Schallfeldes bei impulsförmiger Anregung wurde im Rahmen dieser Arbeit von der Berechnung Abstand genommen, zumal schon an anderer Stelle [36] durch eingehende Untersuchungen festgestellt wurde, daß erst bei Bandbreiten $> 40\%$ ein merklicher Einfluß eintritt. Wegen der Wirkungsweise der Fresnelschen Zonenplatte ist die Anregung mit relativ langen Impulsen, die Bandbreiten von $< 10\%$ besitzen, erforderlich. Ein Einfluß der Bandbreite auf die Meßergebnisse ist deshalb nicht zu erwarten.

2.4.2 Variation der Brennweite

Ein Vorteil dieser Art der Fokussierung ist, wie in der Einleitung bereits erwähnt, die relativ einfache Möglichkeit der Variation der Brennweite. Deutlich sichtbar wird dies durch eine andere Darstellung von Gleichung 2/7:

$$f = 2\nu \cdot \frac{\rho_n^2}{c(2n - 1)} \quad (2/36)$$

mit f = Fokusabstand
 ν = Frequenz
 ρ_n = Ringradius
 n = Anzahl der Ringe
 c = Schallgeschwindigkeit

$\nu_0 = 4$ MHz
 $f = 80$ mm
 $n = 4$
 $D_0 = 40$ mm.

Daraus ist zu entnehmen, daß der Fokusabstand f auf zwei voneinander unabhängige Weisen verändert werden kann, nämlich durch Variation der Anregungsfrequenz ν oder durch Variation der Ringanzahl n . Jede Veränderung der Ringanzahl ist jedoch mit der Fertigung einer neuen Zonenplatte verbunden. Auf die praktische Bedeutung dieses Beispiels wird später noch eingegangen (S. 14).

Die elegantere Art der Fokusverschiebung ist die Variation der Frequenz, da diese dem Fokusabstand direkt proportional ist. Dadurch erhält auch die Bandbreite eine praktische Bedeutung, denn es bildet sich ein von der Bandbreite abhängiger Fokusschlauch aus, während bei monochromatischer Anregung der Fokusschlauch ausschließlich von der (endlichen) Zonenanzahl bestimmt wird. Dieser Effekt ließe sich in der praktischen Prüfung dahingehend ausnutzen, daß die durch breitbandige Impulse hervorgerufene Fokusschlauchverlängerung zur Reduzierung des Prüfaufwandes verwendet wird, allerdings mit dem Nachteil, daß die Fokussierungseigenschaften verschlechtert werden.

Da der Fokusabstand proportional zur Frequenz ist — auf diesen Zusammenhang wurde bereits in [16, 23] hingewiesen — lassen sich trotz schmalbandiger Anregung durch Variation der Anregungsfrequenz große Prüfbereiche erfassen. Diese Verschiebung V des Fokusbereiches läßt sich geometrisch wie in Abb. 2/19 dargestellt erklären. Eine Erhöhung der Frequenz ν hat eine Verringerung der Wellenlänge λ zur Folge, so daß die Interferenzbedingung erst im Punkt f_2 , also prüfkopferweiter, erfüllt ist. Entsprechend führt eine Verringerung der Frequenz zu einer Verschiebung nach f_1 .

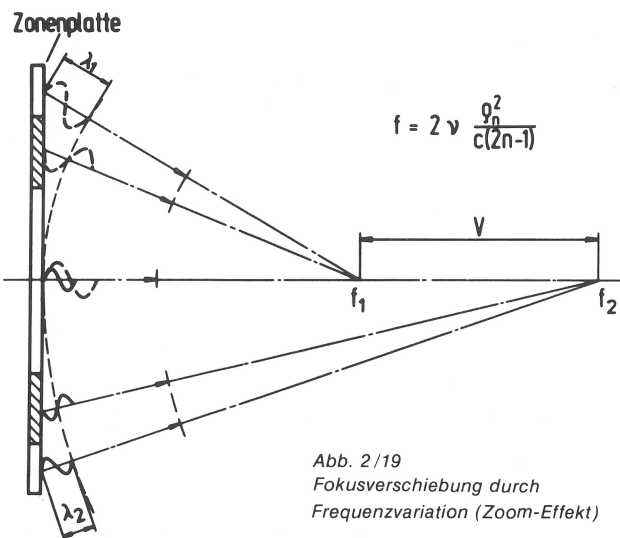


Abb. 2/19
 Fokusverschiebung durch
 Frequenzvariation (Zoom-Effekt)

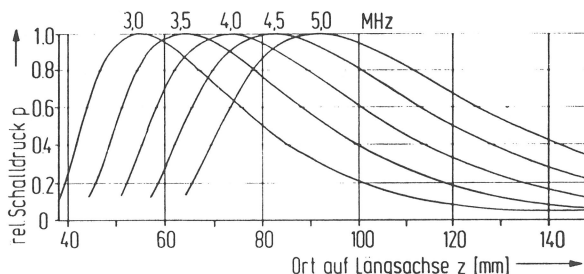


Abb. 2/20
 Gerechnete Fokusverschiebung in Stahl
 $(3 \leq \nu \leq 5$ MHz, $n = 4$, $\nu_0 = 4$ MHz, $D_0 = 40$ mm)

Abb. 2/20 zeigt einen nach der Beziehung 2/36 ermittelten Bereich der Brennpunktverschiebung eines Prüfkopfes mit den Daten

Die Frequenzen wurden von 3 bis 5 MHz in Schritten von 0,5 MHz variiert. Der Verschieberegion der Schalldruckmaxima in Stahl liegt hier zwischen 54 mm und 91 mm, d. h. $V = 37$ mm.

Praktisch ist eine Variation der Prüffrequenz aber nur innerhalb des Prüfkopfspektrums möglich, so daß, um einen möglichst großen „Zoombereich“ zu erhalten, möglichst hochbedämpfte, also sehr breitbandige Prüfköpfe für diese Art der Prüfkopfanregung verwendet werden sollten.

2.5 Aufbau des fokussierenden Prüfkopfes

2.5.1 Prüfkopfmaterialeien

Die hier beschriebenen fokussierenden Prüfköpfe bestehen im Prinzip aus einem Normalprüfkopf, d. h. einem Prüfkopf, dessen Schallfeldachse senkrecht zur Prüffläche steht, mit angekoppelter Fresnel'scher Zonenplatte. Schwierigkeiten bei der Konzipierung entstehen z. B. bei der Phasenzonenplatte durch die von unterschiedlichen Wellenwiderständen hervorgerufenen Reflexionen, da praktisch keine Materialien mit gleichen Wellenwiderständen, aber unterschiedlichen Schallgeschwindigkeiten zur Verfügung stehen.

Versuche mit festen metallischen Materialien, z. B. Aluminium für die Zonenplatte und einer Zinn-Bleilegierung für die Rillen einer Phasenzonenplatte (Abb. 2/21), erwiesen sich als ungeeignet, denn bei der Herstellung traten immer wieder Bereiche auf, bei denen keine einwandfreie Verbindung mit dem Aluminium erzielt wurde.

Außerdem entsteht durch Ausfüllen der Rillen mit einem festen Material eine weitere Grenzfläche zwischen Schwinger und Zonenplatte, die zusätzliche Reflexionen, also Störerechos, hervorruft. Diese Echos können dazu führen, daß der Bereich, in dem Störungen aus der Zonenplatte auftreten, vergrößert wird, so daß die Durchführung von prüfkopfnahen Messungen unter Umständen eingeschränkt wird. Deshalb ist es zweckmäßig, zum Füllen der Rillen eine Flüssigkeit zu verwenden, die gleichzeitig als Ankopplung für die Piezokeramik dient. Als günstigste Materialkombination ergab sich nach Tabelle 3 Plexiglas mit Glycerin. Dies wurde durch Messungen bestätigt.

Tabelle 3
 Kennwerte ausgewählter Werkstoffe nach [7], S. 609

Werkstoffe	Dichte ρ' [g/cm ³]	Schallgeschwindigkeit c [m/s]	Schallwellenwiderstand Z [10 ⁶ kg/m ² s]
Glycerin	1,3	1 920	2,5
Motorenöl	0,87	1 740	1,5
Wasser	1,0	1 480	1,5
Aluminium	2,7	6 320	17
Blei	11,4	2 160	25
Grauguß	7,2	4 600	33
Guß (austen.) *	7,9	5 730	45
Gußeisen	6,9	3 500	24
Plexiglas	1,18	2 730	3,2
Polyamid 6.6 *	1,14	2 540	2,9
Polyamidimid *	1,39	2 700	3,8
Polyacetal *	1,42	2 360	3,4
Polycarbonat *	1,2	2 160	2,6
Polyethylen	0,94	2 340	2,2
Polystyrol *	1,1	2 170	2,4
Polyimid (Vespel) *	1,43	2 450	3,5
Polyvinylchlorid	1,4	2 400	3,4
Stahl	7,85	5 920	46,5
Stahl (austen., 1.4948) *	7,9	5 750	45,4
Zinn	7,3	3 320	24

* eigene Messungen

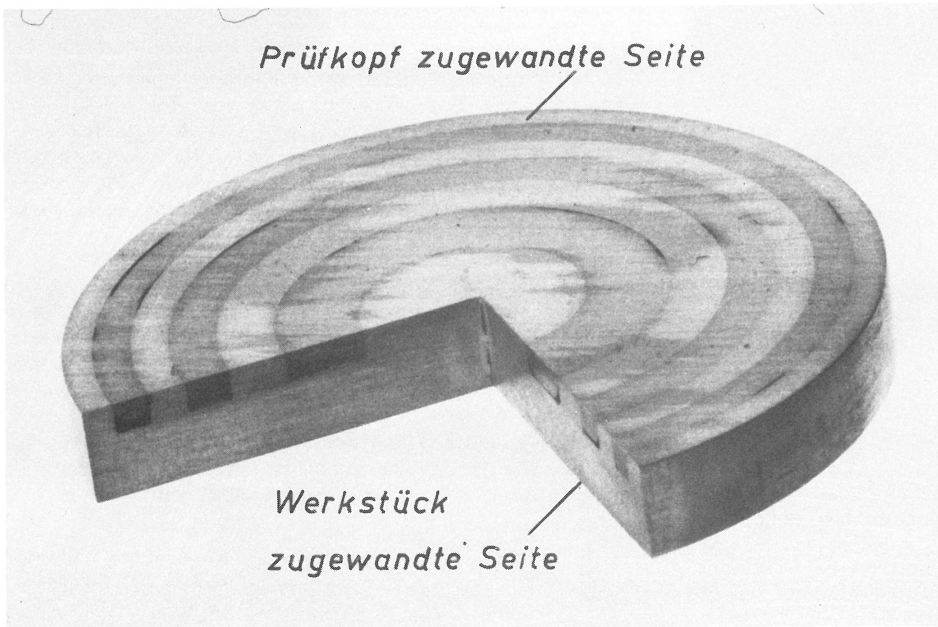


Abb. 2/21
Phasenzonenplatte aus Aluminium mit einer Zinn-Bleilegierung für die Rillen

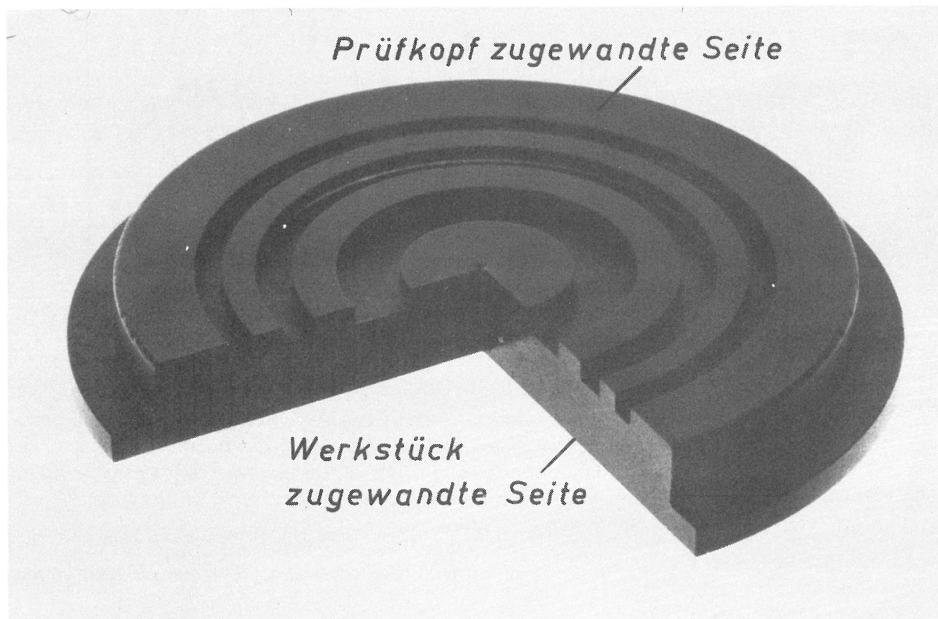


Abb. 2/22
Absorptionszonenplatte

2.5.2 Herstellung von Absorptions- und Phasenzonenplatten

Wie im Abschnitt 2.2.2 bereits erläutert wurde, kann die Zonenplatte sowohl als Absorptions- wie auch als Phasenzonenplatte ausgebildet werden. Das Beugungsgitter einer Absorptionsplatte erhält man dadurch, daß Ringe vom Radius ρ_n (Gl. 2/9) mit einer Tiefe R_t so in die Zonenplatte eingestochen werden, daß eine akustische Entkopplung auftritt und damit schalldurchlässige Zonen entstehen (Abb. 2/22).

Werden diese schalldurchlässigen Zonen so verändert, daß sie ebenfalls schalldurchlässig werden, jedoch gegenüber den benachbarten Ringen jeweils eine Phasenverschiebung von 180° bewirken, erhält man eine Phasenzonenplatte. Bei dem beschriebenen Zonenplatten-Aufbau und den vorangegangenen Versuchen wird das dadurch erreicht, daß die ausgestochenen Ringe der aus Plexiglas bestehenden Zonenplatte mit Glycerin ausgefüllt werden. Die Rillentiefe R_t , die eine 180° -Phasenverschiebung hervorrufen soll, muß dann der Beziehung 2/15, S. 6, genügen.

Die an den Schwinger angekoppelte Zonenplatte stellt eine Vorlaufstrecke dar. Aufgrund der unterschiedlichen Schallwel-

lenwiderstände von Schwinger, Zonenplatte und Prüfwerkstoff (Abb. 2/23) treten in der Zonenplatte Reflexionen auf, die zur Verminderung der Schalldurchlässigkeit führen können.

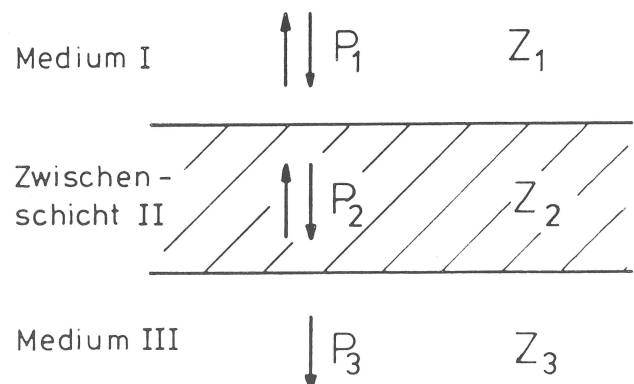


Abb. 2/23
Schalldurchlässigkeit einer Zwischenschicht II

Nach [37] kann die Durchlässigkeit einer solchen Zwischenschicht II bestimmt werden durch

$$D = \frac{2 m / (m + q)}{\sqrt{1 + \frac{(m^2 - 1)(q^2 - 1)}{(m + q)^2} \sin^2 kd}} \quad (2/37)$$

mit $m = Z_3/Z_2$ und $q = Z_1/Z_2$.

Die Abhängigkeit der Durchlässigkeit vom d/λ -Verhältnis zeigt Abb. 2/24.

Danach besitzt eine Plexiglaszonenplatte, die an Stahl angekoppelt wird ($m = 14,4$, $q = 6,4$), ihre maximale Durchlässigkeit unter der Bedingung

$$d = n \frac{\lambda}{2} \quad \text{mit } n = 0, 1, 2, \dots \quad (2/38)$$

Wird die Plexiglaszonenplatte zur Prüfung in Wasser verwendet ($m = 0,47$, $q = 6,4$), so tritt die maximale Durchlässigkeit bei

$$d = \frac{\lambda}{4} \cdot (2n + 1) \quad \text{mit } n = 0, 1, 2, \dots \quad (2/39)$$

auf. Die Ergebnisse der Gl. 2/38 und 2/39 stehen in Einklang mit [38].

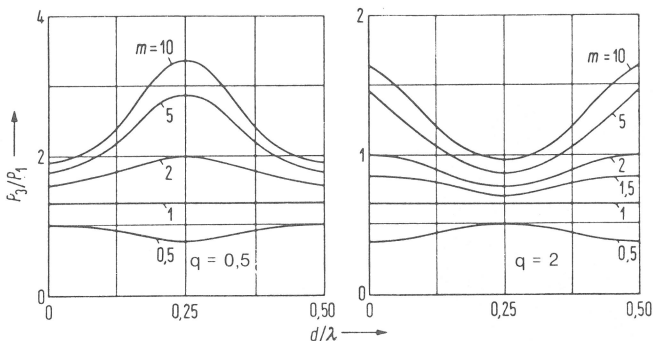


Abb. 2/24
Durchlässigkeit D als Funktion des d/λ -Verhältnisses nach [37]

Unter Einbeziehung aller o. a. Überlegungen konnte eine Lösung für den Prüfkopfaufbau mit Absorptions- bzw. Phasenzonenplatte gefunden werden, die sich durch Einfachheit und hohe Wirtschaftlichkeit auszeichnet. In Abb. 2/25 wird ein solcher fokussierender Prüfkopf dargestellt, der aus einem im Handel erhältlichen Normalprüfkopf mit angekoppelter und somit auswechselbarer Zonenplatte besteht.

Diese auswechselbaren Zonenplatten ermöglichen die Fokussierung des Schallfeldes eines Normalprüfkopfes bei konstanter Frequenz in verschiedenen Tiefen, da der Fokusabstand f nach

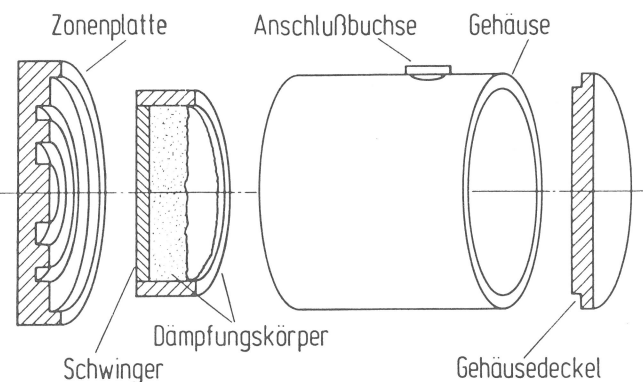


Abb. 2/25
Fokussierender Normalprüfkopf mit vorgesetzter Zonenplatte

Gl. 2/36, S. 11, bei gleichbleibender Schwingergöße nur von der Anzahl der Zonen abhängt.

Aus den Zusammenhängen von Rillentiefe, Plattendicke und Wellenlänge (Gl. 2/15, S. 6 und 2/38 bzw. 2/39, S. 14) wird ersichtlich, daß bei der beschriebenen Bauweise der fokussierende Prüfkopf mit Phasenzonenplatte nur für eine bestimmte vorgegebene Frequenz einwandfrei arbeiten kann und sich die im Abschnitt 2.4.2 beschriebene Brennweitenverschiebung nicht durchführen läßt.

Um den Effekt der Brennweitenverschiebung bei Durchstimmung der Frequenz ausnutzen zu können, muß infolge des Zusammenhanges zwischen Zonenplattendicke und Wellenlänge nach den Gl. 2/38 bzw. 2/39 die Dicke der Zonenplatte 0 mm betragen. Dies ist aber nur möglich, wenn sie in den Schwinger integriert ist. Auf sehr einfache Art läßt sich das erreichen, indem man in die Elektrode des Schwingers Kreise der Radien ρ_n (Gl. 2/9) einritz. Zu beachten ist, daß diese Kreise rings untereinander elektrisch vollständig isoliert sind.

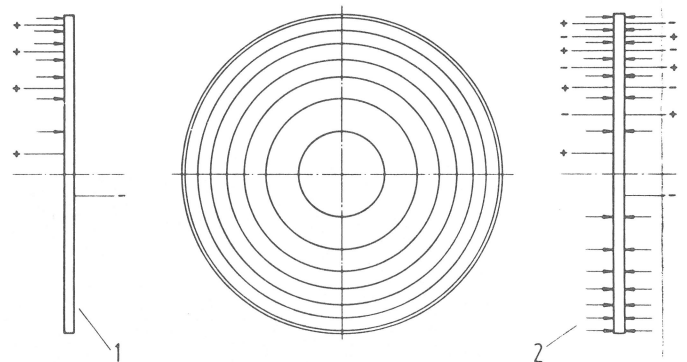


Abb. 2/26
Anregung einer integrierten Zonenplatte als Absorptions- (1) bzw. Phasenzonenplatte (2)

Durch Anregung jedes zweiten Ringes erhält man eine Absorptionszonenplatte, während eine Phasenzonenplatte, bei der benachbarte Ringe eine 180° -Phasenverschiebung bewirken müssen, durch elektronische Ansteuerung zu ermöglichen ist. Diese Ansteuerung kann

1. durch zwei um 180° phasenverschobene Sendepulse oder
2. durch eine Vertauschung der Anregungsfläche bei jedem zweiten Ring entsprechend Abb. 2/26 erfolgen, da der Schwinger polarisiert ist. Das erfordert aber, daß anders als bei der Absorptionszonenplatte beide Seiten des Schwingers eingeritzt werden müssen. Der Vorteil ist, daß die Phasenverschiebung von 180° unabhängig von der Frequenz ist.

Da es das Ziel ist, nur handelsübliche Ultraschall-Gerätetechnik zu verwenden, kommt nur der unter 2. beschriebene Aufbau in Frage. Einen nach diesen Kriterien aufgebauten Prüfkopf zeigt Abb. 2/27.

Zwar läßt sich durch phasenschiebende Bauelemente (L-C-Glieder) oder Transformatoren, die im Prüfkopf zu integrieren sind, die erforderliche Phasenverschiebung von 180° erreichen, aber durch ihre Frequenzabhängigkeit und den wesentlich größeren Aufwand ist ihr Einsatz nicht zweckmäßig.

Ein weiterer Vorteil von integrierten Zonenplatten ist die sehr kleine Einflußzone von Störeffekten aus der Vorlaufstrecke, da ein direkter Schallübergang in das zu prüfende Bauteil erfolgt.

Bei dieser Bauart des Prüfkopfes ist die Frequenzvariation nur von der Bandbreite des Schwingers abhängig. Eine große Bandbreite ermöglicht also eine große Variation des Fokusabstandes in Abhängigkeit von der Frequenz.

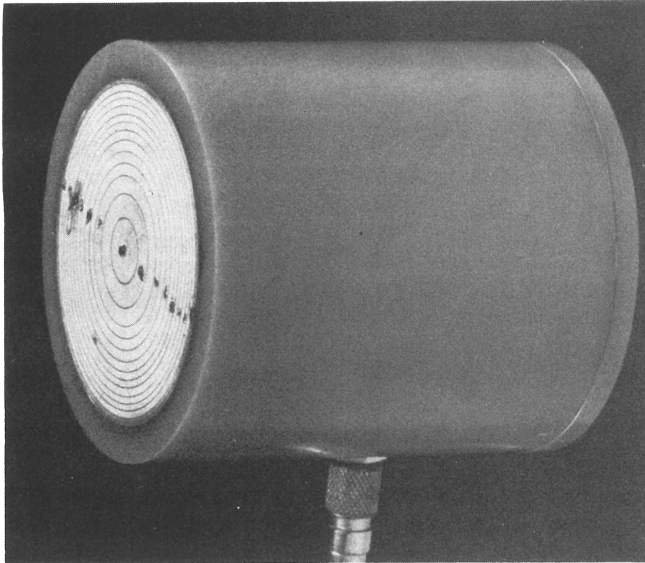


Abb. 2/27
Prüfkopf mit integrierter Zonenplatte

2.5.3 Maßnahmen zur Vergrößerung der Bandbreite

2.5.3.1 Elektrisches Ersatzschaltbild eines Piezoschwingers

Ein Piezoschwinger läßt sich in der Umgebung seiner Resonanzfrequenz durch ein einfaches Ersatzschaltbild beschreiben [39] (Abb. 2/28).

Danach hat der Schwinger eine Serienresonanzfrequenz

$$\nu_S = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{1}{\sqrt{L_S \cdot C_S}} \quad (2/40)$$

und eine Parallelresonanzfrequenz

$$\nu_P = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{1}{\sqrt{L_S \frac{C_S \cdot C_P}{C_S + C_P}}}, \quad (2/41)$$

die oberhalb der Serienresonanzfrequenz liegt.

Da C_S immer sehr klein gegenüber C_P ist, liegt ν_P nur wenig über ν_S . Als Näherung für den relativen Frequenzabstand ergibt sich

$$\frac{\nu_P - \nu_S}{\nu_S} \approx \frac{1}{2} \cdot \frac{C_S}{C_P} \quad (2/42)$$

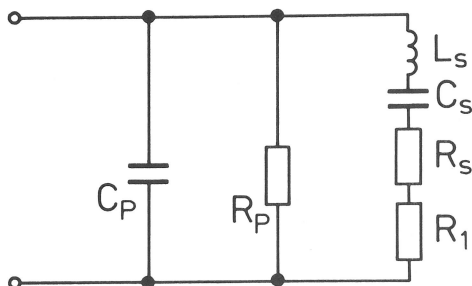


Abb. 2/28
Ersatzschaltbild eines Piezoschwingers

Elektrische Größen:

- R_S Ersatzgröße für die abgestrahlte Energie
- C_S Ersatzgröße für die Elastizität
- L_S Ersatzgröße für die schwingende Masse
- R_1 Ersatzgröße für die mechanischen Verluste
- C_P Halterungskapazität
- R_P Verlustwiderstand

Die „Innere Dämpfung“, also die Dämpfung der nicht schallabstrahlenden Piezokeramik ($R_S = 0$, gilt im Vakuum) ergibt sich zu

$$d_S = \frac{R_1}{2\pi \cdot \nu_S \cdot L_S} = R_1 \cdot 2\pi \cdot f_S \cdot C_S \quad (2/43)$$

unter der Annahme $R_P \gg R_1$.

Der Widerstand R_S gibt die Dämpfung durch die Schallabstrahlung wieder. Er liegt in Reihe zu R_1 (Abb. 2/28) und bestimmt somit bei Schallabstrahlung zusammen mit R_1 die mechanische Güte eines Piezoschwingers. Aus diesem Grunde wird auch durch Anbringen eines mechanischen Dämpfungskörpers die mechanische Güte kleiner, also der Piezoschwinger breitbandiger.

$$Q_m = \frac{1}{2\pi \cdot f_S \cdot C_S \cdot (R_1 + R_S)} \quad (2/44)$$

mit Q_m = mechanische Güte

Die größte Dämpfung und damit die größte Bandbreite erhält man, wenn der Dämpfungskörper den gleichen Schallwellenwiderstand wie der Schwinger besitzt, das heißt, wenn der Schwinger reflexionsfrei abgeschlossen wird.

Die erforderliche Dämpfungsmasse muß nicht nur einen Schallwellenwiderstand, der dem Schwinger angenähert ist, besitzen, sondern sie muß auch die in sie eindringende Welle vollständig absorbieren, um so ein Rücklaufen der Welle und damit ein Störecho zu vermeiden.

Der Schallwellenwiderstand Z ist das Produkt aus Schallgeschwindigkeit c und Dichte ρ' des Mediums

$$Z = \rho' \cdot c \quad (2/45)$$

Bei der Bestimmung des Schallwellenwiderstandes einer Dämpfungsmasse ergeben sich Schwierigkeiten dadurch, daß zwar die Dichte, nicht aber die Schallgeschwindigkeit wegen der geforderten hohen Schallabsorption zu messen ist. Als Ausweg bietet sich hier die Bestimmung von Z mit Hilfe des Reflexionsfaktors an.

2.5.3.2 Bestimmung des Schallwellenwiderstandes

An allen Grenzflächen, das heißt an den Trennflächen zweier Medien mit unterschiedlichem Wellenwiderstand, treten Reflexionen auf. Die einfallende Welle wird in eine durchgehende und eine reflektierte Welle aufgespalten. Bei senkrechtem Einfall können die Wellen nur senkrecht fortlaufen bzw. reflektiert werden. Die entstehenden Anteile sind von den Schallwellenwiderständen der die Trennfläche bildenden Medien abhängig. Dies wird durch den Reflexionsfaktor R bzw. durch den Durchlässigkeitsfaktor D ausgedrückt:

$$R = (Z_2 - Z_1) / (Z_2 + Z_1) \quad (2/46)$$

$$D = 2 Z_2 / (Z_2 + Z_1). \quad (2/47)$$

Der Reflexionsfaktor R ist abhängig von Z_1 und Z_2 und kann sowohl positiv als auch negativ sein. Ein negatives Vorzeichen bedeutet die Umkehrung der Phase gegenüber der einfallenden Welle. Durch diesen Phasensprung ist an der Echoamplitude eindeutig feststellbar, ob Z_2 größer oder kleiner als Z_1 ist.

$$Z_2 = Z_1 \frac{1 - R}{1 + R} \quad \text{wenn } Z_2 \leq Z_1 \quad (2/48)$$

$$Z_2 = Z_1 \frac{1 + R}{1 - R} \quad \text{wenn } Z_2 > Z_1$$

Der Reflexionsfaktor R läßt sich aus dem Amplitudenverhältnis des Rückwandechos von Z_1 und dem Echo aus der Grenzschicht $Z_1/Z_2 = Z_1/\text{Dämpfungskörper}$ bestimmen (Abb. 2/29):

$$R = \frac{\text{Amplitude } (Z_1/Z_2)}{\text{Amplitude } (Z_1/\text{Luft})} \quad (2/49)$$

(Näherung: $Z_1/\text{Luft} = 100\%$ Reflexion)

Die Genauigkeit dieses Verfahrens hängt sehr stark von den Ankoppelungsbedingungen des Prüfkopfes und des Dämpfungskörpers ab. Kontrollmessungen mit Plexiglas/Wasser und Kieselglas/Wasser ergaben aber, daß der auftretende Fehler unter 10 % liegt. Diese Genauigkeit ist für die Auswahl der günstigsten Materialien zur Herstellung von Dämpfungskörpern ausreichend.

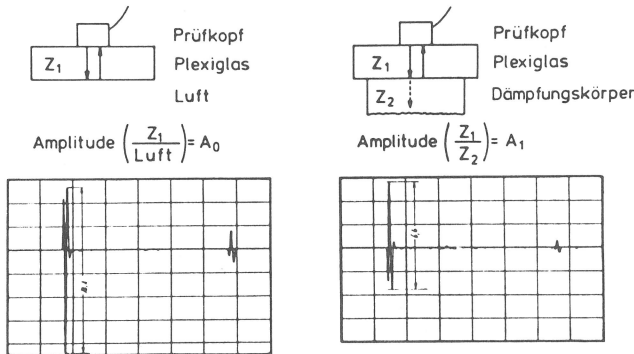


Abb. 2/29
Schallwellenwiderstandsmessungen von Dämpfungsmassen

2.5.3.3 Auswahl der Materialien für Dämpfungskörper

Untersucht wurden verschiedene Kleber und Epoxidharte, in die unterschiedliche Mengen von Wolframpulver (Körngröße $50 \mu\text{m}$) gemischt wurden. Diese Art der Dämpfungskörperherstellung erwies sich als besonders günstig, da die Mischungen direkt auf den Schwinger aufgegossen werden können und so Beeinflussungen von sonst benötigten Klebeschichten vermieden werden.

Durch die Beigabe von Wolframpulver werden der Schallwellenwiderstand und die Schallabsorption wesentlich erhöht. Diese Beigabe kann aber nicht beliebig erhöht werden, da die Aufnahmefähigkeit der Kleber begrenzt ist.

Für den Versuch (Abb. 2/29) wurden auf einen Plexiglasstreifen (Z_1) mehrere Proben eines Klebers bzw. Epoxidharzes mit unterschiedlichen Wolframpulver-Konzentrationen aufgegossen. Nach dem Aushärten der Proben wurden die Echos aufgenommen und nach den Gl. 2/48 und 2/49 ausgewertet.

Aus den Untersuchungen ergab sich, daß ein Dämpfungskörper aus einem Epoxidharz-Wolfram-Gemisch im Volumenverhältnis von 1 : 3 die geforderten Bedingungen (hoher Schallwellenwiderstand und hohe Schallabsorption) erfüllt. Die für die Untersuchungen benötigten Prüfköpfe wurden mit derartigen Dämpfungskörpern versehen. Als Epoxidharz wurde das Zweikomponenten-Epoxidharz 799 der Firma R. Schley verwendet.

3. Meßeinrichtungen zur Schallfeldcharakterisierung

3.1 Allgemeines

Experimentelle Aussagen über das Schallfeld eines Ultraschallprüfkopfes können auf einfache Weise in Flüssigkeiten durch Messung des reflektierten Schallfeldes z. B. an einem Kugelfreflektor gemacht werden. Diese als Tauchtechnik-Verfahren allgemein bekannte Methode [40 – 42] erlaubt quantitative Aussagen über das Schallfeld. Der Prüfkopf arbeitet bei diesem Verfahren nach dem Prinzip der Impuls-Echo-Technik, d. h. der Prüfkopf ist abwechselnd Sender und Empfänger.

Eine andere Methode, Ultraschallfelder in optisch transparenten Medien wie Glas oder Wasser direkt sichtbar zu machen, ist die Darstellung dieser Felder mittels einer schlierenoptischen Anordnung, wobei diese Methode, wie jede optische Beobachtung, den Vorteil der unmittelbaren Anschaulichkeit besitzt (Abb. 2/5, S. 4)

Maßgebend für den Nachweis der Eignung eines Ultraschallprüfkopfes zur Lösung praktischer Prüfprobleme ist die Ermittlung der Schallfeldausbildung im Prüfwerkstoff selbst. Dies erfolgt durch direktes Aufsetzen des Prüfkopfes auf den Prüfling unter Verwendung eines flüssigen Koppelmediums (Öl, Wasser) und wird im allgemeinen als Kontakttechnik-Verfahren bezeichnet. Durch die gleiche Vorgehensweise wie beim Tauchtechnik-Verfahren können in Impuls-Echo-Technik Testreflektoren ausgemessen und Empfindlichkeitskurven bestimmt werden. Daraus lassen sich die Schallfeldabmessungen ermitteln. Eine weitere Möglichkeit der Schallfeldmessung besteht in der punktwweisen Abtastung des Schallfeldes z. B. mit einer elektrodynamischen Sonde [43]. Das Verfahren arbeitet in Durchschallung, so daß der Prüfkopf nur als Ultraschallsender verwendet wird.

3.2 Tauchtechnik-Meßeinrichtung

3.2.1 Mechanischer Aufbau

Die Vorteile des Tauchtechnik-Verfahrens sind neben konstanten Ankopplungsbedingungen und der damit verbundenen

Reproduzierbarkeit der Messungen eine kontinuierlich veränderbare Vorlaufstrecke und eine kontinuierlich einstellbare Einschallrichtung, was z. B. für die Prüfung von Bauteilen mit komplizierter Geometrie von großem Nutzen ist. Durch die Wahl eines geeigneten Reflektors, der in x-, y- und z-Richtung verstellbar ist, ist es auch auf einfache Art möglich, die charakteristischen Schallfelddaten, wie Schallfeldausdehnung und relativen Schalldruck zu ermitteln.

Die speziell für diese Messungen konstruierte und gefertigte Tauchtechnik-Anlage ist in Abb. 3/1 dargestellt. Diese Tauchtechnik-Anlage besteht aus einem Wasserbecken (Maße: $l \times b \times h = 80 \times 50 \times 40 \text{ cm}$) und einem auf dem Beckenrand mittels Klemmvorrichtung befestigten Manipulator, der in x-, y- und z-Richtung verstellbar ist. An der vertikalen Achse (z-Achse) wird jeweils der Reflektor oder aber die Prüfkopfhaltung befestigt. Die Prüfkopfhaltung besteht aus einem kardanischen Gelenk, das zur genauen Prüfkopfjustierung mit zwei Mikrometerschrauben ausgestattet ist.

Zusätzlich zum Manipulator befindet sich auf dem Beckenrand noch eine starre Befestigungsmöglichkeit für einen Reflektor oder die Prüfkopfhaltung. Dadurch kann vom Manipulator wahlweise entweder der Prüfkopf oder der Reflektor bewegt werden. Zur Erzielung größerer Schallaufwege wird die auf die rechteckige Aussparung der Beckenwand gesetzte Plexiglas-scheibe (Abb. 3/1) durch eine Prüfkopfhaltung ersetzt, so daß der Prüfkopf außerhalb des Beckens angebracht werden kann und nur der schallabstrahlende Teil in das Becken ragt. Der Reflektor kann in diesem Fall an der gegenüberliegenden Beckenwand auf eine justierbare Platte gestellt werden, so daß die gesamte Beckenlänge als Schallweg zur Verfügung steht.

Der Manipulator ist sowohl manuell als auch rechnergesteuert durch Schrittmotoren zu bewegen. Wird die Anlage rechnergesteuert, so kann auch die gesamte Meßauswertung vom Rechner übernommen werden. Bei der manuellen Bewegung erfolgt die Aufzeichnung der Schallfelder mittels eines x-, y-Schreibers. Dabei werden Amplituden- und Ortsinformationen vom Ultraschallgerät und von einem Linearpotentiometer, das direkt mit dem Manipulator verbunden ist, geliefert.

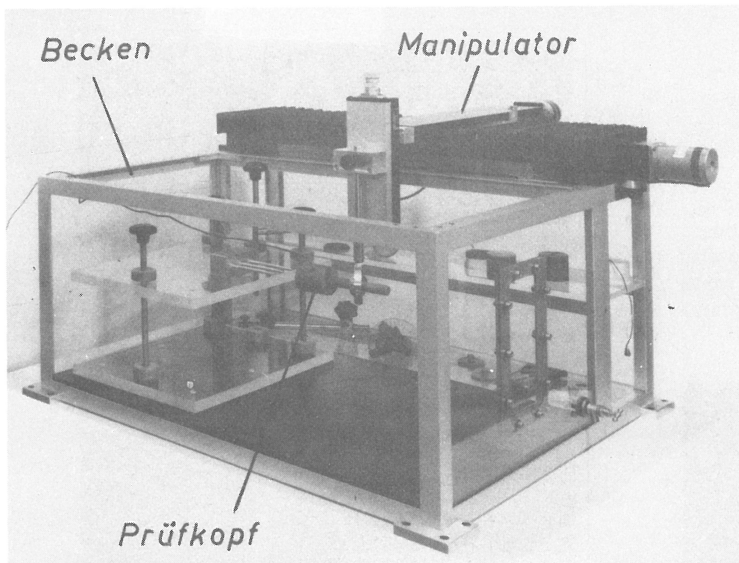
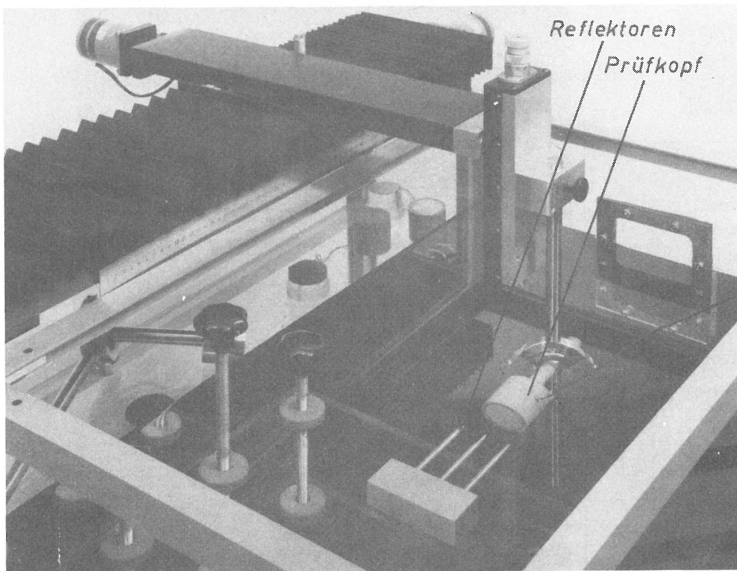


Abb. 3/1
Tauchtechnik-Meßeinrichtung, unteres Teilbild: Detail



3.2.2 Reflektor

3.2.2.1 Abmessungen

Mit Hilfe eines Kugelreflektors soll beim Tauchtechnik-Verfahren eine punktweise Abtastung des Schallfeldes erfolgen. Dies ist eine häufig angewendete Methode [40]. Da hier vorwiegend fokussierte Schallfelder untersucht werden sollen, ist aufgrund der zu erwartenden kleinen Schallfeldabmessungen eine hohe Auflösung erforderlich. Aus der Auflösung Δx , die hier der akustischen Trennung zweier Punkte mit dem Abstand Δx entspricht, ist der Kugelradius r_K bestimmbar (Abb. 3/2).

Es soll gelten, daß bei einer Kugelverschiebung um Δx mm in einem Prüfkopfabstand s der reflektierte Zentralstrahl vom Prüfkopf gerade nicht mehr empfangen wird.

Es folgt dann mit

$$r_K = \Delta x / \sin \alpha \quad \text{und} \quad \tan 2 \alpha = D_0 / 2 s$$

$$r_K = \Delta x / (\sin (0,5 \arctan D_0 / 2 s)) \quad (3/1)$$

Um eine relativ gute Abtastung des Schallfeldes bei noch vertretbaren Anforderungen an die Reproduzierbarkeit der Manipulationseinrichtung zu erreichen, sollte die Auflösung im ungünstigsten Fall, also im prüfkopfnahen Bereich, 0,5 mm betragen. Das bedeutet z. B. für einen Schwingerdurchmesser $D_0 = 40$ mm und einen Abstand $s = 20$ mm nach Gl. 3/1 für $r_K = 1,31$ mm.

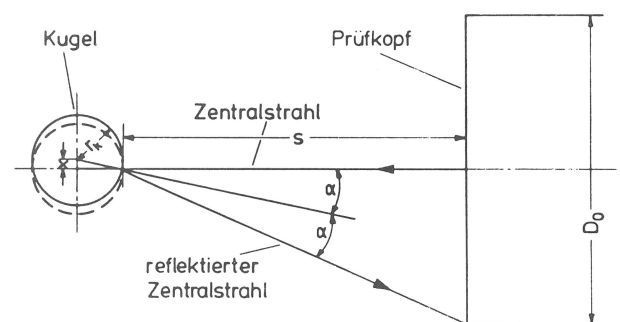


Abb. 3/2
Darstellung der geometrischen Zusammenhänge zur Berechnung des Kugelreflektors

Versuche mit unterschiedlichen Kugelradien bezüglich der Empfindlichkeit des gesamten Prüfsystems ergaben, daß noch mit einem $r_K = 1$ mm eine gute Gesamtempfindlichkeit zu erzielen war. Die dann im Fokuspunkt ($s = 40$ mm) vorhandene Auflösung von $\Delta x \leq 0,25$ mm ist von dem zum Einsatz kommenden Manipulatorsystem zu bewältigen, so daß sämtliche Messungen zur Schallfeldcharakterisierung mit diesem Kugelradius vorgenommen werden. Es ist dann eine gute Übereinstimmung mit den theoretischen Schallfeldparametern zu erwarten.

3.2.2.2 Einfluß des Kugelreflektordurchmessers auf das Spektrum des Echos

Es sollen die Schallfelder verschiedener fokussierender Prüfköpfe durch Messung der Reflexionsschallfelder eines Kugelreflektors bestimmt werden. Dabei ist sicherzustellen, daß die Höhe der Amplitude des reflektierten Echos frequenzunabhängig ist. Es werden deshalb die Spektren der Echos von Kugelreflektoren mit verschiedenen Durchmessern verglichen. Die Messungen werden in der Tauchtechnik-Anlage durchgeführt. Zur Vermeidung störender Echos aus der Kugel wird als Reflektor eine Kugelkappe, die an einen konischen Stift angebracht wird, verwendet (Abb. 3/3), so daß evtl. Störechos außerhalb des Meßbereiches liegen.

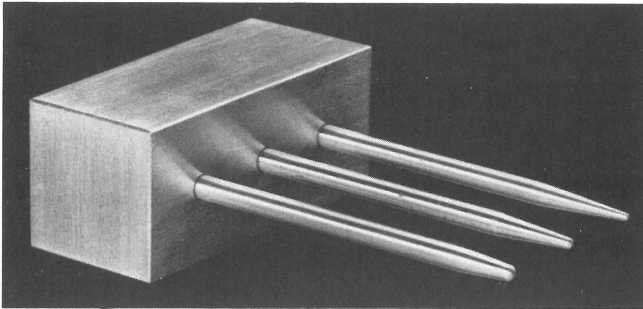


Abb. 3/3
Kugelreflektoren

Im fokussierten Schallfeld eines 1 MHz-Prüfkopfes ($f = 40$ mm, $n = 7$ Zonen) wird der Kugelreflektor mit 2 mm bzw. 4 mm Durchmesser oder eine Kreisscheibe mit 4 mm Durchmesser im prüfkopfnahen und im prüfkopffernsten 6 dB-Abfall positioniert. An diesen Stellen werden Echospektren aufgenommen und miteinander verglichen. Die Abb. 3/4 a, b zeigen fast vollständig deckungsgleiche Spektren dieser drei Reflektoren. Damit ist die Frequenzunabhängigkeit des Kugelreflektors mit $r_K = 1$ mm bei $\lambda = 1,48$ mm nachgewiesen.

Die Abb. 3/4 c — e zeigen die Spektren dieser drei Reflektoren im nahen und fernem 6 dB-Abfall.

Aus diesen Abbildungen ist zu erkennen, daß die Spektren der drei Reflektoren bei Veränderung des Abstandes und des Durchmessers ein sehr ähnliches Verhalten aufweisen. Die Vergrößerung des Durchmessers bewirkt lediglich eine Vergrößerung der Amplitude, die übertragenen Frequenzinhalte bleiben jedoch gleich. Die Verschiebung des Reflektors vom nahen zum fernem 6 dB-Abfall bewirkt eine Verschiebung des Spektrums von niedrigen zu höheren Frequenzen (Abb. 3/4 c — e). Dieses Ergebnis ist gleichzeitig eine sehr anschauliche Bestätigung für die Frequenzabhängigkeit dieser Fokussierungsart, denn es werden die niederfrequenten Anteile prüfkopfnäher als die höherfrequenten fokussiert. Wird also die Anregungsfrequenz verändert, so führt das zu der im Abschnitt 2.4.2, S. 11, beschriebenen Verschiebung des Fokusabstandes.

Abb. 3/4

- Vergleich der Echospektren zweier Kugeln ($\varnothing 2$ und $\varnothing 4$ mm) im prüfkopffernsten 6 dB-Abfall
- Vergleich der Echospektren einer Kugel und einer Kreisscheibe (beide $\varnothing 4$ mm) im prüfkopffernsten 6 dB-Abfall
- Echospektren einer Kreisscheibe ($\varnothing 4$ mm) im prüfkopfnahen (linke Kurve) und prüfkopffernsten (rechte Kurve) 6 dB-Abfall
- Echospektren einer Kugel ($\varnothing 4$ mm) im prüfkopfnahen (linke Kurve) und im prüfkopffernsten (rechte Kurve) 6 dB-Abfall
- Echospektren einer Kugel ($\varnothing 2$ mm) im prüfkopfnahen (linke Kurve) und im prüfkopffernsten (rechte Kurve) 6 dB-Abfall

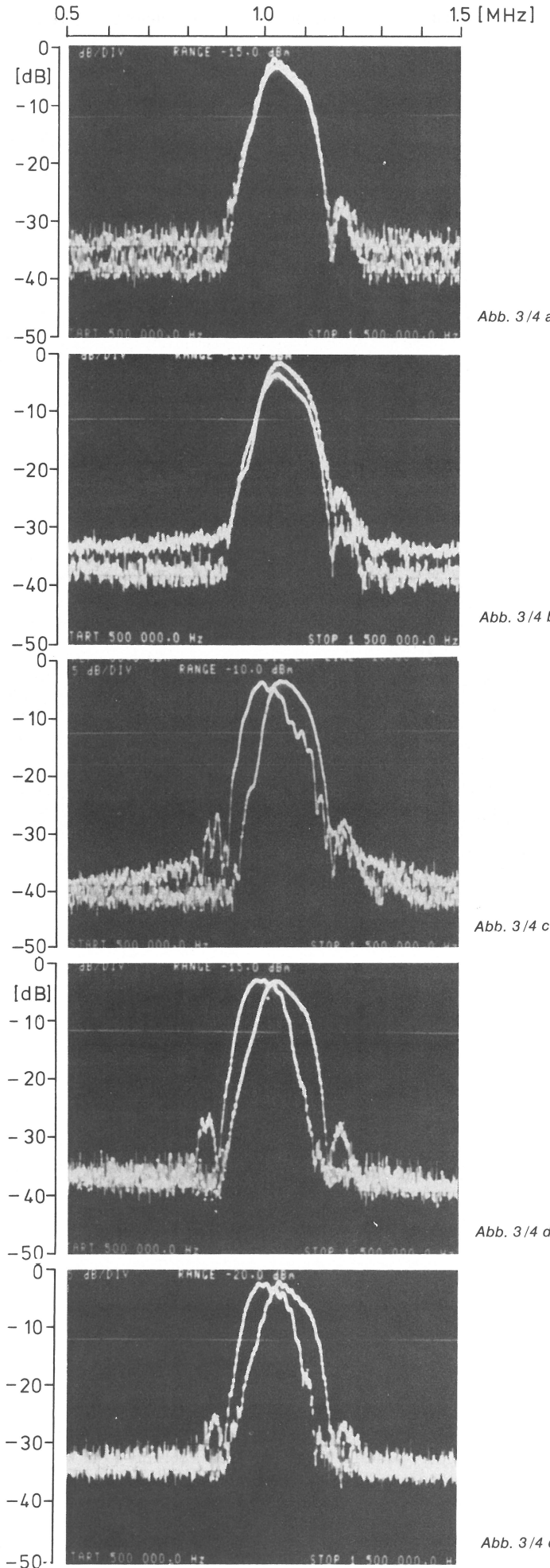


Abb. 3/4 a

Abb. 3/4 b

Abb. 3/4 c

Abb. 3/4 d

Abb. 3/4 e

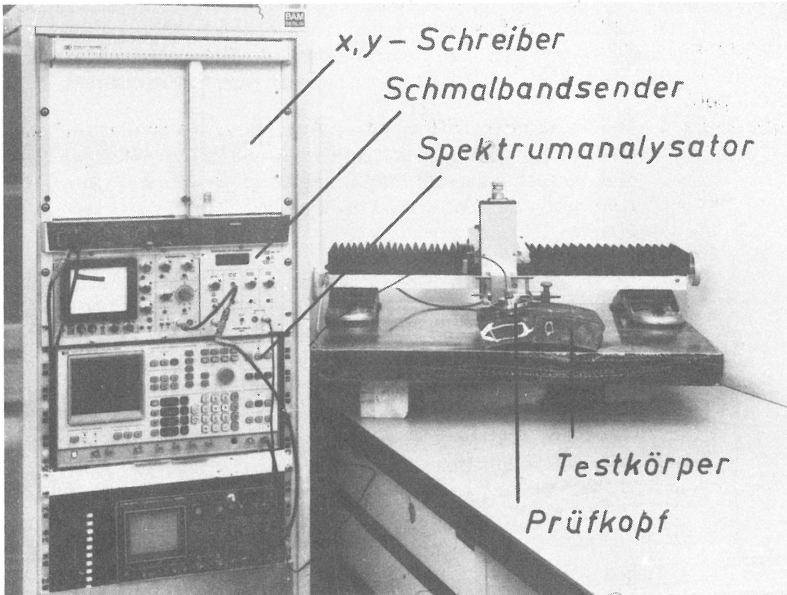


Abb. 3/5
Kontakttechnik-Meßeinrichtung

3.3 Kontakttechnik-Meßeinrichtung

3.3.1 Meßaufbau

Durch Kontakttechnik-Messungen wird insbesondere die Erprobung der Funktion des-Prüfkopfes in Kontakttechnik — so wie bei den meisten betrieblichen Anwendungen — durchgeführt. Dazu werden Testkörper mit den jeweils notwendigen Testreflektoren verwendet. Die Kontakttechnik-Meßeinrichtung wird mit dem Manipulator der Tauchtechnik-Meßeinrichtung ausgerüstet. Er ist mit wenigen Handgriffen zu lösen und dann nach Anbringen eines entsprechenden Prüfkopfhalters auch für die Kontakttechnik-Messungen einsetzbar. Der Manipulator ist sowohl manuell als auch rechnergesteuert betreibbar.

Die für die Ultraschallprüfung benötigten elektronischen Geräte sind in einem fahrbaren 19"-Schrank integriert, so daß eine

schnelle Umstellung auf das jeweils gewünschte Meßverfahren erfolgen kann. Abb. 3/5 zeigt die gesamte Versuchsanordnung für das Kontakttechnik-Verfahren.

Folgende elektronische Geräte kommen dabei zum Einsatz (Abb. 3/5 von oben nach unten):

1. Kontrollmonitor (auf der Abbildung nicht sichtbar). Er dient zur Kontrolle der nicht gleichgerichteten Sende- und Empfangsimpulse und wird zusätzlich bei der HF-Darstellung des Empfangsimpulses zur Bestimmung des Verhältnisses vom Nutzsignal zum Störgrund (S/N-Verhältnis) eingesetzt.
2. x, y-Schreiber
3. Ultraschallgerät (durchstimmbarer Sender)
4. Spektrumanalysator zur Messung des Ultraschallspektrums
5. Multiplizier-Oszilloskop in Tor-Schaltung zur Ausblendung des Empfangssignals (Abb. 3/6)
6. Netzteile für die Linearpotentiometer des Manipulators

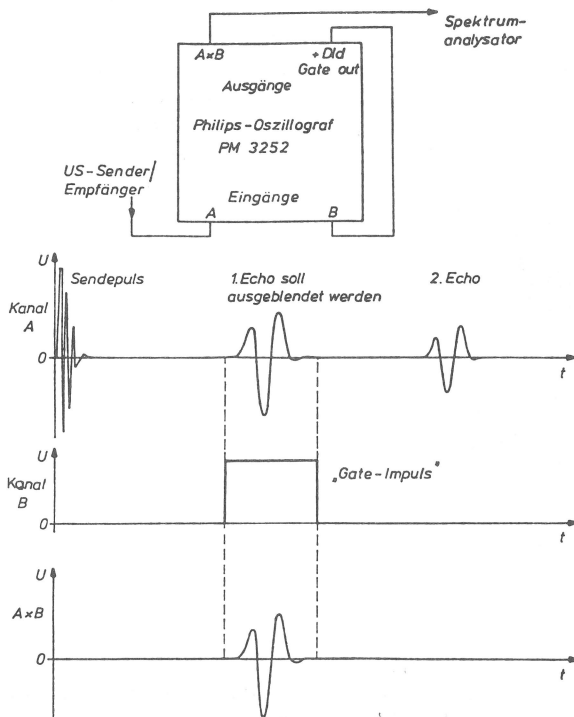


Abb. 3/6
Multiplizieroszilloskop in Tor-Schaltung

Abb. 3/7 zeigt das Blockschaltbild der gesamten Meßanordnung.

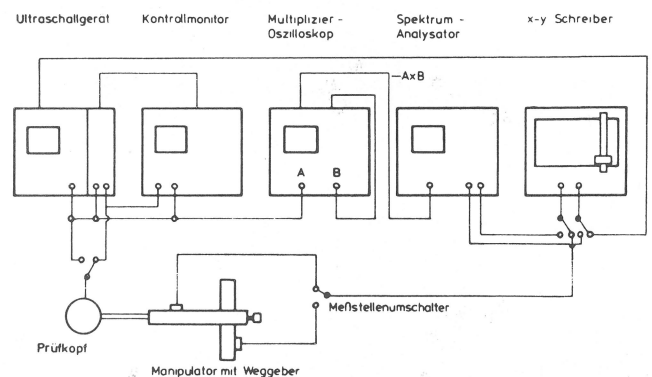


Abb. 3/7
Blockschaltbild der gesamten Meßanordnung

3.3.2 Testkörper für Kontakttechnik-Messungen

Die Eignung dieser Zonenplatten-Prüfköpfe für Kontakttechnik-Versuche und ihre Leistungsfähigkeit bei der Fehlerrandabtaugung unter realen Prüfbedingungen wurde an drei Testkörpern nachgewiesen. Die Prüfköpfe wurden mit Hilfe des Manipulators geführt.

In den Testkörper 1 (TK 1) wurden Flachlochbohrungen (FLB) mit unterschiedlichen Durchmessern in gleicher Tiefe eingebracht (Abb. 3/8). Der TK 1 besteht aus ferritischem Material.

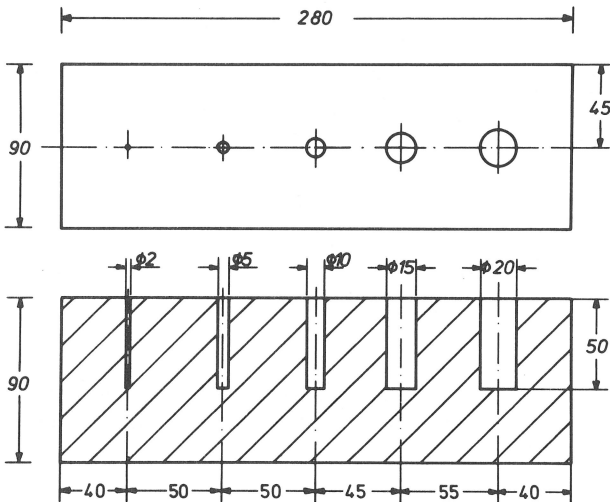


Abb. 3/8
Skizze des TK 1 mit Flachlochbohrungen als Kreisscheibenreflektoren (ϕ : 2, 5, 10, 15, 20 mm)

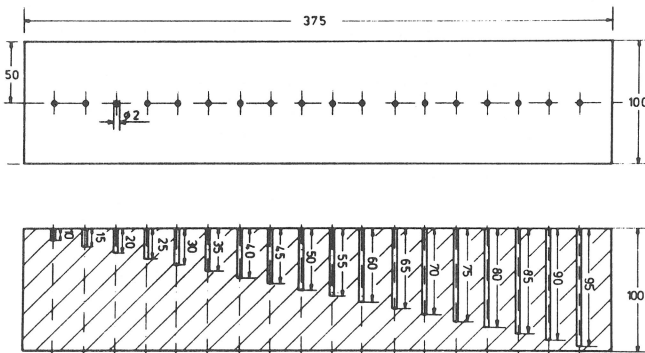


Abb. 3/9
Skizze des TK 2 mit Flachlochbohrungen (ϕ : 2 mm) als Reflektoren in unterschiedlichen Tiefen

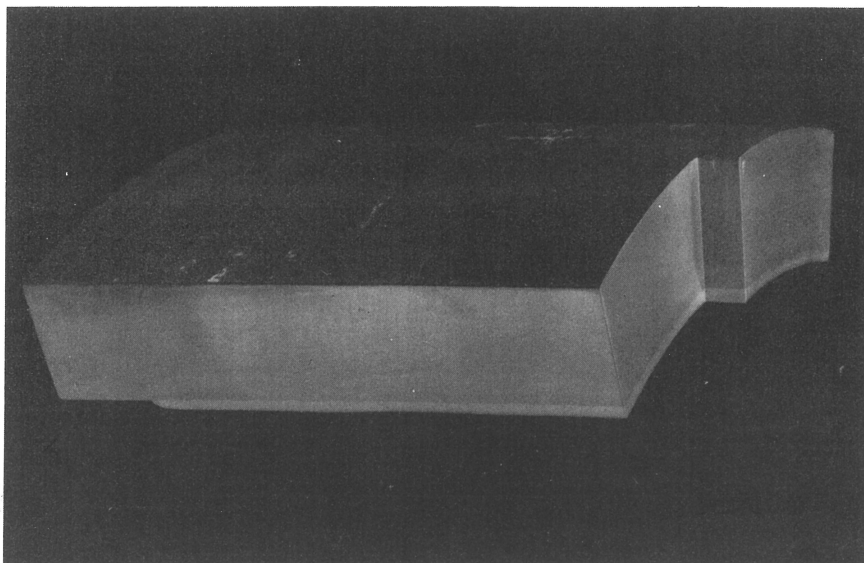


Abb. 3/10
Ausschnitt aus einem plattierten Druckbehälter mit Haftungsfehler als TK 3

Der Testkörper 2 (TK 2) dient der Bestimmung von Empfindlichkeitskurven. Er wurde deshalb mit Flachlochbohrungen gleichen Durchmessers in verschiedenen Tiefenlagen versehen (Abb. 3/9). Der TK 2 besteht ebenfalls aus ferritischem Material.

Der Testkörper 3 (TK 3) ist ein Ausschnitt aus einem Druckessel, dessen 40 mm dicke ferritische Wandung mit einer 5 mm dicken austenitischen Plattierung versehen ist (Abb. 3/10). Die Korngröße des Ferrites ist bei allen drei Testkörpern kleiner als $20 \mu\text{m}$.

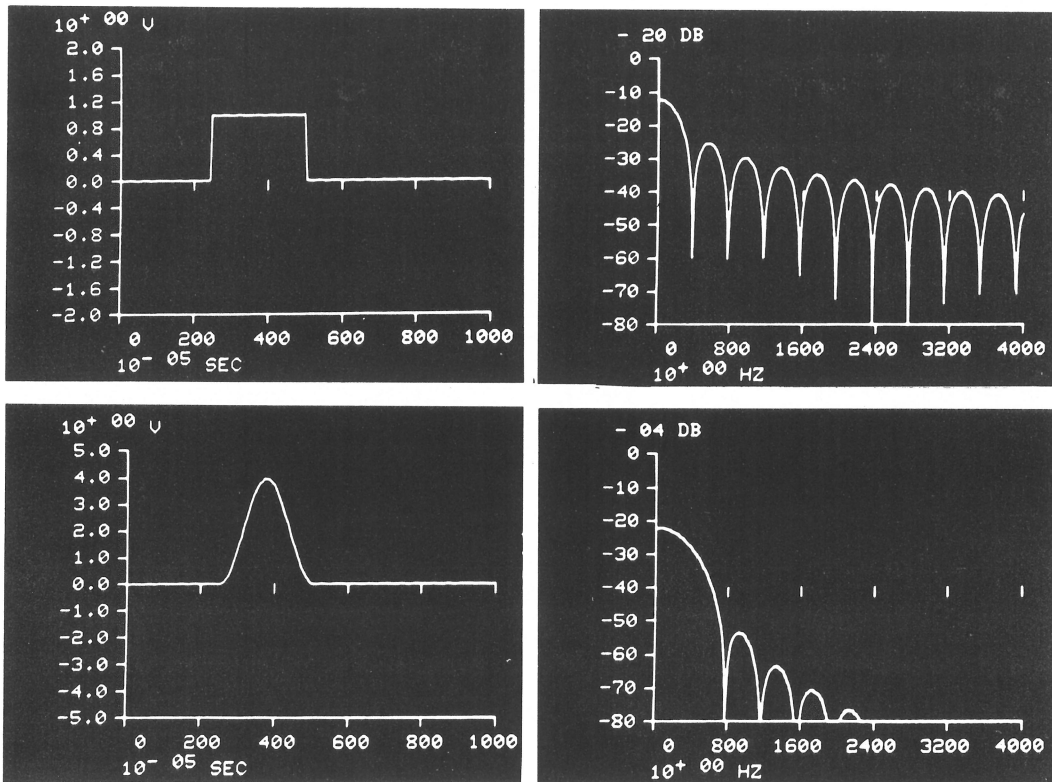
Beim Aufbringen der Plattierung können Haftungsfehler entstehen. Die Größe und die Anzahl dieser Fehler sind Grundlage für die Entscheidung eventuell erforderlicher Reparaturen. Mit einem Zonenplatten-Prüfkopf soll die Größe eines derartigen Fehlers unter praxishen Bedingungen gemessen werden. Die Lösung dieser Aufgabe wäre ein wichtiger Nachweis der Eignung der Prüfköpfe für den praktischen Einsatz.

3.4 Elektrische Anregung von Zonenplatten-Prüfköpfen

Die Funktionsweise sowie die unterschiedlichen Bauarten und Verwendungsmöglichkeiten der Zonenplatten-Prüfköpfe stellen folgende Anforderungen an das Ultraschallgerät:

- Die vorgesetzte Phasenzonenplatte erfordert infolge der laufwegabhängigen Phasenverschiebung eine möglichst schmalbandige Anregung (S. 5).
- Die integrierte Phasenzonenplatte ermöglicht eine breitbandigere Anregung, da die 180° -Phasenverschiebung aufgrund der Bauart von der Frequenz und der Bandbreite unabhängig ist (S. 14). Die größere Sendebandbreite führt zu einer Vergrößerung der Fokusschlauchlänge, sofern der Prüfkopf diesen Sendepuls noch überträgt. Da eine größere Fokusschlauchlänge eine Reduzierung des Prüfaufwandes bedeutet, wird die Wichtigkeit der Wahl der geeigneten Sendebandbreite deutlich.
- Aus der Verschiebung der Brennweite durch Variation der Frequenz bei schmalbandiger Anregung resultiert die Forderung nach stufenloser Einstellbarkeit der Frequenz an das Ultraschallgerät (S. 11)

Aus diesen Gründen ist die Anregung der Prüfköpfe mit herkömmlichen Ultraschallgeräten, die eine feste Sendebandbreite und eine feste Sendefrequenz besitzen, nur bedingt möglich. Besser ist die Anregung mit einer definierten Frequenz und einer endlichen Anzahl von Schwingungen. Ein abruptes



a) Rechteckehülle des Wechselspannungssignals (links) und zugehöriges Frequenzspektrum (rechts)

b) Sinusenhülle des Wechselspannungssignals (links) und zugehöriges Frequenzspektrum (rechts)

Abb. 3/11 Rechteck- und Sinusenhülle unterschiedlicher Sendepulse

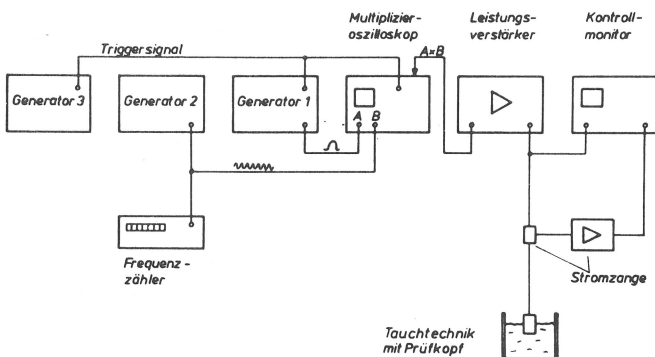


Abb. 3/12 Blockschaubild der elektronischen Prüfkopf-Anstereinheit

Ein- und Ausschalten (Rechteckhülle) eines Generators, der die geforderte Frequenz liefert, erweist sich als nicht so vorteilhaft, da durch diesen Vorgang ausgeprägte Nebenresonanzen auftreten (Abb. 3/11 a). Ersetzt man die „Rechteckehülle“ durch eine „Sinusenhülle“, so treten viel weniger Nebenresonanzen auf. Außerdem ist der Amplitudenabstand zwischen Haupt- und erstem Nebenmaximum um ca. 15 dB größer als bei der Verwendung der Rechteckehüllen (Abb. 3/11 b) [44]. Erzeugen läßt sich diese Art des Sendepulses durch eine Multiplikation der eigentlichen Sendefrequenz mit einer von einem zweiten Generator gelieferten „Sinusenhüllen“.

Abb. 3/12 zeigt das Blockschaubild einer im Rahmen dieser Untersuchungen aufgebauten elektronischen Anstereinheit, wobei ein dritter Generator die Impulsfolgefrequenz (Triggersignal) bestimmt, und ein nachgeschalteter Leistungsverstärker die Ansteuerung des Prüfkopfes übernimmt.

Um einen praxiserfahrenen Einsatz der Zonenplatten-Prüfköpfe sicherzustellen, werden die Schallfeldmessungen mit einem handelsüblichen Ultraschallgerät durchgeführt, das sich durch eine große Variationsmöglichkeit des Sendepulses auszeichnet [45]. Der Sender des Gerätes ist von 80 KHz bis 10 MHz durchstimmbare, die Impulslänge ist im Bereich von 0,5 μ s bis 140 μ s einstellbar [46].

4. Versuchsdurchführung und Meßergebnisse

4.1 Einflußgrößen auf die Fokussierungseigenschaften des Prüfkopfes

Das Übertragungsverhalten der einzelnen Glieder der Übertragungskette des Prüfsystems beeinflusst die Fokussierungseigenschaften des Prüfkopfes. Als Ansatz zur Beschreibung des Meß- und Prüfsystems dient die in Abb. 4/1 dargestellte Signalübertragungskette, bestehend aus den das Meßergebnis beeinflussenden Einzelgliedern [47].

Die Übertragungseigenschaften der dargestellten Glieder sind im Zeitbereich durch die jeweilige Impulsantwort und im Frequenzbereich durch die Übertragungsfunktion vollständig beschrieben.

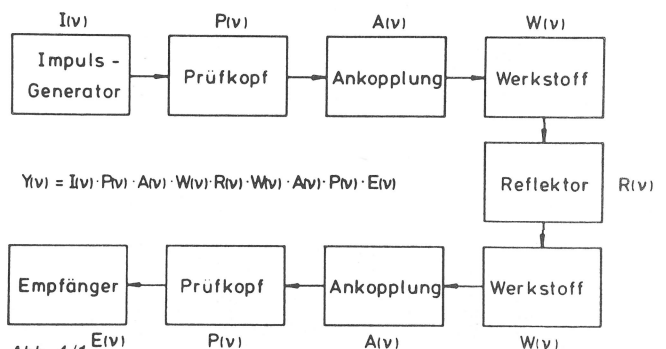


Abb. 4/1 $E(v)$ Signalkette

Werden die Betrachtungen im Frequenzbereich durchgeführt, so erhält man das Spektrum des empfangenen Signals aus dem Produkt der einzelnen Übertragungsfunktionen. Jedes Glied in dieser Übertragungskette hat prinzipiell gleichen Einfluß auf das empfangene Signal [48].

4.1.1 Sendeimpuls

Die elektrische Anregung des Prüfkopfes soll mit einem Sendeimpuls erfolgen, der durch Überlagerung der Sendefrequenz mit einer Sinuseinhüllenden entsteht (vgl. Kap. 3.4, S. 20 ff). Die Sinuseinhüllende des Sendeimpulses ist mit dem Cosinusimpuls der Form

$$A(t) = \frac{1}{2}(1 + \cos \omega_0 t) \quad \text{für} \quad -\pi \leq \omega_0 t \leq \pi \quad (4/1)$$

identisch [48]. In Abb. 4/2 ist dieser Cosinusimpuls mit seinem Frequenzspektrum dargestellt. Aus dieser Abbildung geht hervor, daß das Spektrum des Impulses nahezu vollständig auf den Bereich zwischen den Frequenzen $-2/T$ und $2/T$ beschränkt ist mit einem Maximum des Wertes 1 bei $\nu = 0$ MHz. Die Amplitudenhöhe beträgt 0,5 bei $\nu = 1/T$. Die -6 dB-Bandbreite dieses Impulses ergibt sich damit zu

$$\nu_B = 2/T \quad (4/2)$$

Ein Sendeimpuls der Dauer $T = 16 \mu\text{s}$ besitzt demnach eine 6 dB-Bandbreite von 125 KHz.

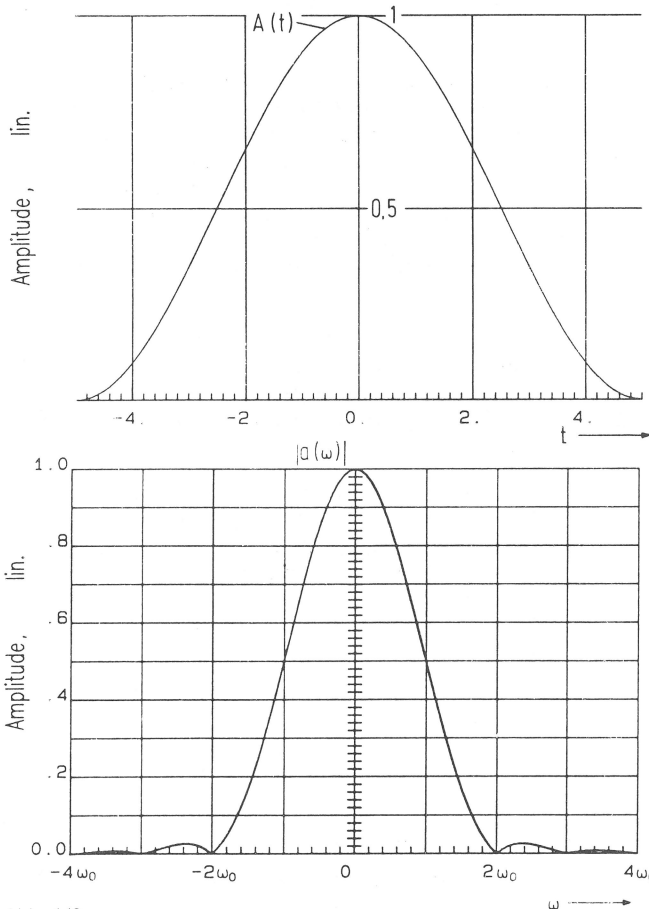


Abb. 4/2
Cosinusimpuls mit Amplitudenspektrum

4.1.2 Sendeimpulsbandbreite

Die Impulslänge T_S des Sendeimpulses hat einen wesentlichen Einfluß auf die Schallfeldausbildung, da durch die Impulslänge nicht nur die Fokussierungseigenschaften, sondern auch das Tiefenaufklärungsvermögen bestimmt werden.

Der Zonenanzahl entsprechend muß eine Mindestanzahl von Schwingungen gesendet werden, damit die vom äußeren Ring kommenden Wellenzüge, die den größten Weg zurücklegen, noch mit einem Wellenzug vom inneren Ring interferieren können (Abb. 4/3).

Zonenplatte

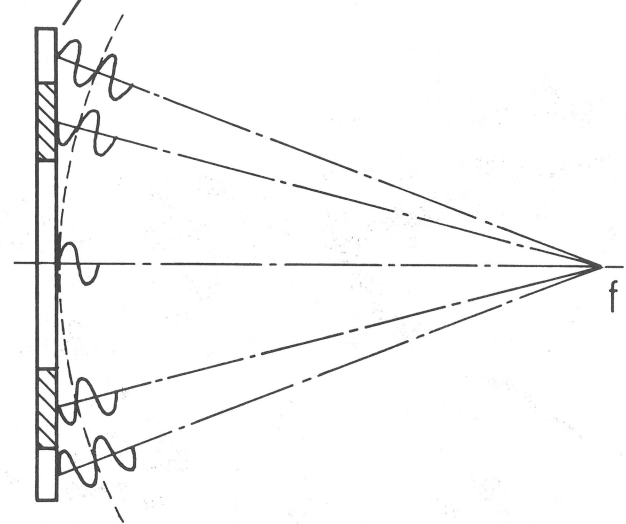


Abb. 4/3
Darstellung zur Ableitung der minimalen Impulslänge zur Anregung eines Zonenplatten-Prüfkopfes

Da der Gangunterschied zwischen den einzelnen Zonen $\lambda/2$ beträgt, wird durch die Beziehung

$$i_{\min} = (n + 1)/2 \quad (4/3)$$

die minimal erforderliche Anzahl der Schwingungen i_{\min} bestimmt, damit alle n Zonen zur Fokussierung beitragen. Für eine Zonenplatte mit sieben Zonen bedeutet das z. B., daß ein Impuls mindestens vier Schwingungen enthalten muß. In diesem Fall kann die letzte Schwingung des inneren Ringes mit der ersten Schwingung des äußeren Ringes interferieren. Es entsteht im Fokuspunkt der in Abb. 4/4 skizzierte Impuls, bei dem neben der Schalldruckerhöhung eine Impulsverlängerung um ΔT sichtbar wird.

Die Impulsverlängerung im Fokus ist von der Anzahl der Zonenringe abhängig und beträgt $i_{\min} - 1$ Schwingungen. Mit Gl. 4/3 gilt

$$\Delta T = \frac{i_{\min} - 1}{\nu_r} = \frac{n - 1}{2 \nu_r} \quad (4/4)$$

mit ν_r ... Anregungsfrequenz.

Dieser durch Interferenz entstandene Impuls wird von einem im Fokuspunkt angeordneten Reflektor, z.B. dem bei den Messungen verwendeten Kugelreflektor, zum Prüfkopf reflektiert. Der Impuls wird nun von den einzelnen Zonen wiederum mit unterschiedlicher Laufzeit empfangen und setzt sich ebenfalls durch Überlagerungen zu einem neuen Impuls zusammen. Dieser neue Impuls weist nochmals eine Impulsverlängerung um ΔT auf. Für die Länge T_E des empfangenen Impulses folgt damit

$$T_E = T_S + 2 \Delta T \quad (4/5)$$

bzw. mit Gl. 4/4

$$T_E = T_S + \frac{n - 1}{\nu_r} \quad (4/6)$$

Soll T_S Gl. 4/3 genügen, so beträgt die minimale Länge des empfangenen Impulses

$$T_{Emin} = \frac{3n-1}{2\nu_r} \quad (4/7)$$

Die Gl. 4/7 beschreibt somit den kürzesten erzielbaren Echoimpuls unter der Voraussetzung, daß alle Zonen zur Schalldruckerhöhung im Fokuspunkt beitragen.

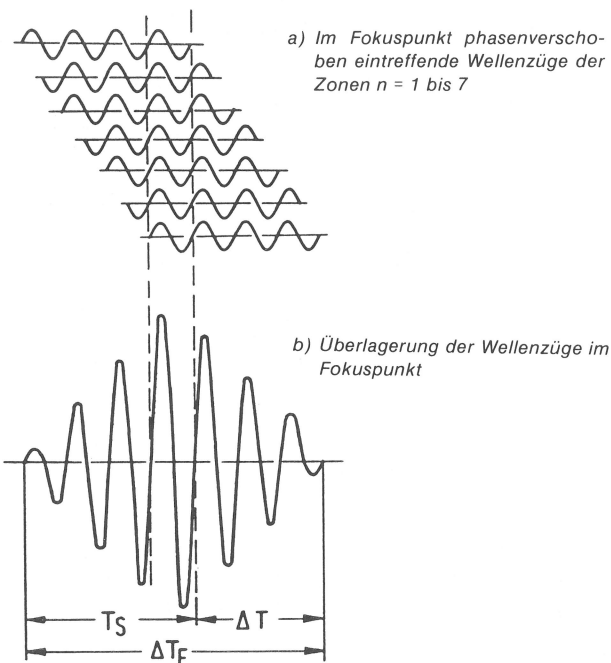


Abb. 4/4 Entstehung des Impulses im Fokus mit der Impulslänge T_F und einer Impulsverlängerung ΔT gegenüber der Sendepulslänge T_S

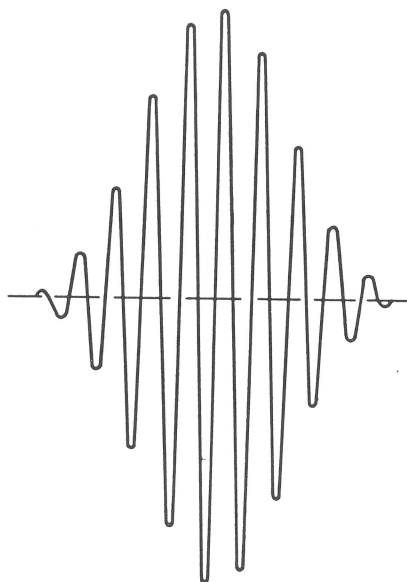


Abb. 4/5 Aus einem Sendepuls mit vier Schwingungen entstandener Empfangsimpuls mit zehn Schwingungen (Zonenplatte mit $n =$ sieben Zonen und $\nu = 1$ MHz)

Abb. 4/5 zeigt den durch Überlagerung von sieben Einzelimpulsen entsprechend Abb. 4/4 entstandenen neuen Impuls.

Tatsächlich wird der Prüfkopf jedoch durch einen Impuls angeregt, der aus einer definierten Anzahl von Schwingungen

besteht, denen eine Sinusenhüllende überlagert ist (Kap. 3.4, S. 20). Die Amplitude dieser Einzelimpulse ändert sich also sinusförmig. Eine möglichst kurze Länge des Sendepulses bei hoher Empfindlichkeit läßt sich nach Gl. 4/6 ermitteln, wenn für die Rechnung nur der Bereich der Sinusenhüllenden mit einem geringen Amplitudenabfall verwendet wird. Wird der zulässige Amplitudenabfall beispielsweise mit ca. -1 dB festgelegt, so kann die minimal erforderliche Länge des Sendepulses wie folgt berechnet werden:

Soll für Gl. 4/1

$$A/A_0 = 0,85 = \frac{1}{2} (1 + \cos \omega_0 t)$$

gelten, so erhält man für die minimale Länge des Sendepulses

$$T_{Smin} = \frac{4 i_{min}}{\nu_r} = \frac{2(n+1)}{\nu_r} \quad (4/8)$$

Gl. 4/8 besagt, daß T_S bei Sinusumhüllender mindestens 4mal so groß sein muß, wie aus der Interferenzbedingung 4/3 ermittelt wurde. Diese Abschätzung ist realistisch, da dieser Wert auch meßtechnisch gut belegbar ist (Abb. 4/6).

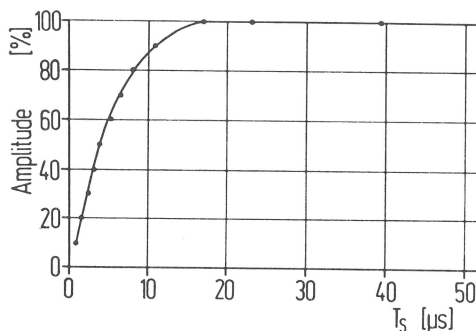


Abb. 4/6 Gemessene Echoamplitude als Funktion der Sendepulslänge bei einem hochgedämpften 1 MHz-Prüfkopf mit sieben Zonen

Es soll aber nochmals darauf hingewiesen werden, daß diese Impulslänge nur benötigt wird, wenn maximale Empfindlichkeit gefordert ist. Für den Einsatz in der Praxis wird es sinnvoll sein, den Impuls nicht nur wegen des Tiefenaufschließungsvermögens so kurz wie möglich zu machen, sondern auch um die Schräglagenabhängigkeit der Anzeigenamplitude zu mildern.

4.1.3 Prüfkopfspektrum

Zur Bestimmung seiner Bandbreite wurde der Prüfkopf mit einem sehr kurzen, also breitbandigen Impuls angeregt und der von einer Rückwand reflektierte Impuls von einem Spektrumanalysator nach seinem Frequenzinhalt wiedergegeben (Abb. 4/7).

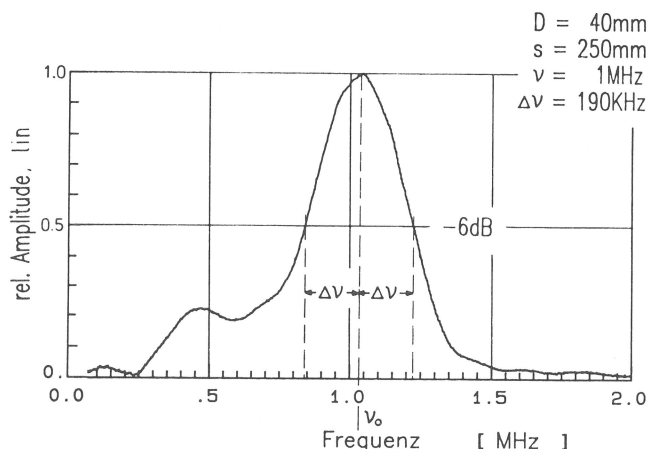


Abb. 4/7 Spektrum eines Kreiskolbenschwingers

Dieser Prüfkopf mit einer Bandbreite von 380 kHz kann also nach Gl. 4/2 noch Impulse von $T \approx 5 \mu s$ Dauer übertragen. Ein kürzerer Sendepuls ist mit diesem Prüfkopf nicht übertragbar.

4.1.4 Dicke einer vorgesetzten Zonenplatte

Der vom Prüfkopf ausgesandte Impuls durchläuft die Zonenplatte und erhält hier seine Fokussierung. Bezüglich der Schalldurchlässigkeit spielt die Dicke der Zonenplatte nach den Gl. 2/38 und 2/39, auf S. 14, eine entscheidende Rolle. Sie kann nur für die Anregungsfrequenz ν_r optimal ausgelegt werden. Aus der Beziehung 2/37, S. 14, erhält man die Abweichung der Durchlässigkeit, wenn λ bei gleichbleibender Dicke d der Zonenplatte geändert wird. Abb. 4/8 zeigt die berechnete relative Durchlässigkeit $D/D(0)$ einer Zonenplatte aus Plexiglas in Wasser und auf Stahl als Funktion des Verhältnisses d/λ . $D(0)$ ist die Durchlässigkeit bei der Plexiglasdicke 0.

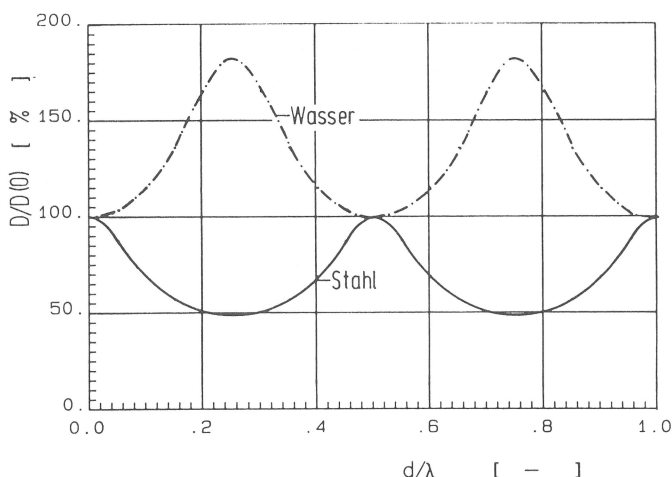


Abb. 4/8
Berechnete Durchlässigkeit einer Zonenplatte aus Plexiglas

Deutlich erkennbar ist, daß bei der Kombination Schwinger-Plexiglas-Wasser die Schalldurchlässigkeit durch die Wahl einer $\lambda/4$ -Plexiglasschicht auf 185 % gesteigert wird. Die Wahl einer $\lambda/4$ -Zonenplattendicke ist auch deshalb sinnvoll, weil in diesem Bereich die Filterwirkung der Zonenplatte bezüglich der Sendebandbreite am günstigsten ist, denn der Anstieg der Durchlässigkeitskurve ist am geringsten, und das d/λ -Verhältnis ist am kleinsten. Bei einer Sendemittelfrequenz von 1 MHz und einer Bandbreite von 300 kHz beträgt die Verringerung der Durchlässigkeit ca. 10 %. Viel stärker wird die Filterwirkung bei einem ganzzahligen Vielfachen der $\lambda/4$ -Schicht.

Ganz anders verhalten sich die Durchlässigkeiten bei der Kombination Schwinger-Plexiglas-Stahl. Vollständige Durchlässigkeit wird bei der halben Wellenlänge bzw. einem ganzzahligen Vielfachen davon erreicht. Jedoch wächst auch hier die Filterwirkung mit zunehmendem d/λ -Verhältnis. Die günstigste Zonenplattendicke ist deshalb $d = \lambda/2$. Bei einer Sendefrequenz von 2 MHz und einer Bandbreite von 300 kHz ist die Verringerung der Durchlässigkeit bezüglich der Grenzfrequenzen kleiner 10 %. Zu beachten ist bei Kontakttechnik-Messungen, daß die Zonenplattendicke regelmäßig zu kontrollieren ist, da schon geringer Abrieb die Durchlässigkeit stark vermindert. Ein Schutz der Zonenplatten vor Abnutzung ist deshalb für eine praktische Prüfung sehr wichtig.

4.2 Tauchtechnikmessungen

Mit diesen Messungen soll der Nachweis der aus den theoretischen Untersuchungen zu erwartenden Eigenschaften der verschiedenen Zonenplattentypen erbracht werden. Das Ziel der Untersuchungen ist einerseits der Nachweis der Übereinstimmung zwischen Rechnung und Messung und andererseits die Auswahl bestimmter Zonenplattentypen, die für eine

praxisnahe Kontakttechnikprüfung geeignet erscheinen. Der Einsatz einer Tauchtechnikanlage ist bei dieser Zielsetzung vorteilhaft, weil die Messungen reproduzierbar sind und keine Ankopplungsprobleme auftreten. Aufwendige Testkörper, die aufgrund von Gefügeinhomogenitäten Schallgeschwindigkeitschwankungen aufweisen können, sind nicht erforderlich. Nicht zuletzt ermöglicht die einfache Handhabung dieser Anlage (Kap. 3.2, S. 16ff) eine umfangreiche Datenspeicherung (z. B. dreidimensionale Schallfeldausmessung). Bei einem Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Schallfeldern ist zu beachten, daß die Rechnung den Schalldruck am jeweiligen Ort liefert. Da die Messungen aber in Impuls-Echo-Technik erfolgen, wird das gesendete Schallfeld mit dem reflektierten Schallfeld überlagert. Daraus folgt, daß ein 3 dB-Abfall bei der Rechnung einem 6 dB-Abfall bei der Messung entspricht. Aus Gründen der Übersichtlichkeit werden die Messungen in mehrere Gruppen unterteilt.

4.2.1 Voruntersuchungen

4.2.1.1 Vergleich von sin- und cos-Zonenplatten

Für diese Messungen wird ein hochgedämpfter 1 MHz-Prüfkopf verwendet, dem die jeweils zu untersuchende Zonenplatte vorgesetzt wird. Dadurch werden Einflußgrößen des Prüfkopfes wie Bandbreite und Empfindlichkeit konstant gehalten. Für diese Frequenz wurde je eine sin- und eine cos-Zonenplatte berechnet und gefertigt. Der Fokusabstand beider Zonenplatten beträgt 40 mm. Beide Zonenplatten bestehen aus Plexiglas. Sie werden als Phasenzonenplatten betrieben und sind so aufgebaut, daß die Rillen dem Prüfkopf abgewandt sind und sich entsprechend im Tauchbecken mit Wasser füllen können. Die für die 180°-Phasenverschiebung erforderliche Rillentiefe (Gl. 2/15, S. 6) wird entsprechend aus den Schallgeschwindigkeitsunterschie-

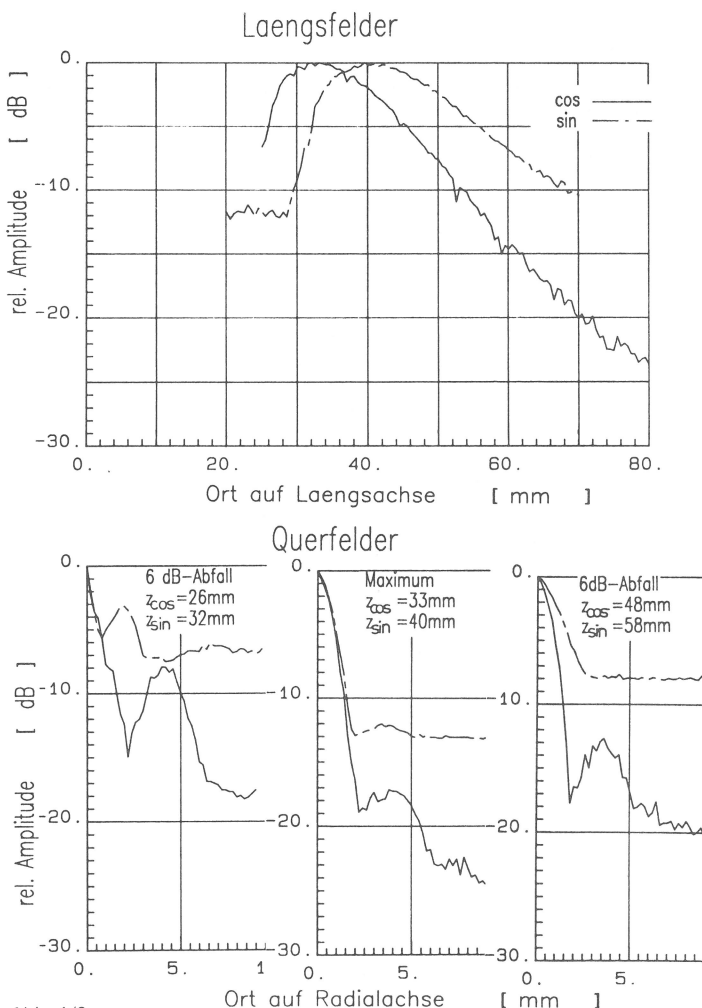


Abb. 4/9
Gemessene normierte Schallfelder von sin- und cos-Zonenplatte

den zwischen Plexiglas und Wasser berechnet. Mit dem Kugelfreflektor ($\varnothing = 2 \text{ mm}$, vgl. Kap. 3.2.2, S. 17) werden die erzeugten Schallfelder gemessen und im Rechner gespeichert. Daraus lassen sich in beliebigen Ebenen zweidimensionale Darstellungen erzeugen, die die Auswertung vereinfachen. Abb. 4/9 zeigt die gemessenen Längs- und Querfelder beider Zonenplatten. In die Querfelder sind z-Werte eingetragen, die den Abstand der jeweiligen Schnittebene vom Koordinatenursprung angeben.

4.2.1.2 Vergleich von vorgesetzter Absorptions- und Phasenzonenplatte

Das durch die vorgesezte Phasenzonenplatte erzeugte Schallfeld wurde bereits im vorangegangenen Versuch ermittelt, so daß hier lediglich das Schallfeld einer Absorptionszonenplatte mit den gleichen Daten zu berechnen und zu messen ist. Damit die Vergleichbarkeit der Meßergebnisse gegeben ist, wird die gleiche Zonenplatte wie beim vorangegangenen Versuch, jedoch mit dem Prüfkopf zugewandten Rillen gefertigt. Bleiben nun die Rillen als Hohlräume erhalten, so werden diese Zonen schallundurchlässig. Man erhält eine Absorptionszonenplatte, wenn die Rillen nicht durch Koppelmittel, mit dem die benachbarten Zonen an den Schwinger angekoppelt werden, ausgefüllt werden.

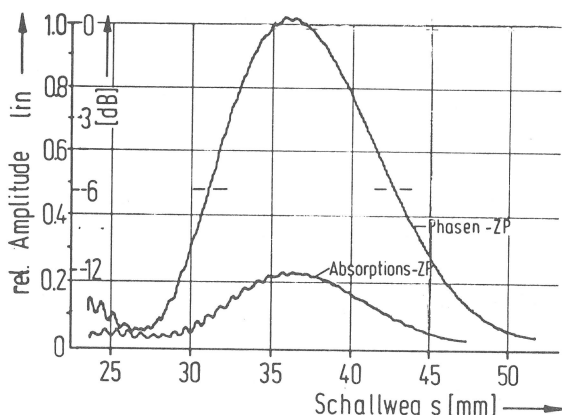


Abb. 4/10

Gemessene Längsfelder von vorgesetzter Absorptions- und Phasenzonenplatte bei gleicher Verstärkung (52 dB)

Abb. 4/10 zeigt die gemessenen Längsfelder von vorgesetzter Absorptions- und Phasenzonenplatte. Das Meßergebnis ($A_{Ph}/A_{Abs} = 12 \text{ dB}$) entspricht genau den theoretischen Erwartungen. Die normierten berechneten und gemessenen Längs- und Querfelder einer vorgesetzten Absorptions- und einer vorgesetzten Phasenzonenplatte bei 1 MHz Anregungsfrequenz und einem Fokusbabstand von 40 mm werden in den Abb. 4/11 und 4/12 dargestellt.

Tabelle 4

Vergleich zwischen Sinus- und Cosinuszonenplatte sowie zwischen vorgesetzten und integrierten Absorptions- und Phasenzonenplatten

Zonenplattentyp	Abb.-Nr.	Zonenanzahl	Hauptmaxima		Nebenmaxima							
			ΔV_R	ΔV_M	ΔV_{RN}			ΔV_{MN}				
			[dB]	[dB]	3 dB	Max	3 dB	6 dB	Max	6 dB		
vorgesetzte Zonenplatte												
Sinus	2/3	3	0	0	5	14	15	3	12	8		
Cosinus	4/9	3	0	0	15	19	12	8	17	13		
vorgesetzte Zonenplatte												
Phase	4/11	7	0	0	15	18	10	19	23	24		
Absorption	4/12	4	11	12	13	16	8	15	17	10		
integrierte Zonenplatte												
Phase	4/11	7	0	0	15	18	10	17	23	17		
Absorption	4/15	4	11	12	13	16	8	12	18	15		

ΔV Schalldruckdifferenz

Indizes: R Rechnung
M Messung
N Nebenmaxima

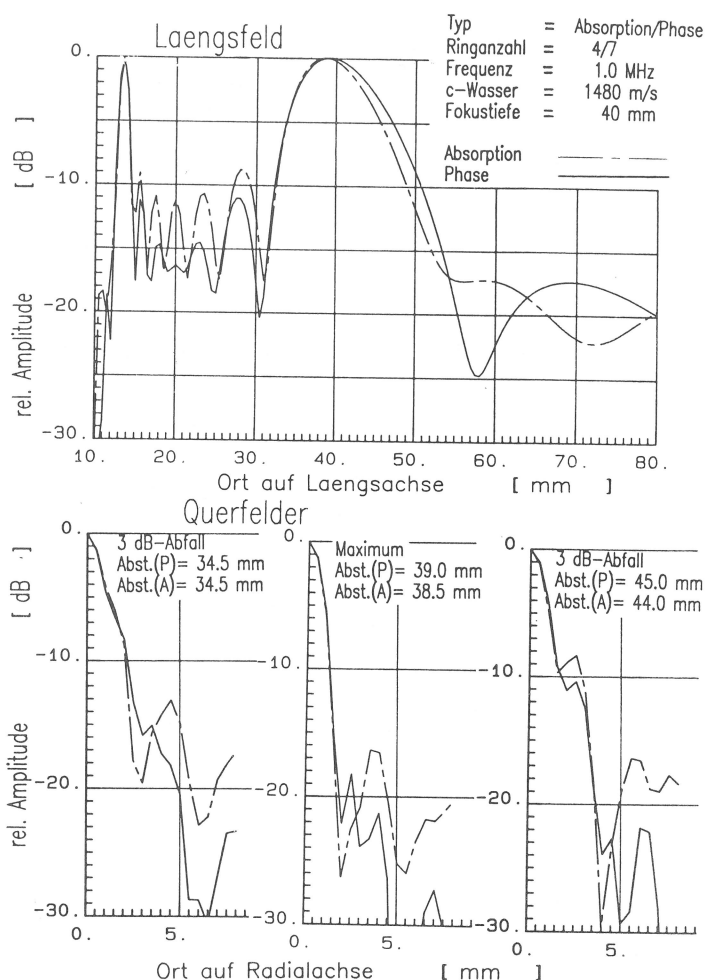


Abb. 4/11

Berechnete normierte Schallfelder von Absorptions- und Phasenzonenplatte (* Abst. = Abstand der Schnittebene vom Koordinatenursprung)

4.2.1.3 Vergleich von integrierten Absorptions- und Phasenzonenplatten

Der Aufbau der integrierten Phasenzonenplatte wurde bereits im Kap. 2.5.2, S. 13 ff, beschrieben. Daraus geht hervor, daß jede Zone einzeln kontaktiert ist, wodurch wahlweise über Schalter ein Betrieb als Absorptions- oder als Phasenzonenplatte bzw. mit beliebiger Zonenkombination möglich ist (Abb. 4/13).

Der Vorteil dieser Anordnung besteht darin, daß bei beiden Messungen der Einfluß des Prüfkopfes wiederum konstant ist. Zu beachten ist jedoch, daß die Schwingerkapazität verringert wird, wenn die Zonenplatte von Absorptions- und Phasenzonenplatte umgeschaltet wird. Das führt zu einer Verringerung der Sendespannung, die entsprechend nachzureguliert ist.

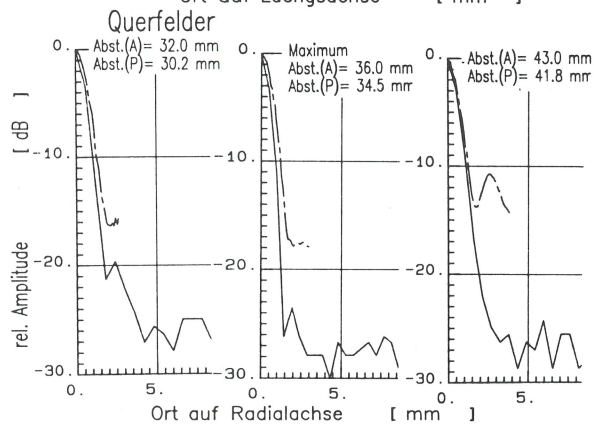
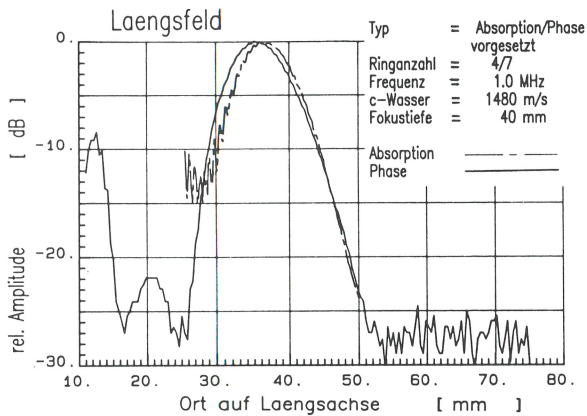


Abb. 4/12
Gemessene normierte Schallfelder von vorge-setzter Absorptions- und Phasenzonenplatte (* Abst. = Abstand der Schnittebene vom Koordinatenursprung)

Zunächst werden mit diesem Prüfkopf wieder die Längsfelder von Absorptions- und Phasenzonenplatte bei konstanter Verstärkung gemessen (Abb. 4/14).

Die mit diesem Prüfkopf von Absorptions- und Phasenzonenplatte gemessenen normierten Schallfelder werden in der Abb. 4/15 gezeigt.

Eine Zusammenstellung aller in den Voruntersuchungen erfaßten Zonenplattentypen erfolgt in der Tabelle 4, S. 25, um

Abb. 4/13
Prüfkopf mit schaltbarer integrierter Zonenplatte; Kombination der Kontakte bei
— Absorptionszonenplatte: +,0,+,...
— Phasenzonenplatte: +,-,+,-,...

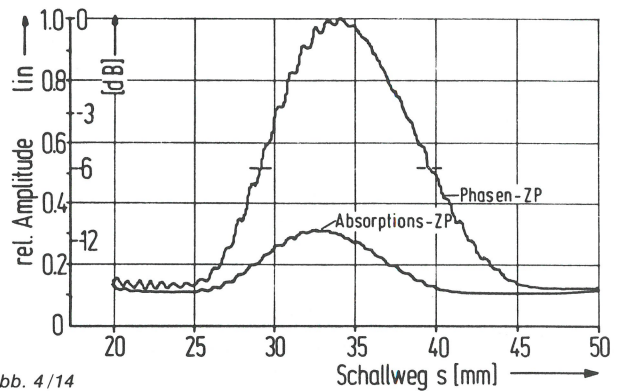


Abb. 4/14
Gemessene Längsfelder von integrierter Absorptions- und Phasenzonenplatte bei konstanter Verstärkung (58 dB)

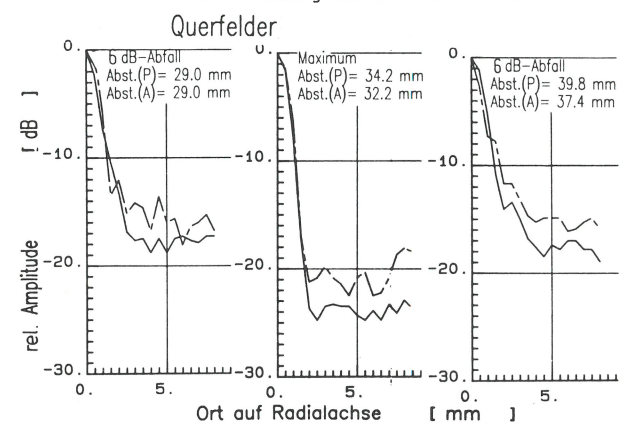
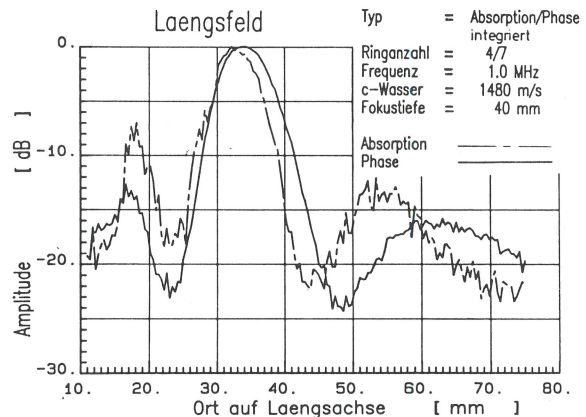
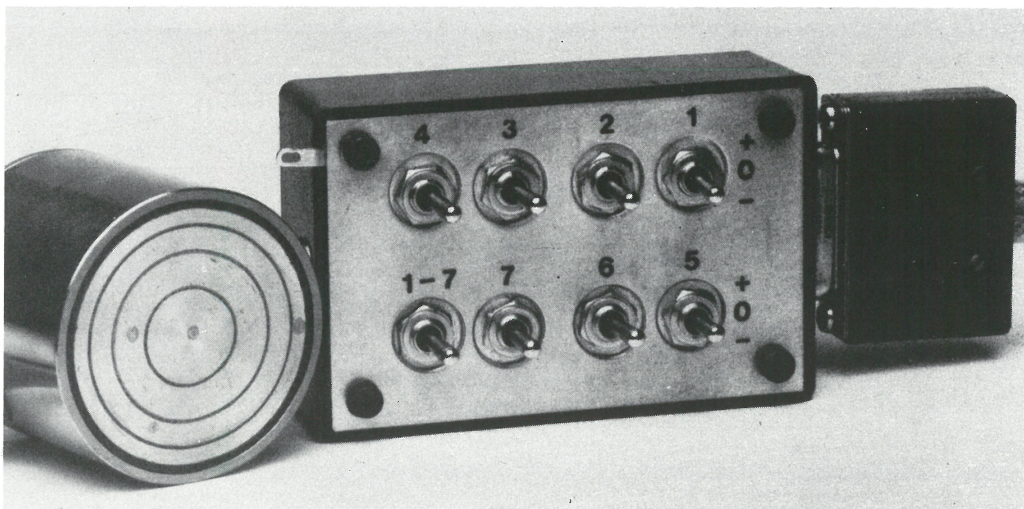


Abb. 4/15
Gemessene normierte Schallfelder von integrierter Absorptions- und Phasenzonenplatte (* Abst. = Abstand der Schnittebene vom Koordinatenursprung)



durch einen Vergleich der Ergebnisse von Rechnung und Messung die leistungsfähigsten Zonenplattentypen für die weiteren Untersuchungen auszuwählen. Aus der Tabelle ist zu entnehmen, daß für den praktischen Einsatz sin- und Absorptionszonenplatten nicht zu empfehlen sind.

4.2.2 Vergleich von berechneten und gemessenen Schallfelddaten

Für die Auslegung eines Prüfkopfes, der ein gefordertes Schallfeld erzeugen soll, sind die Frequenz ν , die Ringanzahl n und der Fokusabstand f die wesentlichen Einflußgrößen, während die charakteristischen Daten des Schallfeldes die Fokusschlauchlänge l_z , der Fokusschlauchdurchmesser D_F , der Abstand Δl_z zwischen dem vorderen 3 dB-Abfall und dem Schall-druckmaximum und der akustische Fokusabstand f_{ak} sind.

Tabelle 5
Prüfkopfparameter für Tauchtechnik-Messungen

n		1	3	7
Abb.-Nr.		4/16	4/17	4/18
f [mm]		80	40	40
f_{ak} [mm]		40	36	39
ν [MHz]		1	1	1
l_0 [mm]		40	100	260
D_0 [mm]		15,4	24,3	39,2
Abb.-Nr.		4/19	4/20	4/21
f [mm]		200	100	100
f_{ak} [mm]		100	89	98
ν [MHz]		2,5	2,5	2,5
l_0 [mm]		100	250	650
D_0 [mm]		15,4	24,3	39,2
Abb.-Nr.		4/22	4/23	4/24
f [mm]		320	160	160
f_{ak} [mm]		160	143	157
ν [MHz]		4	4	4
l_0 [mm]		160	400	1040
D_0 [mm]		15,4	24,3	39,2

Tabelle 6
Vergleich von berechneten und gemessenen Schallfeldparametern

ν	n	1		3		7	
		R	M	R	M	R	M
1	f	80,0		40,0		40,0	
	f_{ak}	40,0	38,0	35,5	32,0	39,0	36,0
	D_F	4,1	4,4	2,2	2,1	1,6	1,7
	l_z	53,5	59,5	22,0	22,0	10,5	13,6
	Δl_z	13,5	15,5	7,5	8,5	4,5	4,8
	ΔV_N	7,5	6,5	18,0	17,0	18,0	23,0
2,5	f	200,0		100,0		100,0	
	f_{ak}	100,0	103,0	89,0	88,5	98,0	96,0
	D_F	4,1	3,0	2,3	2,5	1,5	1,8
	l_z	132,5	121,0	55,5	54,5	26,0	26,0
	Δl_z	33,0	30,0	19,5	20,5	11,0	11,0
	ΔV_N	7,5	16,5	18,0	25,0	18,0	$\geq 30,0$
4	f	320,0		160,0		160,0	
	f_{ak}	160,0	148,0	143,0	140,0	156,5	158,5
	D_F	4,1	4,5	2,3	2,5	1,5	1,8
	l_z	220,0	$\approx 170,0$	90,0	95,0	41,0	41,5
	Δl_z	50,0	48,0	31,0	29,0	17,5	19,0
	ΔV_N	7,5	18,0	18,0	23,0	18,0	$\geq 30,0$

Symbole:

ΔV_N Schalldruckdifferenz zwischen Haupt- und Nebenmaximum
R Rechnung
M Messung

Maßeinheiten:

Schalldruckdifferenz dB
Frequenz MHz
Schallfeldparameter mm

Die analytischen Zusammenhänge zwischen diesen Einflußgrößen wurden im Abschnitt 2.3, S. 8 ff, hergeleitet. Durch Messungen im Tauchtechnik-Becken sollen Übereinstimmungen und Abweichungen zwischen den berechneten und gemessenen Schallfeldgrößen ermittelt werden. Die Auswahl der Prüfköpfe für diese Versuche erfolgte so (Tabelle 5), daß mit wenigen Messungen ein aussagefähiger Vergleich mit den in Tabelle 2, S. 9, berechneten Daten, die auch für eine praktische Prüfung relevant sind, erfolgen kann. Die Schallfelder werden zweidimensional mit logarithmischem Amplitudenmaßstab gezeichnet. Durch die Überlagerung der berechneten und der gemessenen Kurven ist eine einfache Auswertung möglich.

Die normierten gemessenen und berechneten Schallfelder der unterschiedlichen Cosinus-Phasenzonenplatten zeigen die Abb. 4/16 — 4/24. Es ist zu beachten, daß ein berechneter Schalldruckabfall von 3 dB einem in Impuls-Echo-Technik gemessenen Schalldruckabfall von 6 dB entspricht. Für die Messungen wurden vorgesetzte Zonenplatten verwendet, da diese für die hier verwendeten Frequenzen von 1, 2,5 und 4 MHz nur einen Prüfkopf erfordern, der mit den verschiedenen Zonenplatten versehen wird.

Die berechneten und die gemessenen Schallfeldparameter sind in der Tabelle 6 in Abhängigkeit von Frequenz und Ringanzahl zusammengestellt. Der Einfluß des Reflektorabstandes wurde bei der Rechnung nicht berücksichtigt.

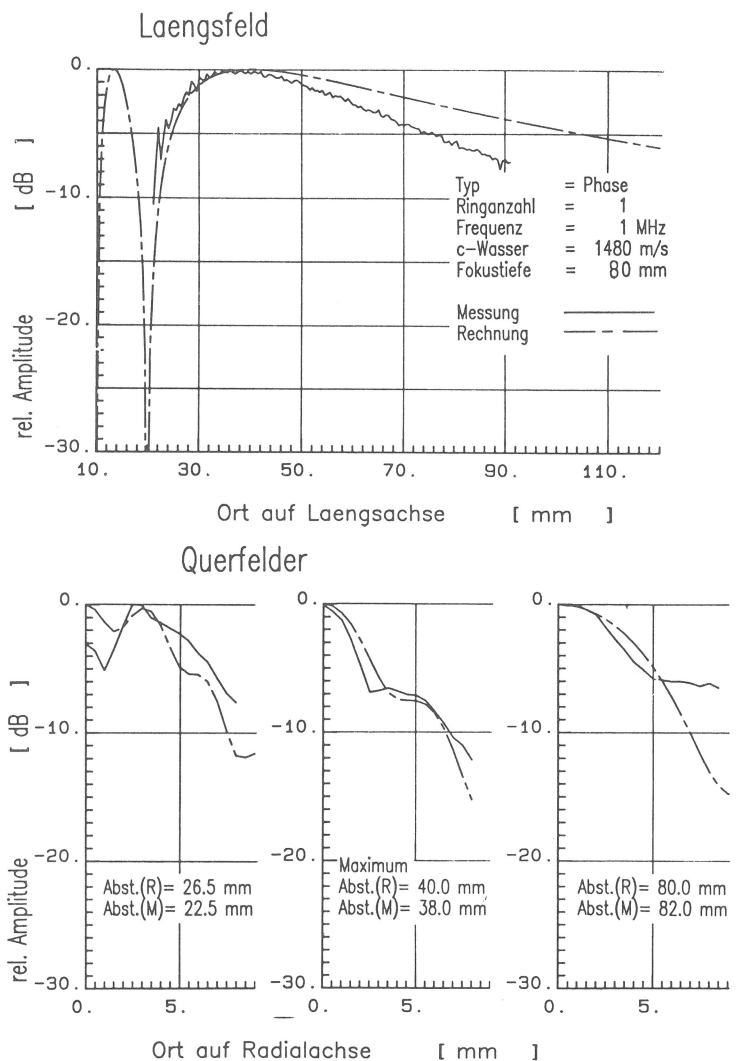


Abb. 4/16

Vergleich eines berechneten mit einem normierten gemessenen Schallfeld einer vorgesetzten Phasenzonenplatte (* Abst. = Abstand der Schnittebene vom Koordinatenursprung)

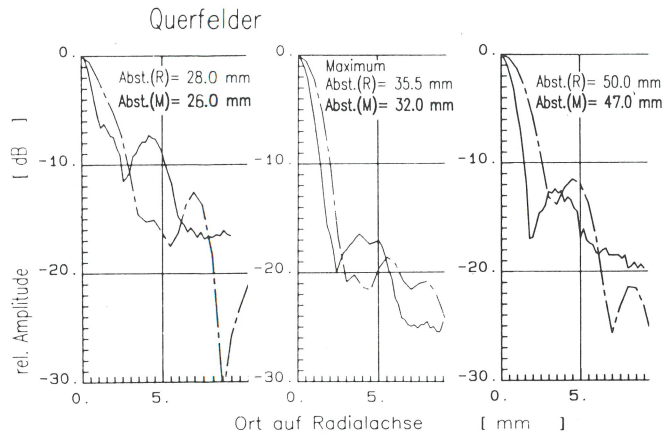
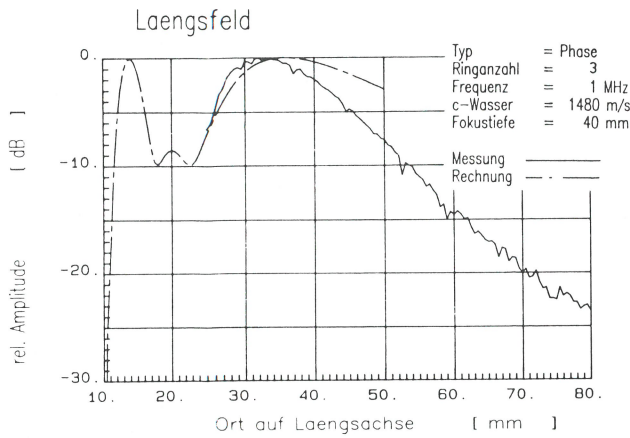


Abb. 4/17
Vergleich eines berechneten mit einem normierten gemessenen Schallfeld einer vorgesetzten Phasenzonenplatte (* Abst. = Abstand der Schnittebene vom Koordinatenursprung)

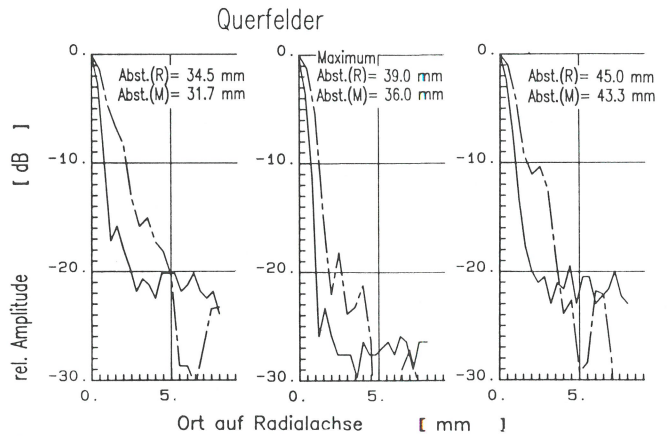
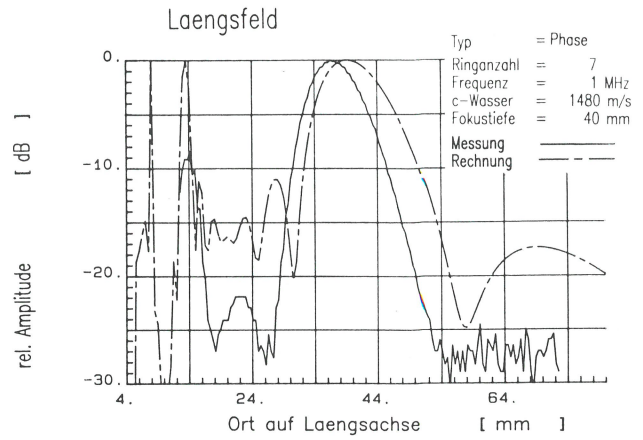


Abb. 4/18
Vergleich eines berechneten mit einem normierten gemessenen Schallfeld einer vorgesetzten Phasenzonenplatte (* Abst. = Abstand der Schnittebene vom Koordinatenursprung)

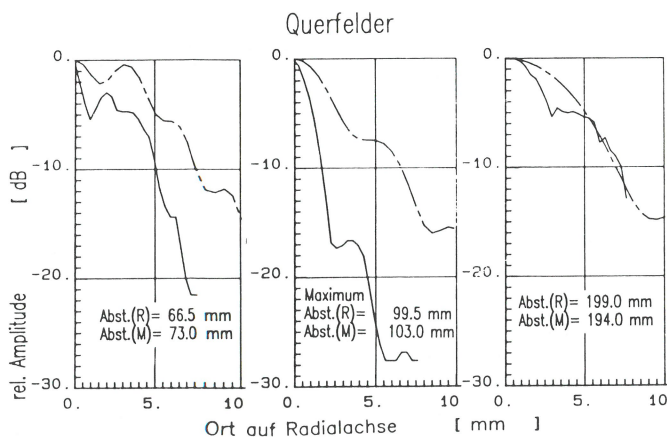
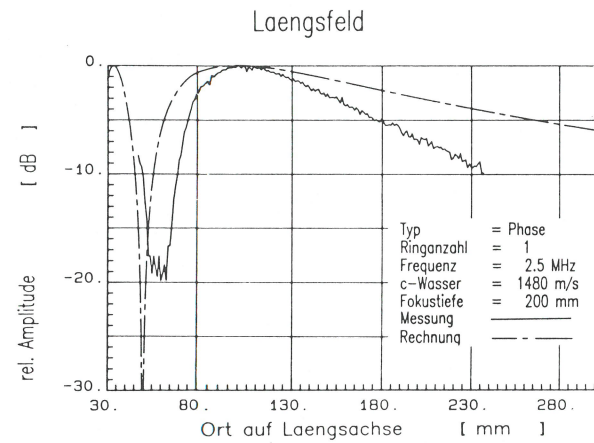


Abb. 4/19
Vergleich eines berechneten mit einem normierten gemessenen Schallfeld einer vorgesetzten Phasenzonenplatte (* Abst. = Abstand der Schnittebene vom Koordinatenursprung)

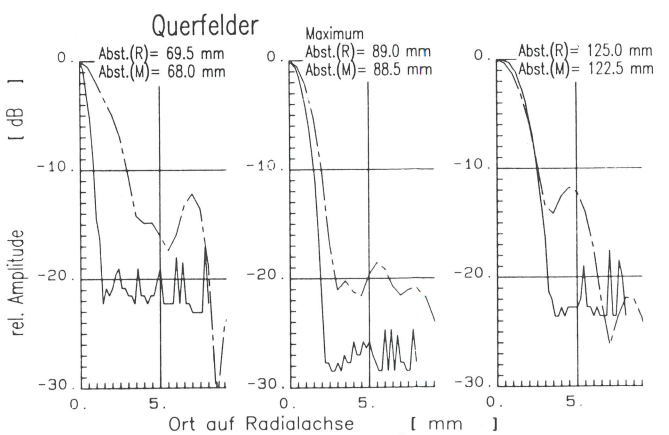
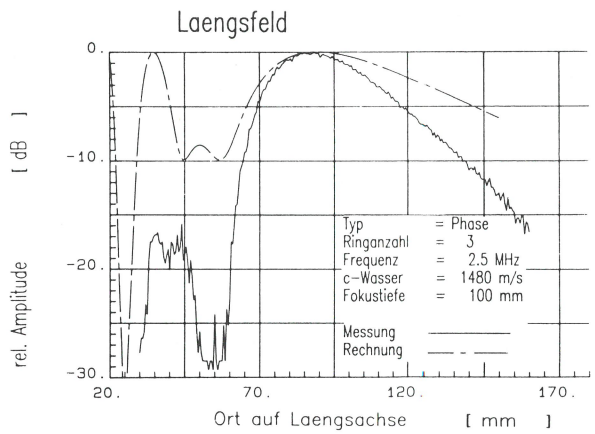


Abb. 4/20
Vergleich eines berechneten mit einem normierten gemessenen Schallfeld einer vorgesetzten Phasenzonenplatte (* Abst. = Abstand der Schnittebene vom Koordinatenursprung)

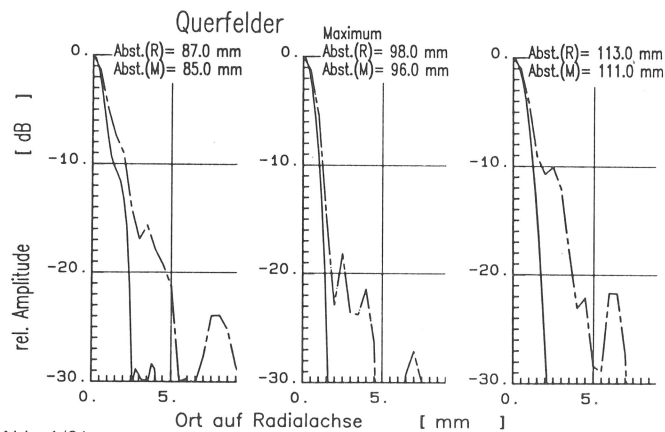
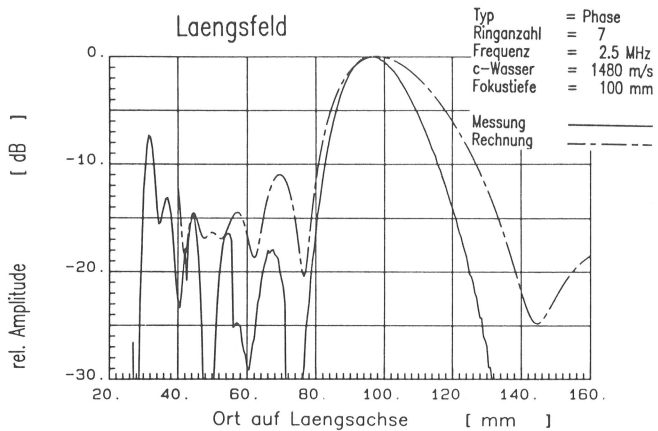


Abb. 4/21
Vergleich eines berechneten mit einem normierten gemessenen Schallfeld einer vorgesetzten Phasenzonenplatte (* Abst. = Abstand der Schnittebene vom Koordinatenursprung)

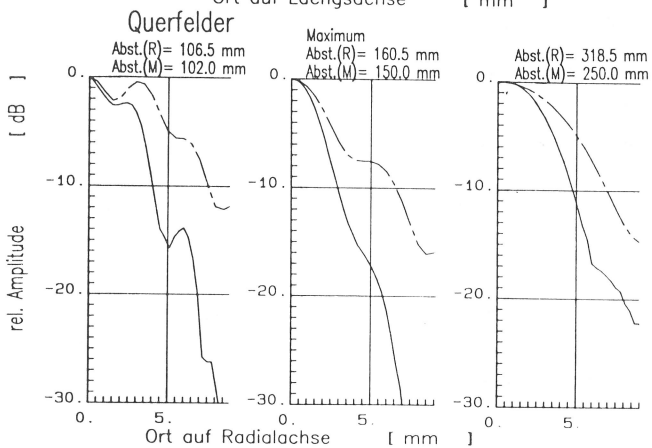
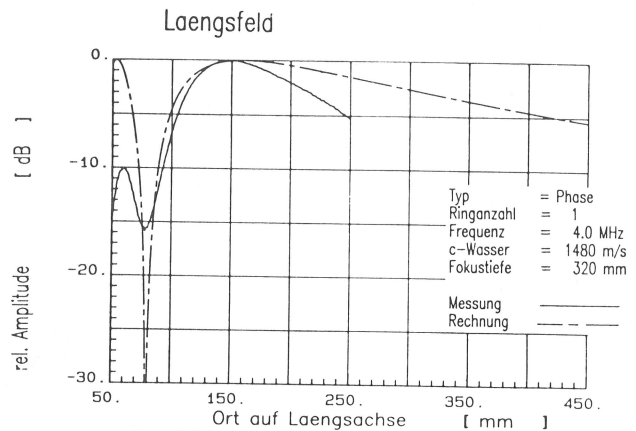


Abb. 4/22
Vergleich eines berechneten mit einem normierten gemessenen Schallfeld einer vorgesetzten Phasenzonenplatte (* Abst. = Abstand der Schnittebene vom Koordinatenursprung)

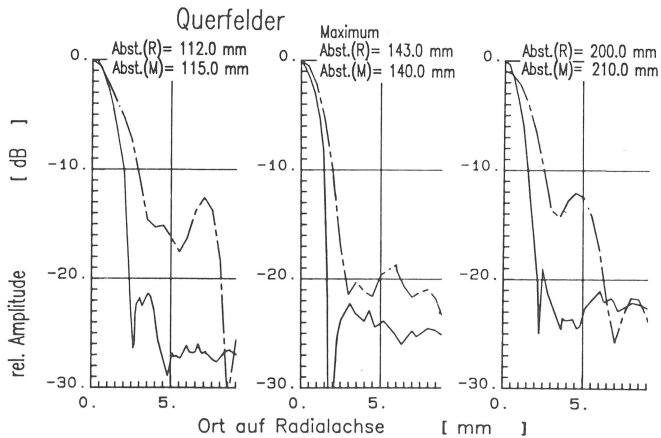
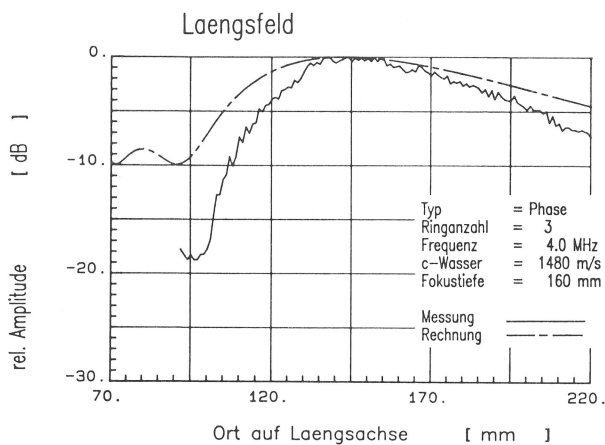


Abb. 4/23
Vergleich eines berechneten mit einem normierten gemessenen Schallfeld einer vorgesetzten Phasenzonenplatte (* Abst. = Abstand der Schnittebene vom Koordinatenursprung)

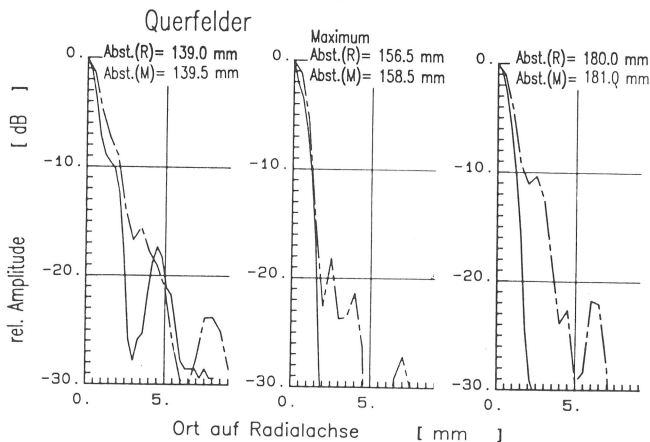
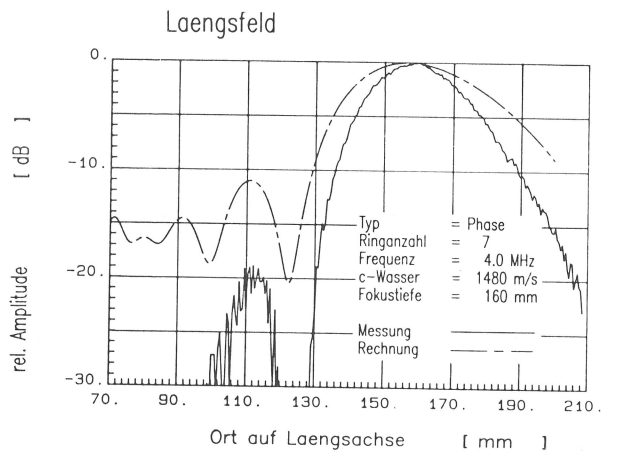


Abb. 4/24
Vergleich eines berechneten mit einem normierten gemessenen Schallfeld einer vorgesetzten Phasenzonenplatte (* Abst. = Abstand der Schnittebene vom Koordinatenursprung)

4.2.3 Variation des Fokusabstandes

Wie bei den vorangegangenen Messungen soll auch hier experimentell der Nachweis für die Richtigkeit der vom Rechner gelieferten Daten erbracht werden. Es wird die Veränderung des Fokusabstandes bei Variation der Frequenz, entsprechend Gl. 2/36, S. 11, gemessen. Die Versuche werden wiederum im Tauchtechnik-Becken an dem Kugelreflektor mit einem Durchmesser von 2 mm durchgeführt. Zur Schallfeldfokussierung ist bei dieser Aufgabenstellung ein Prüfkopf mit einer integrierten Zonenplatte zu verwenden. Anders als beim Arbeiten mit einer konstanten Frequenz geht hier die frequenzabhängige Empfindlichkeit des Prüfkopfes in das Meßergebnis ein. Als erstes wird deshalb dieser Empfindlichkeitsverlauf bei konstanter Sendespannung U_S und unterschiedlichen Anregungsfrequenzen dadurch bestimmt, daß bei jeder Frequenz das jeweils größte Echo des Kugelreflektors auf 80 % Bildschirmhöhe gestellt und die dazu benötigte Verstärkung sowie der dazugehörige Schallweg aufgezeichnet werden. Die so ermittelten Meßpunkte ergeben den Empfindlichkeitsverlauf von Abb. 4/25.

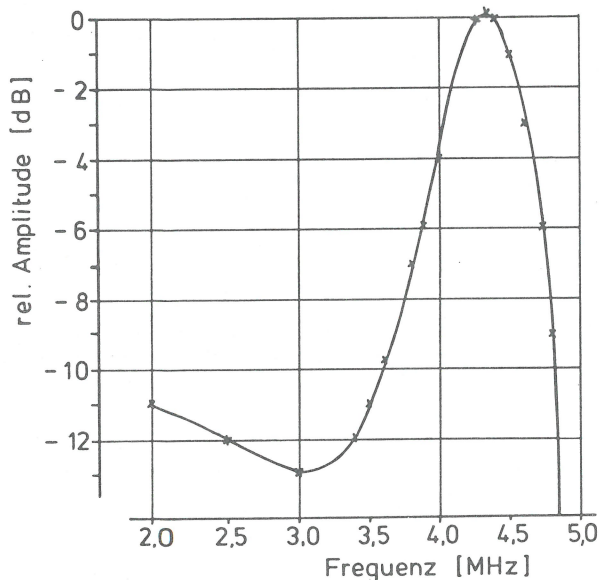


Abb. 4/25
Empfindlichkeitskurve als Funktion der Frequenz ($f = 4 \text{ MHz}$, $n = 7$)

Diese Empfindlichkeit des Prüfkopfes wird bei den Schallfeldberechnungen nicht berücksichtigt. Um die gemessenen Längs- und Querfelder bei Variation der Anregungsfrequenz mit den berechneten Werten dennoch vergleichen zu können, müssen die gemessenen Werte in ihrer Amplitude normiert werden.

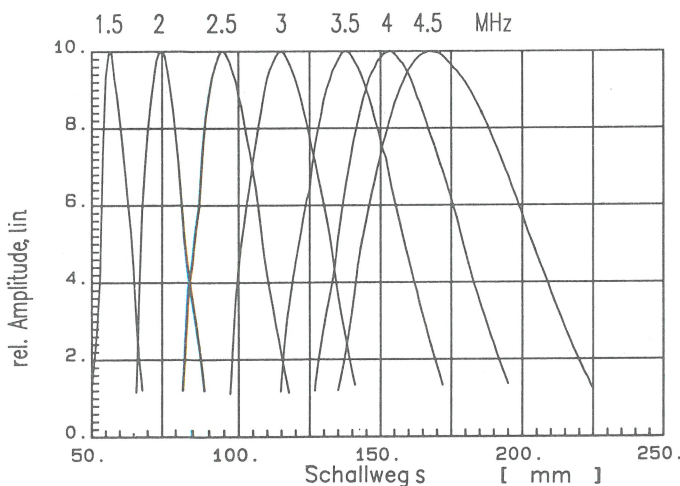


Abb. 4/26
Gemessene normierte Schallfelder einer integrierten Zonenplatte bei unterschiedlichen Frequenzen
(Zonenplatte: $\nu = 4 \text{ MHz}$, $f = 160 \text{ mm}$, $n = 7 \text{ Zonen}$)

Die Messung der Schallfelder erfolgt bei unterschiedlichen Anregungsfrequenzen von 1,5 MHz bis 4,5 MHz in Stufen von 0,5 MHz. Die relativen Schalldruckamplituden der Längsverteilungen bei gleichzeitig vorgenommener Normierung werden in Abb. 4/26 gezeigt.

Bei gleichen Prüfkopfdaten sind in Abb. 4/27 bei drei Frequenzen den normierten gemessenen die berechneten Längs- und Querfelder überlagert.

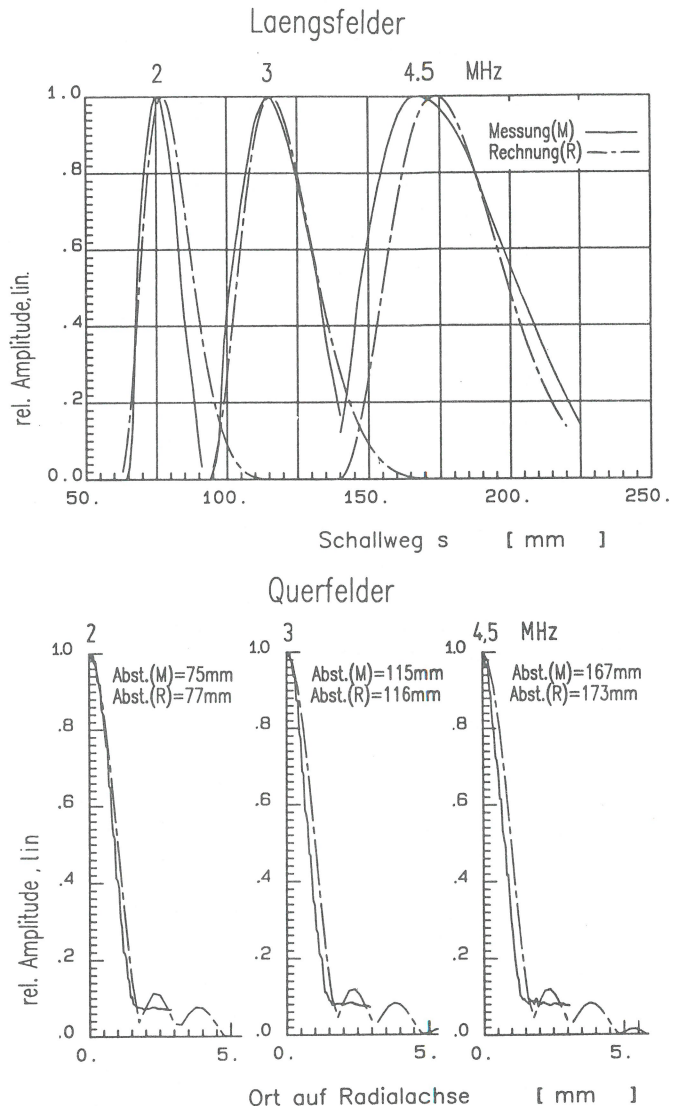


Abb. 4/27
Vergleich von gemessenen normierten mit berechneten Schallfeldern bei drei Frequenzen (* Abst. (M, R) = Abstand der Schnittebenen vom Koordinatenursprung)

4.3 Kontakttechnik-Messungen

4.3.1 Prüfkopf mit konstantem Fokusabstand

Durch die nachfolgenden Versuche soll die Eignung dieser fokussierenden Prüfköpfe, die bisher im Tauchtechnik-Verfahren erprobt wurden, für eine praxisnahe Kontakttechnikprüfung untersucht werden.

Die Messungen werden mit dem Kontakttechnik-Meßplatz (Kap. 3.3, S. 19 ff) an den dort ebenfalls beschriebenen drei Testkörpern durchgeführt. An diesen Testkörpern soll die Leistungsfähigkeit eines 4 MHz-Fokusprüfkopfes an seiner wichtigsten Anwendung, der Fehlerrandabtastung, dokumentiert werden. Der Fokusprüfkopf besitzt eine vorgesetzte Zonenplatte mit sieben Zonen und einem Fokusabstand von 40 mm. Die Länge des Sendepulses beträgt $T_S = 10 \mu\text{s}$.

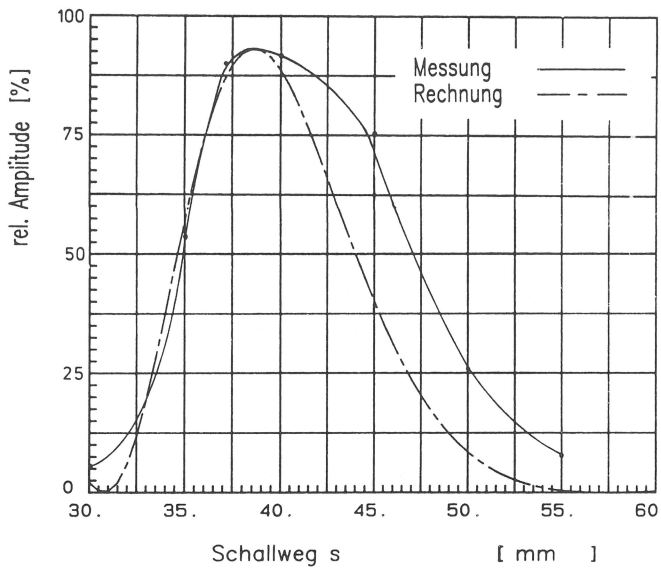


Abb. 4/28
Gemessene und berechnete Empfindlichkeitskurve eines 4 MHz-Prüfkopfes mit vorgesetzter Zonenplatte

Im ersten Versuch werden am Testkörper 2 (Abb. 3/9, S. 20) die in unterschiedlichen Tiefen angebrachten Flachlochbohrungen mit einem Durchmesser von 2 mm als Reflektoren benutzt. Bei konstanter Verstärkung kann so die Abhängigkeit der Amplitude vom Schallweg, das entspricht der Empfindlichkeitskurve des Prüfkopfes, ermittelt werden. Dieser Meßkurve wird in Abb. 4/28

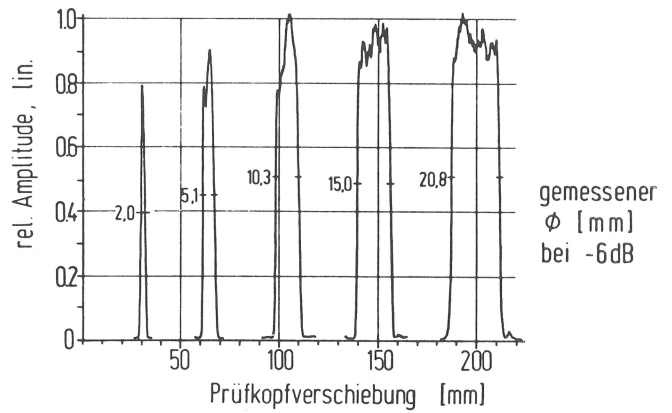


Abb. 4/29
Gemessene Durchmesser von Flachlochbohrungen ($\varnothing = 2, 5, 10, 15, 20$ mm) in 40 mm Tiefe

die berechnete Empfindlichkeitskurve, die sich aus der quadrierten Schalldruckverteilung entlang der akustischen Achse ergibt, überlagert. Die Abstände der Schalldruckmaxima unterscheiden sich um 1,5 mm und die Fokusschlauchlängen um 3 mm. Diese Werte liegen innerhalb der Versuchsgenauigkeit, die hier besonders durch die Ankopplung des Prüfkopfes an den Testkörper und durch die Ablesegenauigkeit bestimmt wird.

Die Messung mit einer integrierten Zonenplatte ergab eine fast deckungsgleiche Empfindlichkeitskurve, die deshalb nicht abgebildet wird.



Abb. 4/30
Vergleich der Aufnahmen eines Fehlers
Oben: C-Bild mit 4 MHz-Normalprüfkopf
Mitte: C-Bild mit 4 MHz-Fokusprüfkopf
Unten: Röntgenaufnahme

Beim zweiten Versuch werden am Testkörper 1 (Abb. 3/8, S. 20) Flachbohrungen mit verschiedenen Durchmessern in gleicher Tiefe abgetastet (Abb. 4/29).

Die Wiederholung der Messung mit einer integrierten Zonenplatte mit gleichen Daten führte zu identischen Ergebnissen.

Der dritte Versuch wird an einem plattierten Behälterausschnitt (Abb. 3/10, S. 20) mit einem realen Fehler durchgeführt. Die Darstellung der Meßwerte erfolgt als C-Bild (Abb. 4/30). Zur Kontrolle wird diese Messung mit einer Röntgenaufnahme verglichen.

4.3.2 Variation des Fokusabstandes

Wie beim „Zoom“-Fokusprüfkopf für die Tauchtechnikmessungen, so wird auch hier ein möglichst breitbandiger Kontakttechnik-Prüfkopf angestrebt, um einen großen „Zoom“-Bereich zu

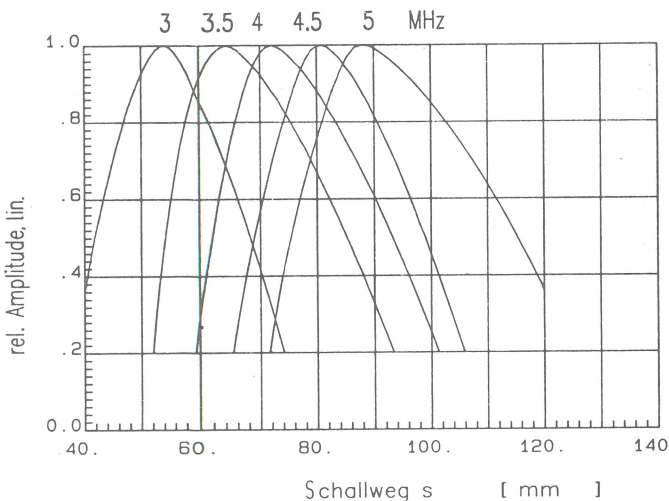


Abb. 4/31
Gemessene normierte Empfindlichkeitskurven in Stahl bei verschiedenen Frequenzen ($n = 3$)

erhalten. Die mögliche Verschiebung des Fokusbereiches in Stahl wird für einen Prüfkopf mit integrierter Zonenplatte ermittelt. Der Prüfkopf besitzt eine mittlere Frequenz von $\nu_0 = 4$ MHz, einen Schwingerdurchmesser $D_0 = 40$ mm und $n =$ vier Zonen.

Die Messungen werden am Testkörper 2 durchgeführt, der Flachlochbohrungen mit einem Durchmesser von 2 mm in unterschiedlichen Tiefen enthält (Abb. 3/9, S. 20).

Bei Anregungsfrequenzen zwischen 3 MHz und 5 MHz werden in Stufen von 0,5 MHz die normierten relativen Schalldruckamplituden der Längsverteilungen aufgezeichnet (Abb. 4/31).

Zur Vereinfachung eines Vergleiches werden in Abb. 4/32 die berechneten den gemessenen normierten Empfindlichkeitskurven bei drei unterschiedlichen Frequenzen überlagert. Trotz der Einflüsse von Koppelspalt und Testkörper stimmen auch hier die berechneten Kurven mit den gemessenen recht gut überein.

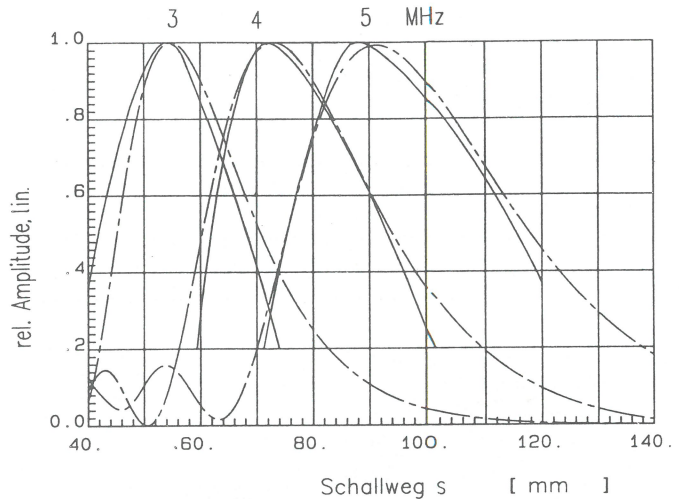


Abb. 4/32
Vergleich von berechneten mit gemessenen normierten Empfindlichkeitskurven in Stahl bei drei Frequenzen ($n = 3$)

5. Diskussion der Meßergebnisse

5.1 Tauchtechnikuntersuchungen

5.1.1 Voruntersuchungen

In Tabelle 4, S. 25, wurden die gemessenen und berechneten Differenzen der Echohöhen ΔV_N zwischen Haupt- und Nebenmaxima der einzelnen Zonenplattentypen zusammengestellt. Die Größe ΔV_N gibt über die Qualität des Schallfeldes Auskunft. Bei kleinem ΔV_N kann ein eventueller Fehler durch ein Nebenmaximum des Schallfeldes erfaßt werden, so daß ein Fehler mehrfach registriert wird. Dadurch kann eine Fehlinterpretation des Prüfergebnisses entstehen. Die Auswahl des geeigneten Zonenplattentyps wird deshalb durch die Größe von ΔV_N bestimmt.

5.1.1.1 Sinus- und Cosinuszonenplatte

Beim Vergleich von Sinus- und Cosinuszonenplatte bestätigen sich die Erwartungen, daß durch Verwendung von Cosinuszonenplatten im allgemeinen größere Verstärkungsdifferenzen zwischen Haupt- und Nebenmaxima erzielt werden. Das ist auf den kleineren Durchmesser der inneren Zonen zurückzuführen. Die Nahfeldlänge dieser Zone ist nur halb so groß wie der Fokusabstand der Zonenplatte. Dadurch erscheinen die ausgeprägten Nebenmaxima der inneren Zonen prüfkopfnäher, d. h. sie werden aus dem Fokusbereich zum Prüfkopf hin verlagert. Qualitativ ist das in Abb. 2/12, S. 7, zu sehen. Dieses

Phänomen soll hier nicht weiter untersucht werden. Es wird aber darauf hingewiesen, da es eventuell zur Konzipierung eines fokussierenden Sende-Empfangs-Prüfkopfes genutzt werden kann. Die innere Zone des Prüfkopfes könnte z. B. als Sender betrieben werden, während die äußeren Zonen als Empfänger dienen.

5.1.1.2 Vorgesetzte und integrierte Absorptions- bzw. Phasenzonenplatte

Aus Tabelle 4 ist zu entnehmen, daß die theoretische und die gemessene Verstärkungsdifferenz zwischen der Absorptionszonenplatte und der Phasenzonenplatte gut übereinstimmen. Allerdings muß bei der integrierten Zonenplatte beim Übergang von der Phasen- zur Absorptionszonenplatte der Sendeimpuls konstant gehalten werden. Außerdem zeigen diese Messungen, daß die beschriebenen Maßnahmen zur Konstruktion einer Phasenzonenplatte tatsächlich zu der gewünschten Phasenumkehr und damit zur erwarteten Verstärkung des Schalldruckes im Maximum um 12 dB führen (Abb. 4/10 und 4/14). Aus den Abbildungen 4/10 — 4/12, 4/14 und 4/15 ist außerdem die gute Übereinstimmung der Meßkurven von vorgesetzter und integrierter Zonenplatte zu entnehmen. Die Schallfeldausdehnungen im Fokusmaximum sowohl in Längs- als auch in Querrichtung bleiben unbeeinflusst. Das Verhältnis zwischen Hauptmaximum und Nebenmaxima ist bei einer Phasenzonenplatte wesentlich günstiger als bei einer Absorptionszonenplatte.

Darüber hinaus ist das Verhältnis zwischen Haupt- und Nebenmaxima bei der vorgesetzten Zonenplatte geringfügig besser als bei der integrierten, weil die Plexiglasplatte für bestimmte Frequenzbereiche die Durchlässigkeit verbessert.

Zusammenfassend ergibt sich, daß die Phasenzonenplatte erwartungsgemäß wesentlich besser für diese Art der Fokussierung geeignet ist, so daß die Vorgehensweise, nur noch Phasenzonenplatten zu untersuchen, gerechtfertigt wird. Da die Ultraschalleigenschaften von vorgesetzter und integrierter Zonenplatte nahezu gleich sind, sind für die Entscheidung über ihren Einsatz lediglich der Anwendungszweck und die Fertigungskosten ausschlaggebend. Während bei Variation des Fokusabstandes die integrierte Zonenplatte verwendet werden muß, ist die vorgesetzte Zonenplatte für die Prüfung mit konstantem Fokusabstand wesentlich billiger.

5.1.2 Schallfelddaten

Die gemessenen Schallfeldabmessungen werden in den Abb. 4/16 — 4/24 mit den berechneten Schallfeldern verglichen. Es ergibt sich eine gute Übereinstimmung zwischen den jeweiligen Kurven, insbesondere, wenn man berücksichtigt, daß die Schallschwächung im Prüfmedium sowie Kopplungsverluste zwischen Schwinger und Zonenplatte und Fertigungsungenauigkeiten bei der Rechnung vernachlässigt werden.

Die charakteristischen Schallfeldparameter sind in der Tabelle 6, S. 27, in Abhängigkeit von Frequenz und Ringanzahl zusammengestellt:

f_{ak} : Geringe Abweichungen ($\leq 8\%$) zwischen Rechnung und Messungen, die auf die Schallschwächung im Wasser und auf die schwierige Positionierung des Manipulators in Schallausbreitungsrichtung (Genauigkeit ± 1 mm) zurückzuführen sind. Die Annäherung von f_{ak} an f wird in Übereinstimmung mit der Rechnung (Tabelle 2, S. 9) bei steigender Ringanzahl deutlich sichtbar.

D_F : Die Abweichungen zwischen Rechnung und Messungen für $n > 1$ sind $\leq 12\%$. Sie sind einerseits auf die mit dem verwendeten Kugelreflektor erzielbare Auflösung ($\leq 0,25$ mm) und andererseits auf die Positioniergenauigkeit des Manipulators in Querrichtung ($\pm 0,25$ mm) zurückzuführen. Deutlich sichtbar wird der Zusammenhang zwischen der Ringanzahl und D_F , wodurch der Ansatz für den Proportionalitätskoeffizienten

$$C_D \approx 0,65 n^{-0,5}$$

(S.10) auch meßtechnisch bestätigt wird. Die Messung mit dem unfokussierten Prüfkopf ($n = 1$) bei 2,5 MHz war wegen des geringen Schalldruckes im Fokusbereich schwierig. Es trat bei diesem Versuch eine größere Abweichung (27 %) bzgl. der Rechnungen auf.

l_z : Die Abweichungen zwischen Rechnung und Messung sind kleiner als 12 %, lediglich bei 4 MHz und einer Zone tritt eine größere Abweichung auf. Bei diesem Versuch ist der Schallweg sehr groß und der Fokussierungsfaktor 1, so daß im Nahfeldabstand ($l_0 = f_{ak} = 160$ mm) nur ein sehr niedriger Schalldruck meßbar war. Es mußte deshalb mit sehr großen Geräteverstärkungen gearbeitet werden. Das dadurch auftretende elektronische Rauschen und die mit dem großen Meßbereich ($l_z \approx 170$ mm) verbundene Schallschwächung erschwerten diese Messung und erklären die große Abweichung zwischen Rechnung und Meßergebnis ($\approx 23\%$).

Δl_z : Die Abweichungen zwischen Rechnung und Messungen sind kleiner als 14 % und liegen damit innerhalb der Meßgenauigkeit.

ΔV_N : Die Berechnung ergibt ein Anwachsen von ΔV_N von 7,5 dB auf 18 dB beim Übergang von einer (unfokussiert) auf drei Zonen. Bei zwei Zonen ergibt sich ein theoretischer Wert für ΔV_N von 13,5 dB. Eine weitere

Vergrößerung der Zonenanzahl bringt nach der Rechnung keine Vergrößerung von ΔV_N . Die Messungen bestätigen, daß die Nebenmaxima bei nichtfokussierenden Prüfköpfen am ausgeprägtesten auftreten und durch Vorsetzen einer Zonenplatte reduziert werden. Jedoch sind bei den Messungen die Nebenmaxima kleiner oder gleich groß wie die berechneten. Insbesondere bei sieben Zonen sind die Nebenmaxima so klein, daß sie nur bei einem Prüfkopf (1 MHz) gemessen werden konnten.

5.1.3 Fokusverschiebung

Abb. 4/26 S. 30, zeigt, daß tatsächlich mit steigender Frequenz das Fokusmaximum entlang der akustischen Achse vom Prüfkopf weg verschoben wird. In Abb. 5/1 werden die nach Gl. 2/36, S. 11, berechneten Fokusabstände den gemessenen gegenübergestellt. Die mittlere Abweichung zwischen den berechneten und den gemessenen Fokusabständen ist bei diesem Beispiel kleiner als 6 %. Darin ist der Unterschied zwischen f und f_{ak} , der hier 2,2 % beträgt (s. Tabelle 2, S. 9), enthalten.

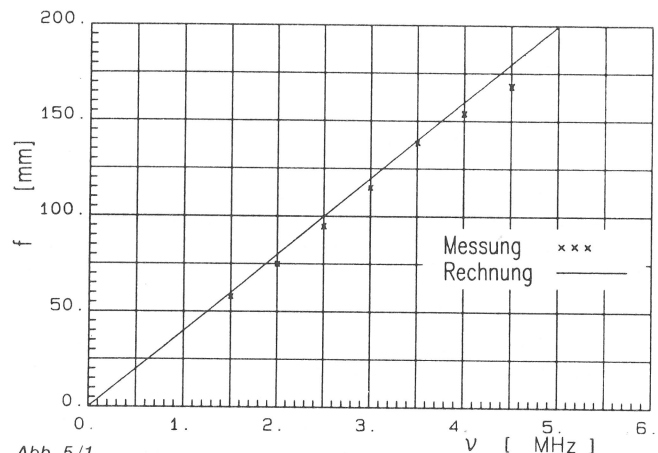


Abb. 5/1
Fokusabstand als Funktion der Frequenz

Diese gute Übereinstimmung zwischen Rechnung und Messung wird auch durch Abb. 4/27, S. 30, deutlich. Dieses Bild zeigt außerdem, daß der Fokusschlauchdurchmesser bei der Frequenzvariation im untersuchten Frequenzbereich in Übereinstimmung mit Gl. 2/29, S. 11, von der Frequenz nicht abhängt, dagegen offensichtlich stark von der Zonenanzahl der Zonenplatte. Für den Einsatz zur Fehlerbeschreibung ist dieses Ergebnis besonders wichtig, da andernfalls Fehler in verschiedenen Tiefen unterschiedlich bewertet werden würden. Zu beachten ist bei der Prüfung in verschiedenen Tiefen, daß die Verstärkung entsprechend der Prüfkopfempfindlichkeit nachjustiert wird (Abb. 4/25, S. 30).

Eine Frequenzerhöhung bewirkt also eine Verschiebung des Fokusabstandes und eine Verlängerung des Fokusschlauches bei konstantem Fokusschlauchdurchmesser. Um einen großen Verschieberegion zu erhalten, sollten für diese Anwendung sehr breitbandige Prüfköpfe eingesetzt werden.

5.2 Diskussion der Kontakttechnik-Messungen

5.2.1 Konstanter Fokusabstand

5.2.1.1 Empfindlichkeitskurve

Bei dem hierzu durchgeführten Versuch (Abb. 4/28, S. 31) ist eine gute Übereinstimmung der berechneten mit der gemessenen Empfindlichkeitskurve feststellbar. Das Fokusmaximum tritt beim vorausgerechneten Abstand von 38 mm auf. Die berechnete Fokusschlauchlänge beträgt 9,7 mm, und die gemessene beträgt 12,5 mm. Diese Verlängerung um 29 %, deren Ursache die Sendebandbreite ist, steht mit der Theorie (S. 11) im Einklang. Sie wirkt sich auf die praktische Einsetzbarkeit des Prüfkopfes positiv aus, da dadurch der erfaßbare Tiefenbereich größer wird.

5.2.1.2 Abtasten von Flachlochbohrungen

Es wurde bei diesem Versuch (Abb. 4/29, S. 31) eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den tatsächlichen und den gemessenen Bohrungsdurchmessern ermittelt ($F \leq 4\%$). Dieses gute Ergebnis ist nur bei einem kleinen Fokusschlauchdurchmesser erreichbar. Aus dem Meßergebnis kann deshalb geschlossen werden, daß durch die verwendete Zonenplatte entsprechend der Berechnung (s. Tabelle 2, S. 9, $D_F = 1,52\text{ mm}$) ein kleiner Fokusschlauchdurchmesser erzielt wurde. Ein weiterer Hinweis dafür ist die Verringerung der Amplitude beim Durchmesser von 2 mm. Das deutet daraufhin, daß der Bohrungsdurchmesser die Größenordnung des Schallbündeldurchmessers besitzt.

5.2.1.3 Abtasten eines natürlichen Fehlers

In Abb. 4/30 wird der Fehler mit dem Fokusprüfkopf wesentlich schärfer und kontrastreicher abgebildet als mit dem Normalprüfkopf. Das mit dem Fokusprüfkopf erzeugte C-Bild zeigt eine Unterbrechung des Fehlers, die bei der Messung mit dem Normalprüfkopf nicht auftritt. Die größten gemessenen Fehlerausdehnungen betragen:

6. Zusammenfassung

Ziel der Arbeit war es, festzustellen, ob mit Fresnelschen Zonenplatten fokussierte Ultraschallfelder für die zerstörungsfreie Werkstoffprüfung einsetzbar sind und wie gegebenenfalls ein derartiger fokussierender Prüfkopf zu berechnen und aufzubauen ist.

Ausgehend von der mathematischen Beschreibung des Schallfeldes einer kreisförmigen Membran wurde unter Einbeziehung einer Transparenzfunktion — sie stellt die Zonenplatte dar — das Schallfeld für normal einschallende Prüfköpfe berechnet. Dazu wurde ein Rechenprogramm erstellt und so ausgebaut, daß die zwei- und die dreidimensionale Darstellung der berechneten sowie der gemessenen Schallfelder möglich war.

Die Schallfeldfokussierung mittels Fresnelscher Zonenplatten erfolgt durch Beugung derart, daß die Schallwellen, die von unterschiedlichen Zonen kommen, im Fokuspunkt phasenrichtig überlagert werden. Eine Fresnelsche Zonenplatte besteht aus einer innenliegenden Kreisscheibe und konzentrischen Kreisringen, die bei der Sinuszonenplatte alle den gleichen Flächeninhalt besitzen. Dagegen ist der Flächeninhalt der innersten Zone einer Cosinuszonenplatte nur halb so groß wie der Flächeninhalt jedes einzelnen Kreisringes. Sind die Fresnelschen Zonen abwechselnd schalldurchlässig und schallundurchlässig (Absorptionszonenplatte), so werden gerade solche Phasendifferenzen erzeugt, daß die Zonenplatte wie eine fokussierende Linse wirkt. Setzt man an die Stelle der schallundurchlässigen Fresnelschen Zonen solche Ringe, die eine 180° -Phasenverschiebung des durchtretenden Schalls gegenüber benachbarten Ringzonen bewirken (Phasenzonenplatte), so läßt sich die vorher in den schallundurchlässigen Ringzonen absorbierte Energie zusätzlich nutzbar machen.

Die für die Prüfkopfberechnung notwendigen Beziehungen wurden mit Hilfe von Regressionsrechnungen in Form von Näherungsformeln ermittelt, mit denen auf einfache Weise die Konstruktionsdaten der Prüfköpfe so zu bestimmen sind, daß ihre Schallfelder dem jeweils vorliegenden speziellen Prüfproblem angepaßt werden können.

Bei der praktischen Realisierung wurden eine Reihe von Materialien auf ihre Eignung zur Herstellung von Phasenzonenplatten untersucht. Als günstig erwies sich eine fest/flüssig Materialkombination, da das flüssige Medium gleichzeitig als Ankopplung für den Ultraschallschwinger dienen kann. Im einfachsten Falle ist dies eine Plexiglas-Zonenplatte, deren Zonen als rechteckförmige Nuten berechneter Breite und Tiefe ausgebildet sind und mit Glycerin zur Erzeugung der

10 x 130 mm mit dem Fokusprüfkopf und 22 x 137 mm mit dem Normalprüfkopf gemessen.

Die zusätzlich angefertigte Röntgenaufnahme soll beweisen, daß an der geprüften Stelle tatsächlich ein Fehler dieser Größenordnung auftritt. Jedoch sind auf der Röntgenaufnahme lediglich die voluminösen Fehlstellen sichtbar, während erwartungsgemäß die Haftungsfehler nicht abgebildet werden. (Die Fehlerart ist aus Schlibbildern, die hier nicht wiedergegeben wurden, bekannt.)

5.2.2 Variabler Fokusabstand

In Übereinstimmung mit der Theorie und mit vergleichbaren Tauchtechnikmessungen werden die Fokusabstände mit steigender Frequenz größer (Abb. 4/31, S. 32). Die größte Abweichung des Meßwertes von der Rechnung tritt bei 5 MHz auf und beträgt 5 % (Abb. 4/23, S. 29). Dieses Bild zeigt außerdem, daß mit wachsender Frequenz die Fokusschlauchlängen größer werden. Jedoch sind die Meßwerte im Vergleich zur monochromatischen Rechnung etwa doppelt so groß. Eine Ursache dafür ist die Übertragung kurzer Impulse, wodurch eine Verlängerung von l_z entsteht.

Phasenunterschiede zwischen benachbarten Zonen ausgefüllt werden.

Um den Effekt der Variation der Brennweite durch Variation der Frequenz ausnutzen zu können, wurde ein Prüfkopf mit einer in den Ultraschallschwinger selbst integrierten Zonenplatte entwickelt. Der Ultraschallschwinger wird dabei in Fresnelsche Zonen eingeteilt, welche elektrisch unabhängig und gegeneinander phasengedreht angeregt werden können. Damit ist der Prüfkopf frei von Interferenzstörungen, die in einer vorgesetzten Zonenplatte auftreten würden, und kann innerhalb seiner Bandbreite durchgestimmt werden. Der Prüfkopf selbst muß allerdings zur Erfüllung der Interferenzbedingungen für die Fokussierung schmalbandig angeregt werden.

Beide Prüfkopftypen wurden sowohl für die Anwendung in Tauchtechnik als auch in Kontakttechnik hergestellt.

Die Messung der Schallfelddaten der Prüfköpfe ergab eine gute Übereinstimmung mit den vorausgerechneten Daten. Erwartungsgemäß sind die Phasenzonenplatten empfindlicher als die Absorptionszonenplatten. Darüber hinaus ist bei ihnen das Verhältnis zwischen Haupt- und Nebenmaxima wesentlich günstiger, so daß für die praktische Anwendung nur dieser Prüfkopftyp verwendet wurde.

Auch der theoretisch vorhergesagte hohe Fokussierungsgrad konnte experimentell erzielt werden. Die Randabtastung an verschiedenen Kreisscheibenreflektoren ($\varnothing 2\text{ mm} - \varnothing 20\text{ mm}$) in 40 mm Tiefe ergab eine sehr gute Übereinstimmung mit den tatsächlichen Größen (Abweichung $\leq 4\%$).

Schließlich gelang auch die Variation der Brennweite durch Variation der Frequenz in der vorausgerechneten Weise. Da das Ausmaß der Fokus-Verschiebung durch Frequenzvariation nur innerhalb der Bandbreite des Ultraschallschwingers möglich ist, sollte dieser so breitbandig wie möglich sein.

Neben der einfachen Handhabbarkeit — im einfachsten Fall kann die Zonenplatte als auswechselbare Vorsatzlinse auf einen handelsüblichen Normalprüfkopf aufgesetzt werden — ermöglicht diese Methode der Schallfeldfokussierung die Erzeugung vergleichsweise kurzer Brennweiten bei gleichzeitig hohem Fokussierungsgrad neben der Möglichkeit der Variation der Brennweite durch Variation der Frequenz. Dies läßt ihren Einsatz, im Gegensatz zur Fokussierung durch sphärische Linsen, auch für die Prüfung relativ dünnwandiger geschweißter Bauteile als vorteilhaft erscheinen. Andererseits ist das

Tiefenaufklärungsvermögen bei Fokussierung mit Brechungslinsen besser, da bei einer Fokussierung mit Zonenplatten längere Impulse benötigt werden. Das transversale Auflösungsvermögen, das durch den Fokusschlauch-Durchmesser gegeben ist, ist bei beiden Fokussierungsarten gleich, da dieser bei beiden durch die bekannte Airy-Verteilung beschrieben ist.

Ein weiterer wichtiger Prüfkopfparameter ist die Fokusschlauchlänge, da bei der Prüfung von dickwandigen Komponenten durch große Fokusschlauchlängen die benötigte Prüfkopanzahl stark reduziert wird. Auch hier zeigt der Vergleich mit der normalen Linsenfokussierung, daß beide Systeme die gleichen Eigenschaften besitzen. Versuche mit anderen Linsenformen, z. B. Kegel oder Toroid [49], führten zwar zu einer Fokusschlauch-Verlängerung, ergaben aber gleichzeitig eine Anhebung der Nebenmaxima [8]. Dieser Nebeneffekt ist aber keineswegs wünschenswert, da eine Fehlergrößenbestimmung nach der Viertelwerts- oder 20 dB-Ausdehnung nur möglich ist, wenn Störungen durch starke Nebenkeulen nicht auftreten. Eine

Reduzierung der Prüfkopanzahl kann außerdem durch die Verwendung von Prüfköpfen mit integrierten Zonenplatten, die bei Veränderung der Frequenz eine Verschiebung des Fokusabstandes ermöglichen, erfolgen. Bei den laufzeitfokussierenden Systemen ist dies mittels einer „Gummilins“ (Veränderung der Linsenkrümmung) oder durch die dynamische Fokussierung [8] erreichbar. Allerdings erfordern diese Systeme einen größeren Justier- bzw. einen größeren elektronischen Aufwand. Diese Art der Fokussierung hat jedoch gegenüber Zonenplatten den Vorteil, daß sie mit sehr kurzen Impulsen arbeiten und somit eine gute Tiefenaufklärung ergeben.

Zusammenfassend läßt sich sagen, daß durch den Einsatz von Zonenplatten eine einfache Art der Schallfeldfokussierung erreichbar ist. Sie ermöglichen kurze Brennweiten bei gleichzeitig hohem Fokussierungsgrad und eine Variation der Brennweite durch Veränderung der Frequenz. Dies rechtfertigt ihren Einsatz in der zerstörungsfreien Prüfung.

7. Literaturverzeichnis

- [1] Mundry, E., H. Wüstenberg u. E. Neumann:
Ultraschallprüfung — Stand der Technik und Entwicklungstendenzen.
Vortrag, Chinesische Gesellschaft für zerstörungsfreie Prüfung, Shanghai, 14. 11. 1978
- [2] Schmitz, V.:
Bedeutung der Ultraschall-Holographie als Abbildungsverfahren von Werkstoffehlern.
FhG-Berichte 3-78, S. 5 — 12
- [3] Kutzner, J., u. H. Wüstenberg:
Akustische Linienholographie.
Vortrag zur DGZfP-Jahrestagung 1976, Lahnstein
- [4] Nabel, E., u. E. Mundry:
Die Entfaltung von Ultraschallechos.
DGZfP-Jahrestagung, Bremen, 16. — 18. 5. 1977
- [5] Klein, M., u. R. Werner:
Fehlercharakterisierung mittels Spektroskopie freier Ultraschallwellen.
FhG-Berichte 3-78, S. 49 — 53
- [6] Wüstenberg, H., u. J. Kutzner:
Anzeigenregistrierung und Fehlerrandabtastung mit fokussierenden Prüfköpfen.
Neuere Verfahren zur Analyse von Ultraschall-Befunden.
Vorträge der Fachausschüsse Sonderprüfverfahren und Ultraschallprüfverfahren, 24. 2. 1977, S. 23 — 32, Berlin
Hrsg.: Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e. V. (DGZfP)
- [7] Krautkrämer, J. u. H.:
Werkstoffprüfung mit Ultraschall.
Springer-Verlag, 3. Auflage, 1975, S. 459 — 461
- [8] Wüstenberg, H., E. Schenk u. W. Möhrle:
Vergleich der Leistungen von fokussierenden Prüfköpfen mit Linsen oder elektronisch gesteuerten Ringstrahlern.
Zweite Europäische Tagung für Zerstörungsfreie Prüfung, Wien, 14. — 16. 9. 1981, A-6
- [9] Gebhardt, W., F. Bonitz u. H. Woll:
Das Phased Array als neuer elektronisch steuerbarer Ultraschallwandler in der Werkstoffprüfung.
FhG-Berichte 3-78, S. 60 — 65
- [10] Schlengermann, U.:
Focused Sound Fields and their Application to the Nondestructive Testing of Materials.
Eighth World Conference on Nondestructive Testing, 6. — 11. 9. September 1976, 3J 10
- [11] Wüstenberg, H., J. Kutzner u. W. Möhrle:
Fokussierende Prüfköpfe zur Verbesserung der Fehlergrößenabschätzung bei der Ultraschallprüfung von dickwandigen Reaktorkomponenten.
Materialprüfung 18 (1976) Nr. 5 Mai, S. 152 — 161
- [12] Wüstenberg, H., u. J. Kutzner:
Empfindlichkeitseinstellung beim Einsatz fokussierender Prüfköpfe in der Ultraschallprüfung an ebenen und gekrümmten Bauteilen.
Materialprüfung 19 (1977) Nr. 10 Oktober, S. 441 — 444
- [13] Saglio, R., u. M. Roule:
Focused Ultrasonic Transducers.
Metallurgy and Nuclear Fuel Design Division
Technical Department
Fuel Elements and Structures Section
Advanced Techniques Section
August 1971
- [14] Assenza, D., u. M. Pappalardo:
Imaging array with zone plate and cylindrical focalisation: a comparison.
Ultrasonic Symposium 1979, IEEE PUBL. 79
- [15] Chao, G., B. A. Auld u. D. K. Winslow:
Focusing and scanning of acoustic beams with fresnel zone plates.
Proceedings IEEE Ultrasonic Symposium, Boston, Oct. 1972, Paper G-4, S. 140 — 143
- [16] Farnow, St.:
Acoustic Application of the Zone Plate.
Stanford University, Ph. D., 1976
Physics, acoustics
- [17] Fink, M., u. M. T. Larmande:
„Wideband fresnel focusing array response“.
Ultrasonic Symposium Proc.
New Orleans, USA 1979
- [18] Kuhlowl, B., u. M. Fraatz:
Schallopische Eigenschaften von Ultraschalllinsen.
Zweite Europäische Tagung für Zerstörungsfreie Prüfung, Wien, 14. — 16. 9. 1981
- [19] Maruk, T.:
Analysis of dynamic focusing with rings transducers.
FASE, Warszawa 18-22-09-78
2nd Congress of Federal Acoust. Soc. of Europa (1978)
- [20] Stephanis, C. G., u. G. D. Hampas:
Holographic acoustic lens.
Journal of the acoustical society of America (1978) Nr. 3, S. 860 — 862
- [21] Tarnóczy, Th., u. A. Illényi:
Akustische Zonenlinsen.
Proc. 3rd Int. Congr. on Acoustics
Stuttgart 1959, S. 1233 — 1237

- [22] Wess, O., u. C. Scherg:
An ultrasonic fresnel lens imaging system with high lateral resolutions.
Ultrasonic International 79, Conf. Proc.
- [23] Pohlman, R.:
Über die Möglichkeiten einer akustischen Abbildung in Analogie zur optischen.
Zeitschrift für Physik Bd. 113, S. 697 — 709, 1939
- [24] Römer, M., E. Neumann, E. Mundry u. B. Kuhlow:
Fresnelsche Zonenplatte zur Schallfeldfokussierung.
Materialprüfung 21 (1979) Nr. 10, S. 363 — 365
- [25] Römer, M., R. Schmid, E. Neumann u. E. Mundry:
Anr 1096990 Bundesrepublik Deutschland, vertreten durch den BMWi, dieser vertreten durch den Präsidenten der BAM, Berlin
Herstellung Fresnel'scher Zonenplatten zur Schallfeldfokussierung.
Deutsches Patentamt, München, Akz P 30 40 635.0-53 Ant 29. 10. 1980
- [26] Römer, M., R. Schmidt, E. Neumann u. E. Mundry:
Anr 1096990 Bundesrepublik Deutschland, vertreten durch den BMWi, dieser vertreten durch den Präsidenten der BAM, Berlin
Dynamische Schallfeldfokussierung mit frequenzvariierten Fresnel-Prüfköpfen.
Deutsches Patentamt, München Akz P 30 47 385.9-52 Ant 16. 12. 1980
- [27] Mundry, E., H. Wüstenberg u. M. Römer:
Ultraschallprüfung mit Fokusprüfköpfen.
Vortrag Shanghai, Peking, November 1980
- [28] Römer, M., E. Mundry, R. Schmidt u. E. Neumann:
Dynamische Schallfeldfokussierung mit Zonenplatten-Prüfköpfen — eine einfache Methode zur Fehlergrößenabschätzung.
Zweite Europäische Tagung für Zerstörungsfreie Prüfung, Wien, 14. — 16. 9. 1981, G-14
- [29] Neumann, E. et al:
Ultraschallprüftechnik zur Null- und Wiederholungsprüfung von Schnellbrutreaktoren.
Forschungsbericht des BMFT — RS 244, Teil 2, Dez. 1981, S. 477 — 603
- [30] Fachlexikon, ABC Physik,
Bd. 1, S. 501
Verlag Harri Deutsch, 1974
- [32] Farnow, St. A.:
Acoustic applications of the zone plate.
Diss. 1975, Stanford University, Dept. of Physics, S. 24
- [33] Cremer, L.:
Die wissenschaftlichen Grundlagen der Raumakustik.
Bd. III, S. Hirzel Verlag Leipzig 1950, S. 107
- [34] Bronstein, I. N., u. K. A. Semendjajew:
Taschenbuch der Mathematik.
Verlag Harri Deutsch, 1970
- [35] Kuhlow, B.:
Vorlesung Fourieroptik.
Technische Universität Berlin, FB4, 1977
- [36] Papadakis, E. P., u. K. A. Fawler:
Broad-Band Transducers: Radiation Field and Selected Applications.
The Journal of the Acoustic Society of America 15. 12. 1969
- [37] Marini, J., u. M. Moriamez:
Transmission normale d'une onde de compression pulsée à travers une lame mince à faces parallèles.
Laboratoire Ultrasons, Centre Universitaire de Valenciennes, France
- [38] Mundry, E.:
Vorlesung über zerstörungsfreie Werkstoffprüfung.
FB 17, Technische Universität Berlin, 1983
- [39] Abschlußbericht des Forschungs- und Entwicklungsauftrages
RS 143, Zusammenarbeit von:
Bundesanstalt für Materialprüfung,
Maschinenfabrik Augsburg-Nürnberg,
Interatom, INTAT 77.19, 1977
- [40] Flesch, U., u. G. Schoknecht:
Untersuchungen von Schallköpfen für die Ultraschall-diagnostik.
Acustica, Volume 35, 1976, No. 4
- [41] Obraz, J.:
Über den Einfluß der Form und Orientierung einer Reflexionsfläche auf die Ultraschallanzeige.
Ultrasonographia Medica Bd. 1, 1971, S. 147 — 153
Verlag der Wiener Medizinischen Akademie, Wien
- [42] Cherian, P.:
Beitrag zur Aufklärung des Mechanismus der Ultraschallstreuung in polykristallinen Medien.
Diplom-Arbeit 1980
Technische Universität Berlin
- [43] Wüstenberg, H.:
Berührungslose elektrodynamische Ultraschallwandler und ihre Verwendung in der Ultraschallprüfung.
6. ICNT 1970, Report Nr. B4, Preprints 6. INCT Vol. B 1970
- [44] Crostack, H. A.:
Beitrag zur Verbesserung der Ultraschallprüfung beim Ermitteln von Fehlern in schwer prüfbaren Werkstücken.
Habilitationsschrift, Universität Dortmund, 1978
- [45] Deutsch, V., u. M. Vogt:
Verbesserte Lösung verschiedener Ultraschall-Prüfprobleme durch Wahl eines optimalen Sendespektrums.
I. Europäische Tagung der ZfP, 24. — 26. 4. 1978, Mainz
- [46] Deutsch, K.:
Bedienungsanleitung
Ultraschallprüfgerät, Schmalbandsender 1068
- [47] Wüstenberg, H., u. E. Mundry:
Consideration of the Ultrasonic Testing Method as an Information Transfer System.
The British Journal of Non-Destructive Testing, Vol. 15, No. 2
- [48] Küpfmüller, K.:
Die Systemtheorie der elektrischen Nachrichtentechnik.
S. Hirzel Verlag, Stuttgart, 1949
- [49] Murphy, R. V.:
Toroidal, conical and spherical lenses in ultrasonic inspection.
Materials Evaluation 39, March 1981

Im Anhang zitierte Literatur:

- [1] Sommerfeld, A.:
Vorlesungen über theoretische Physik, Bd. IV, Optik.
Leipzig 1959, Akadem. Verlagsgesellschaft
Geest u. Portig K. G., S. 181/182
- [2] Kuhlow, B.:
Vorlesung Fourieroptik.
Technische Universität Berlin, FB4, 1977, S. 175
- [3] Papoulis, A.:
Systems and Transforms with Applications in Optics.
McGraw-Hill Book Company 1968, S. 329

A 1 Physikalische Grundlagen

A 1.1 Theoretische Beschreibung des Schallfeldes

Für die Schallfeldberechnung wird eine ebene Fläche beliebiger Form und Erregung zugrundegelegt. Die von dieser Fläche ausgehende Erregung soll in einem gewählten Aufpunkt A bestimmt werden (Abb. A 1). Diese sehr allgemeine Aufgabenstellung wird später je nach Anwendungsfall (z. B. Senkrecht- oder Schrägeinschallung) eingeschränkt.

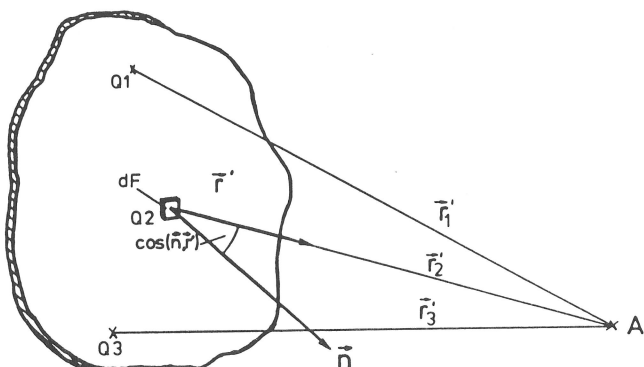


Abb. A 1 Erregung in einem beliebigen Aufpunkt A

Die Beschreibung des Sachverhaltes erfolgt mit der Rayleigh-Sommerfeldschen Beugungsformel [1, 2], die dem Huygensschen Prinzip entspricht. Das besagt: Von jedem Punkt einer erregten Fläche werden Kugelwellen abgestrahlt, die durch Amplitude und Phase der Erregung bestimmt werden.

$$p_A(R) = \frac{1}{i\lambda} \int_F p_Q \frac{e^{ikr'}}{r'} \cos(\vec{n}, \vec{r}') dF \quad (A 1)$$

Darin sind

- $p_A(R)$ Schallerregung im Aufpunkt A
- p_Q Schallerregung in einem Quellpunkt Q
- λ Wellenlänge des Ultraschalls
- k Schallausbreitungsvektor vom Betrag $k = 2\pi/\lambda$
- r' Abstand zwischen Quell- und Aufpunkt
- R Ort des Aufpunktes
- F Quellfläche = Schwingerfläche
- dF Element der Quellfläche
- $\cos(\vec{n}, \vec{r}')$ Richtungscosinus zwischen der Flächennormalen \vec{n} und der betrachteten Richtung \vec{r}' im Feld = Beugungswinkel

Durch die Gl. A 1 wird die Schallerregung von einer ebenen monochromatisch schwingenden Membran in einem beliebigen Aufpunkt A für

$$kr' \gg 1 \quad (A 2)$$

beschrieben [1], d. h. der Abstand zwischen Quellpunkt und Aufpunkt muß bezüglich der Wellenlänge sehr groß sein. Betrachtet man diese Bedingung ab ca. zehn Wellenlängen als erfüllt, so ist eine Beschreibung des Schallfeldes, wenn $\lambda = 3 \text{ mm}$ ist, ab 30 mm sinnvoll. Für die späteren Untersuchungen ist diese Bedingung jedoch keine wesentliche Einschränkung, denn durch die erforderliche schmalbandige Anregung, verbunden mit der Impuls-Echo-Technik, ist eine Fokussierung für sehr kleine Abstände r' nicht sinnvoll.

A 1.2 Fresnelsche Näherung

In Abb. A 2 wird ein kartesisches Koordinatensystem mit den Koordinaten x, y, z so eingeführt, daß die Erregungsfläche mit der x, y -Ebene zusammenfällt und z die Flächennormale ist.

Der Quellpunkt Q hat dann die Koordinaten $x = \xi, y = \eta$ und $z = 0$, da Q in der Beugungsebene liegt. Damit erhält man nach [3] für

$$r'^2 = (x - \xi)^2 + (y - \eta)^2 + z^2 \quad (A 3)$$

$$r' = z \sqrt{\underbrace{\left(\frac{x - \xi}{z}\right)^2 + \left(\frac{y - \eta}{z}\right)^2}_{a} + 1} \quad (A 4)$$

$$r' = z \sqrt{1 + a} \quad (A 5)$$

Zur Vereinfachung des Integrals A 1 sind folgende Näherungen sinnvoll:

1. Eine Reihenentwicklung des Wurzelausdrucks liefert

$$\sqrt{1 + a} \approx 1 + \frac{a}{2} - \frac{a^2}{8} + \dots$$

Diese Reihe konvergiert für $|a| \leq 1$.

Bricht man die Reihe nach dem zweiten Glied ab — der dabei auftretende Fehler wird nach Einführung der Zylinderkoordinaten im Anhang A 1.3 abgeschätzt —, so erhält man für

$$r' \approx z + \frac{1}{2z} [(\xi - x)^2 + (\eta - x)^2] \quad (A 6)$$

Dieser Ausdruck A 6, in Gleichung A 2 eingesetzt, wird als die Fresnelsche Näherung der Rayleigh-Sommerfeldschen Beugungsformel bezeichnet. Sie ist um so genauer, je kleiner a gegenüber 1 ist, d. h. bei gegebenem Abstand zwischen Aufpunkt und Quellpunkt ist die Näherung um so genauer, je kleiner der Abstand des Quellpunktes vom Koordinatenursprung ist bzw. je größer die Entfernung des Aufpunktes von der Quell- bzw. Schwingerfläche ist.

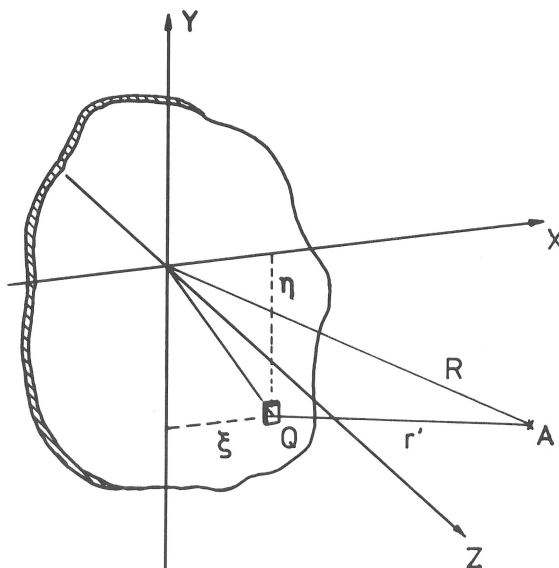


Abb. A 2 Einführung der kartesischen Koordinaten

2. Der Quotient $[\cos(\vec{n}, \vec{r}')]/r'$ wird als konstant angenommen und als

$$(\cos \theta)/r' = \text{const} \quad (\text{A } 7)$$

vor das Integral geschrieben.

Diese Näherung ist möglich, da der Richtungscosinus $\cos(\vec{n}, \vec{r}')$ — er beschreibt die Abnahme der Wirkung von p_Q , wenn die betrachtete Abstrahlrichtung nicht mit der Normalen der abgestrahlten Fläche übereinstimmt — bei Senkrechteinschaltung im Vergleich zum Phasenfaktor $\exp(ikr')$ wenig veränderlich ist ([2], S. 32). Physikalisch bedeutet diese Näherung eine Überbewertung der Schwingerrandzonen, wodurch Nebenmaxima geringfügig überbetont werden.

Unter Berücksichtigung dieser Näherungen erhält man den Ausdruck für den Schalldruck $p(x, y, z)$ im Aufpunkt A in der *Fresnelschen Näherung* der Rayleigh-Sommerfeldschen Beugungsformel in der Form

$$p_A(x, y, z) = \frac{1}{i\lambda z} \cdot \cos \theta \cdot e^{ikz} \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} p_Q(\xi, \eta) \cdot e^{i\frac{k}{2z}[(\xi-x)^2 + (\eta-y)^2]} d\xi d\eta. \quad (\text{A } 8)$$

Multipliziert man den Exponenten von Gl. A 8 aus und werden nur kleine Beugungswinkel θ betrachtet, so kann man nach [3] schreiben

$$p_A(x, y, z) = \frac{1}{i\lambda z} \cdot e^{ikz} \cdot e^{i\frac{k}{2z}(x^2+y^2)} \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} p_Q(\xi, \eta) \cdot e^{i\frac{k}{2z}(\xi^2+\eta^2)} \cdot e^{-i\frac{k}{z}(x\xi+y\eta)} d\xi d\eta. \quad (\text{A } 9)$$

A 1.3 Die Fresnelsche Formel für einen kreisförmigen Schwinger

Ist der Schwinger rotationssymmetrisch, so ist es zweckmäßig, zur weiteren Vereinfachung Zylinderkoordinaten einzuführen (Abb. A 3).

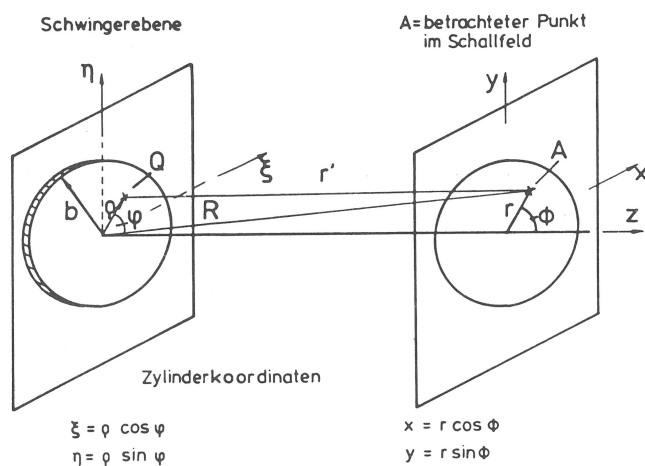


Abb. A 3
Zylinderkoordinaten

Bei Rotationssymmetrie gilt für den Schalldruck auf der Schwingerfläche

$$p_Q(\rho, \varphi) = p_Q(\rho) \quad (\text{A } 10)$$

Damit geht Gl. A 9 über in die Form

$$p_A(r, \Phi, z) = K \int_0^b \int_0^{2\pi} p_Q(\rho) \cdot e^{i\frac{k\rho^2}{2z}} \cdot e^{-i\frac{k}{z}r\rho(\cos\Phi\cos\phi + \sin\Phi\sin\phi)} \rho d\rho d\phi \quad (\text{A } 11)$$

mit

$$K = \frac{1}{i\lambda z} \cdot e^{ikz} \cdot e^{i\frac{k}{2z}(x^2+y^2)} \quad (\text{A } 12)$$

und b = Schwingerradius.

Durch Separation der Variablen von Gl. A 11 wird

$$p_A(r, \Phi, z) = K \int_0^b p_Q(\rho) \cdot \rho \cdot e^{i\frac{k\rho^2}{2z}} \cdot \int_0^{2\pi} e^{i\frac{k}{z}r\rho\cos(\phi-\Phi)} d\phi \cdot d\rho \quad (\text{A } 13)$$

Darin entspricht das zweite Integral der Besselfunktion nullter Ordnung, d. h. das Beugungsbild einer rotationssymmetrischen Objektfunktion ist ebenfalls rotationssymmetrisch, also unabhängig vom Azimutalwinkel Φ der Bildebene,

$$p_A(r, \Phi, z) = p_A(r, z).$$

Gleichung A 13 geht damit über in

$$p_A(r, z) = 2\pi K \int_0^b p_Q(\rho) \cdot \rho \cdot e^{i\frac{k\rho^2}{2z}} \cdot J_0(kr\rho) \cdot d\rho. \quad (\text{A } 14)$$

Mit

$$p_Q(\rho) = p_0 \cdot T(\rho),$$

wobei $T(\rho)$ eine rotationssymmetrische Belegungsfunktion sei, folgt

$$p_A(r, z) = 2\pi p_0 K \int_0^b T(\rho) \cdot \rho \cdot e^{i\frac{k\rho^2}{2z}} \cdot J_0(kr\rho) \cdot d\rho. \quad (\text{A } 15)$$

Diese Beziehung A 15, die Grundlage für die im Kap. 2.1.3 beschriebene numerische Auswertung ist, beschreibt nach [3] das resultierende Schallfeld eines rotationssymmetrischen Schwingers unter Berücksichtigung der in den Gl. A 6 und A 7 zitierten Näherungsannahmen.

Durch Abbrechen der Reihenentwicklung (Gl. A 6) des Abstandes r' in Gl. A 1 entsteht ein Fehler von

$$\Delta r' = r' - \bar{r}' \quad (\text{A } 16)$$

$$\bar{r}' = z(1 + a/2)$$

$$r' = z\sqrt{1 + a^2},$$

der sich als Fehler bei der Schalldruckberechnung auswirkt. Da diese Reihe eine alternierende konvergente Potenzreihe der Form

$$\sum_{n=1}^k (-1)^n \cdot b_n$$

ist, besteht eine einfache Möglichkeit zur Abschätzung des Fehlers in der Ermittlung des Restgliedes R_n , denn es gilt

$$R_n = | \Delta r' | < | b_{n+1} |,$$

d. h. für den vorliegenden Fall von $n = 2$ ist

$$|\Delta r'| < |z a^2/8|$$

Unter Berücksichtigung von Gl. A 4 sowie der Zylinderkoordinaten (Abb. A 3) erhält man

$$\Delta r' < \frac{1}{8 z^3} (r^2 + \rho^2 + 2 r \rho \cos(\phi - \Phi))^2 \quad (A 17)$$

Für den Sonderfall der akustischen Achse gilt $r = 0$, so daß aus Gl. A 17 die Formel

$$\Delta r' < \rho^4/8 z^3 \quad (A 18)$$

entsteht. Bei einem vorgegebenen Fehler von $\Delta r' = \lambda/8$ und $\rho = D_0/2$ kann aus dieser Beziehung der Abstand z in der Form

$$z >^3 \sqrt{l_0^2 \lambda} \quad (A 19)$$

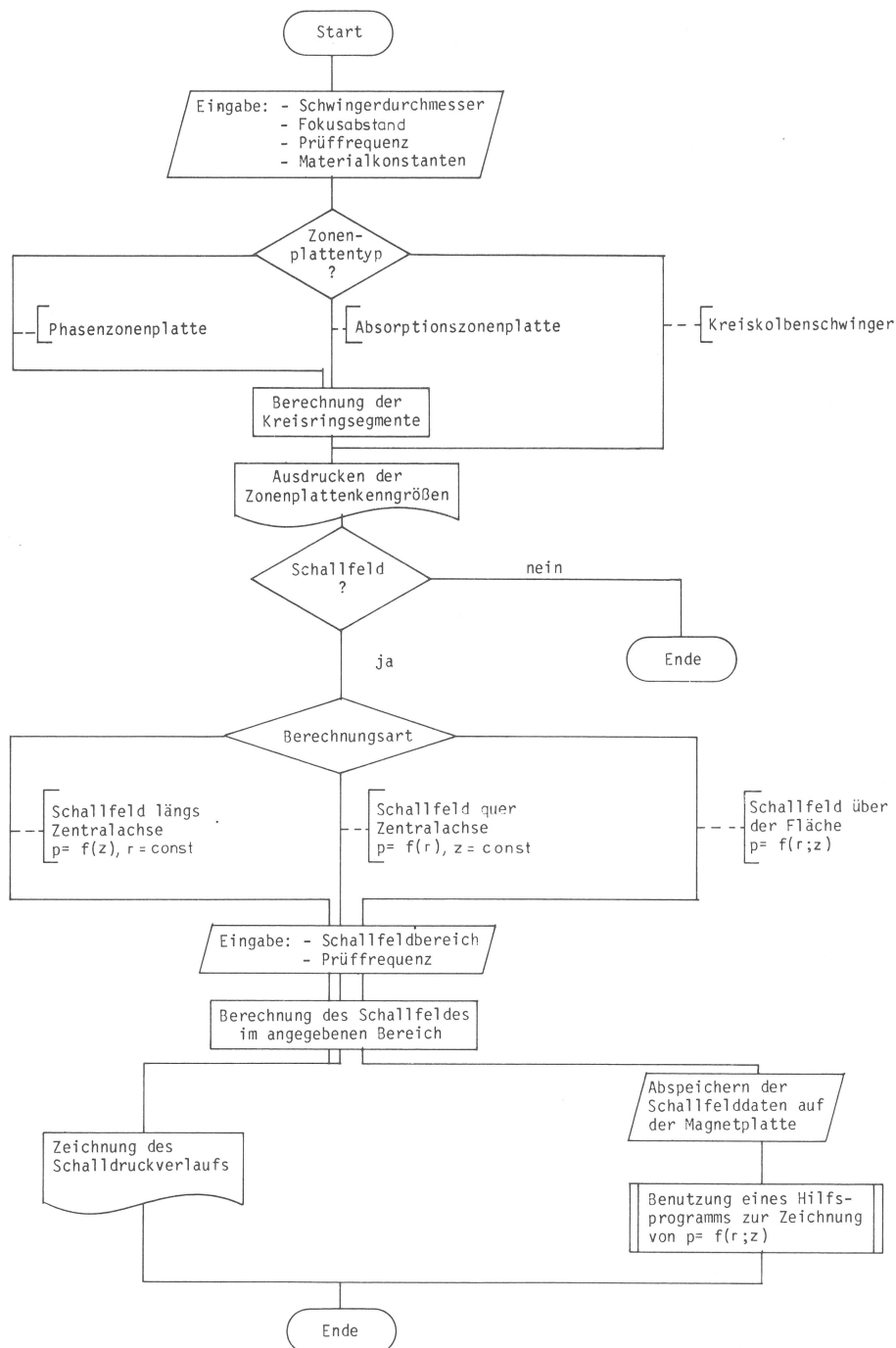
mit $l_0 = D_0^2/4 \lambda \dots$ Nahfeldlänge

ermittelt werden. Der Abstand z ist die Entfernung eines betrachteten Punktes vom Schwinger auf der akustischen Achse, wo der Näherungsfehler den Wert $\lambda/8$ nicht übersteigt.

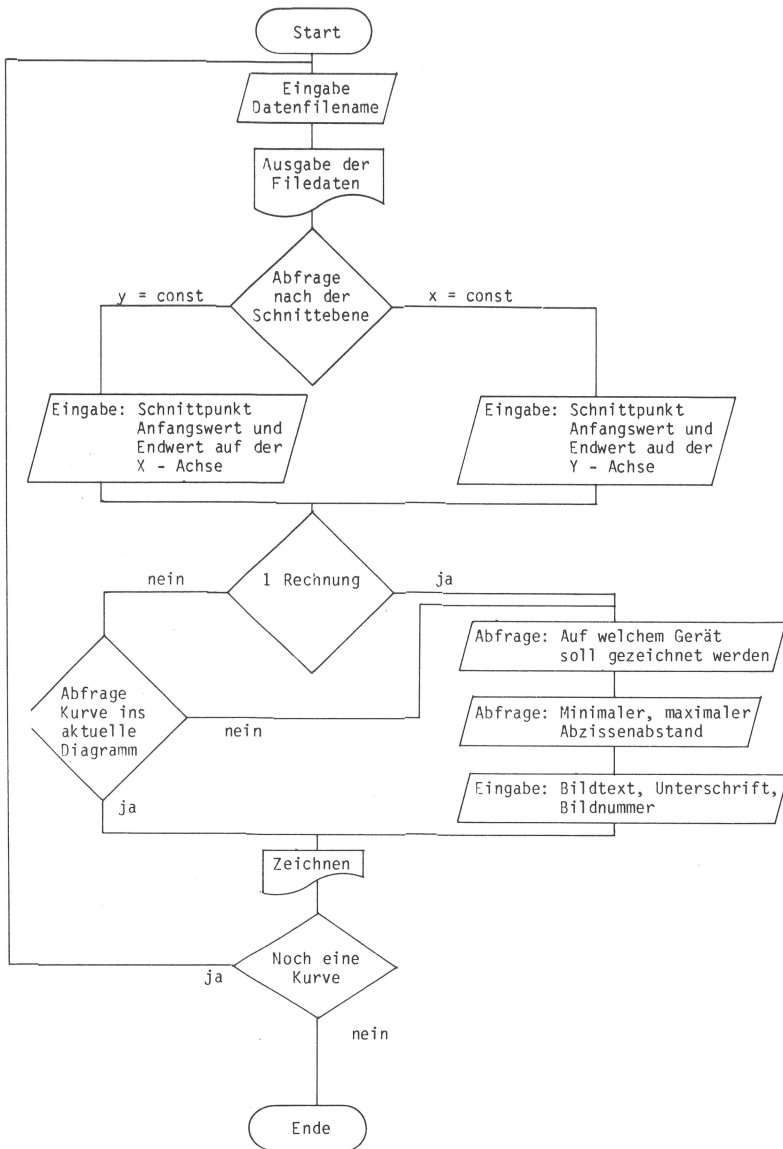
Mit Gl. A 15 wird also das Schallfeld eines rotationssymmetrischen Schwingers berechnet ([3], S. 330), das den tatsächlichen Gegebenheiten unter Berücksichtigung der vorgegebenen Phasenabweichung oberhalb von z näherungsweise entspricht.

A 2 Programmübersichten

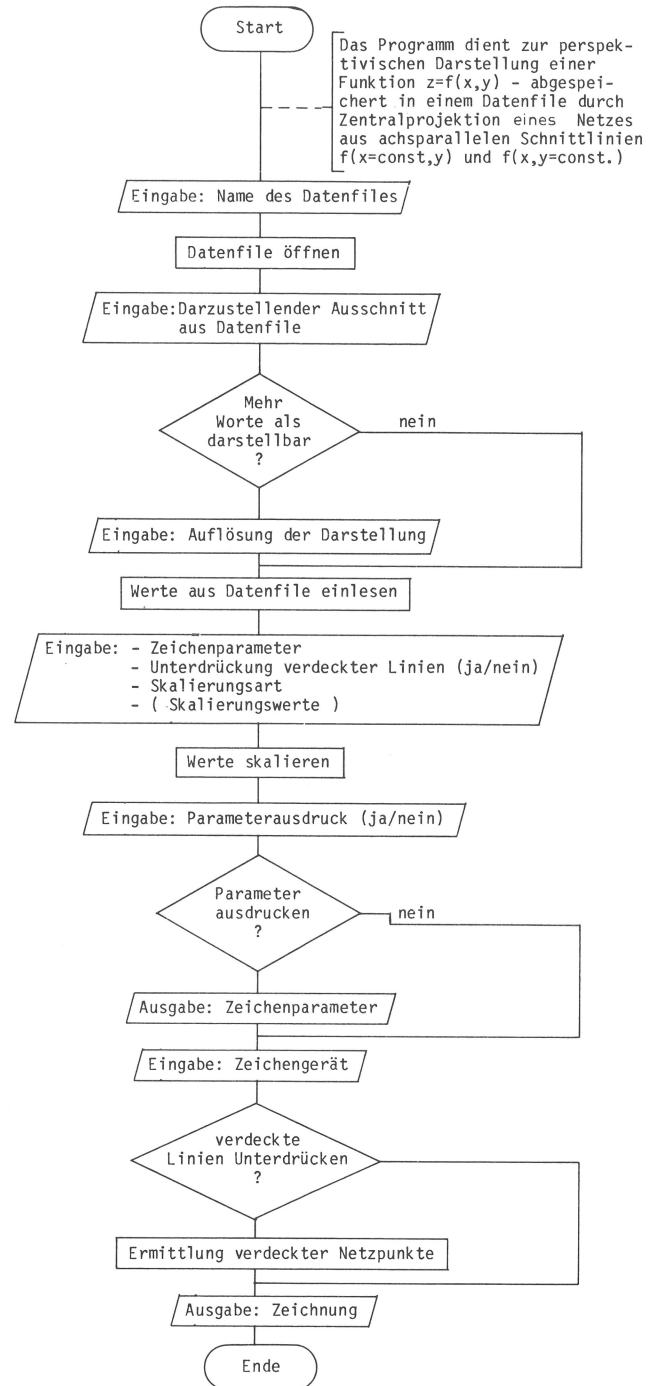
A 2.1 Programm „FRELI“



A 2.2 Programm „EBENE“



A 2.3 Programm „RAUM“



Bisher erschienene Forschungsberichte der BAM

- Nr. 1/September 1968
Forschung und Entwicklung in der Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM)
Rechenchaftsbericht für den Bundesminister für Bildung und Wissenschaft
- Nr. 2/Juli 1970 (vergriffen)
Zum Problem des Feuchtigkeitschutzes von Dehnungsmeßstreifen und Halbleitergebern
von Dr.-Ing. Götz Andreae
- Nr. 3/September 1970 (vergriffen)
Über das mechanische Verhalten von Aluminium-Stahl-Freileitungsseilen als Beispiel für Verbundbauteile
von Dr.-Ing. Josef Ziebs
- Nr. 4/Dezember 1970 (vergriffen)
Formbeständigkeit von Holz gegenüber Feuchtigkeit — Grundlagen und Vergütungsverfahren
von Dr. rer. nat. Arno Burmester
- Nr. 5/März 1971
Die Bedeutung der Netzstellenart und der Netzwerkkettendichte für die Beschreibung der elastischen Eigenschaften und des Abbaus von elastomeren Netzwerken
von Dr. rer. nat. Norbert Steiner
- Nr. 6/April 1971
Zur Problematik der Prüfung und Beurteilung des Luftschallschutzes von Bauelementen bei unterschiedlichen Einbaubedingungen
von Prof. Dr.-Ing. Paul Schneider
- Nr. 7/Juli 1971
Chromatographie und chemische Konstitution — Untersuchungen über den Einfluß der Struktur organischer Verbindungen auf das Verhalten bei der Dünnschicht-Chromatographie
von Dr.-Ing. Hans-Joachim Petrowitz
- Nr. 8/November 1971
Zum Spannungs-Dehnungs-Verhalten von Baustählen bei Wechselbeanspruchung
von Dr.-Ing. Helmut Veith
- Nr. 9/November 1971
Untersuchung über die sichernde Wirkung poröser Massen in Acetylenflaschen
von Dr.-Ing. Karl-Heinz Möller
- Nr. 10/Januar 1972
Untersuchungen über die Korngrößenbestimmung mit Ultraschall zur Entwicklung einer für die Praxis geeigneten zerstörungsfreien Meßmethode
von Dr.-Ing. Dietmar Aurich und Prof. Dr. phil. Erich Martin
- Nr. 11/Februar 1972
Beitrag zur Kenntnis der Schnittriefenbildung und Schnittgütwerte beim Brennschneiden
von Dr.-Ing. Hans-Joachim Krause
- Nr. 12/Mai 1972
Über Veränderungen von Nylon-6-Fasern beim Texturieren
von Dir. u. Prof. Dr. rer. nat. Hubert Feuerberg
- Nr. 13/Juni 1972
Festkörpergleitreibung und Verschleiß von Eisen, Kobalt, Kupfer, Silber, Magnesium und Aluminium in einem Sauerstoff-Stickstoff-Gemisch zwischen 760 und $2 \cdot 10^{-7}$ Torr
von Dr.-Ing. Karl-Heinz Habig (Berichter), Prof. Dr.-Ing. Kurt Kirschke, Dr.-Ing. Wolfgang-Werner Maennig und Dipl.-Phys. Harald Tischer
- Nr. 14/Juli 1972
Untersuchungen zur Amplitudenabhängigkeit der Ultraschalldämpfung in Metallen bei 20 kHz
von Eberhard Fischer
- Nr. 15/August 1972
Studie und Probleme der chemischen Edelmetall-Analyse
von Dir. u. Prof. Dr.-Ing. Heinz Pohl
- Nr. 16/August 1972
Über Ausführung und Aussagefähigkeit des Normbrandversuches nach DIN 4102, Blatt 2, im Hinblick auf die Nachbildung natürlicher Schadensfeuer
von Dr.-Ing. Erwin Knublauch
- Nr. 17/August 1972
Aktivierungsanalyse mit schnellen Neutronen, Photonen und geladenen Teilchen
von Dr.-Ing. Peter Reimers
- Nr. 18/Januar 1973
Das Spröbruchverhalten des Baustahles R St 37-2 N in geschweißten Konstruktionen, dargestellt mit Hilfe der Methode des Temperaturvergleiches
von Dr.-Ing. Werner Struck
- Nr. 19/Januar 1973
Die Bestimmung von Grenzflächentemperaturen bei tribologischen Vorgängen
Literaturrecherche von Dipl.-Phys. K. Kaffanke und Dr.-Ing. H. Czichos
- Nr. 20/April 1973
Brandrisiko elektrischer Leitungen und Installationen in Wänden
von Dipl.-Ing. R. Rudolphi
- Nr. 21/Juli 1973
Die kontinuumsmechanische Erfassung des zeitlichen Ablaufs der elastisch-plastischen Dehnungen bei der Zerrüttung
Literaturrecherche von Dipl.-Phys. D. Klaffke und Dr.-Ing. W. Maennig
- Nr. 22/Juli 1973
Untersuchungen für ein Prüfverfahren zur Bemessung der Brandschutzbekleidung von Stahlstützen
von Dipl.-Ing. R. Rudolphi und Dr.-Ing. E. Knublauch
- Nr. 23/November 1973
Reichs- und preußische Landesanstalten in Berlin Ihre Entstehung und Entwicklung als außeruniversitäre Forschungsanstalten und Beratungsorgane der politischen Instanzen
von Prof. Dr. rer. nat. habil. Walter Ruske
- Nr. 24/November 1973
Das Brandverhalten von Holzstützen unter Druckbeanspruchung
von Dipl.-Ing. J. Stanke, Ing. grad. E. Klement und Dipl.-Ing. R. Rudolphi
- Nr. 25/Dezember 1973
Über das Brandgeschehen vor der Fassade eines brennenden Gebäudes unter besonderer Berücksichtigung der Feuerbeanspruchung von Außenstützen
von Dr.-Ing. E. Knublauch
- Nr. 26/August 1974
Der Elektronen-Linearbeschleuniger der BAM — Eigenschaften und erste Anwendungen —
von Dipl.-Ing. P. Jost, Dr.-Ing. P. Reimers und Dr.-Ing. P. Weise
- Nr. 27/August 1974
Untersuchungen zum Schallfeld von Winkelprüfköpfen für die Materialprüfung mit Ultraschall
von Dr.-Ing. Hermann Wüstenberg
- Nr. 28/August 1974
Zum Ablauf von Gasexplosionen in mit Rohrleitungen verbundenen Behältern
von Prof. Dr. rer. nat. Hans-Jürgen Heinrich
- Nr. 29/August 1974
Theorie der dissipativen Luftschalldämmung bei einem idealisotropen porösen Material mit starrem Skelett für senkrechten, schrägen und allseitigen Schalleinfall
von Prof. Dr.-Ing. P. Schneider
- Nr. 30/September 1974 (vergriffen)
The Application of Systems Thinking and Systems Analysis to Tribology
von Dr. Horst Czichos und Dr. Geert Salomon
- Nr. 31/August 1975
Untersuchungen zur Klärung des Verhaltens thermoplastischer Kunststoffe bei Wechseldehnungsbeanspruchung
von Dr.-Ing. Gerhard Fuhrmann
- Nr. 32/September 1975
Ein thermo-elektrisches Netzwerkverfahren zur Berechnung stationärer Temperatur- und Wärmestromverteilungen mit Anwendungsbeispielen
von Dipl.-Ing. Reinald Rudolphi und Dr.-Ing. Bernhard Böttcher
- Nr. 33/November 1975
Die Bestimmung der Temperaturleitfähigkeit von Baustoffen mit Hilfe eines nichtstationären Meßverfahrens
von Dipl.-Ing. Armin Wagner, Dipl.-Phys. Gerhard Kieper und Dipl.-Ing. Reinald Rudolphi
- Nr. 34/Januar 1976 (vergriffen)
Untersuchungen zur Vergütung von Holzwerkstoffen
von Dipl.-Forsting. Dr. rer. sylv. Hans-Joachim Deppe
- Nr. 35/Januar 1976
Der Widerstand von Platten, die als Beplankungsmaterial leichter Wände verwendet werden, gegenüber dem Aufprall harter Körper — Vorschlag für ein Prüfverfahren —
von Dipl.-Ing. Ernst Limberger

- Nr. 36/Januar 1976 (vergriffen)
Wärme- und Feuchtigkeitsleitung in Beton unter Einwirkung eines Temperaturgefälles
von Dipl.-Ing. Jürgen Hundt
- Nr. 37/Februar 1976
Die stoßartige Beanspruchung leichter, nichttragender Bauteile durch einen mit der Schulter gegenprallenden Menschen — Vorschlag für ein Prüfverfahren —
von Dr.-Ing. Werner Struck
- Nr. 38/Juni 1976
Verschleißuntersuchungen an gas-, bad- und ionitriertem Stahl 42 CrMo 4
von Dr.-Ing. Karl-Heinz Habig
- Nr. 39/Juni 1976
Untersuchung der viskoelastischen Eigenschaften von Flüssigkeiten (mit nicht-Newton'schem Fließverhalten) insbesondere bei höherer Scherbeanspruchung
von Prof. Dr.-Ing. K. Kirschke und Dipl.-Phys. G. Kempf
- Nr. 40/Juni 1976
Zum Untergrundabzug bei energiedispersiven Spektren nach verschiedenen Verfahren
von Dr. rer. nat. H. Hantsche
- Nr. 41/Okttober 1976
Optische Eigenschaften cholesterinischer Flüssigkeiten
von Dr. rer. nat. Bernhard Böttcher
- Nr. 42/Okttober 1976
Ermittlung der Mindestzündenergie brennbarer Gase in Mischung mit Luft
von Dr.-Ing. Siegmund Dietlen
- Nr. 43/Okttober 1976
Das Spröbruchverhalten geschweißter Bauteile aus Stahl mit zäh-sprödem Übergang im Bruchverhalten, dargestellt mit Hilfe der Methode des Temperaturvergleiches
von Dr.-Ing. Werner Struck
- Nr. 44/November 1976
Berechnung von räumlichen, linear elastischen Systemen, die aus finiten Stab- und Balkenelementen zusammengesetzt sind, unter Verwendung des Programms „Stab-Werk“
von Dipl.-Ing. W. Matthees
- Nr. 45/Dezember 1976
Untersuchung des Elektrodenverhaltens im Vakuum aufgedampfter Metallschichten
von Dr.-Ing. W. Paatsch
- Nr. 46/Mai 1977 (vergriffen)
Versuchsergebnisse zur Festigkeit und Verformung von Beton bei mehraxialer Druckbeanspruchung
Results of Test Concerning Strength and Strain of Concrete Subjected to Multiaxial Compressive Stresses
von Dipl.-Ing. Gerald Schickert und Dipl.-Ing. Helmut Winkler
- Nr. 47/Juni 1977
Bautechnische Einflüsse auf die Tragfähigkeit von Kunststoffdübeln für Fassadenbekleidungen
von Dr.-Ing. Arno Plank
- Nr. 48/Okttober 1977
Setzung von Fundamenten infolge dynamischer Last, angewendet auf die Fundamente einer geplanten Schnellbahn
von Dr.-Ing. U. Holzlöhner
- Nr. 49/Dezember 1977
Untersuchungen zur Anwendung von Mikrowellen in der zerstörungsfreien Prüfung
von Dr.-Ing. Günther Wittig
- Nr. 50/Juni 1978 (vergriffen)
Zur Meßtechnik für die Sicherheitsbeurteilung und -überwachung von Spannbeton-Reaktordruckbehältern
von Prof. Dipl.-Phys. Norbert Czaika, Dipl.-Phys. Norbert Mayer, Dipl.-Ing. Claus Amberg, Dipl.-Ing. Götz Magiera, Dr.-Ing. Götz Andreae und Dipl.-Ing. Winfried Markowski
- Nr. 51/Juni 1978
Auswirkung von chemischen und physikalisch-technologischen Einflußfaktoren auf das Beständigkeitsverhalten von Oberflächenbeschichtungen auf der Basis von Reaktionsbeschichtungsstoffen
von Dr. rer. nat. J. Sickfeld
- Nr. 52/August 1978
Zum Einfluß der Gleitgeschwindigkeit auf das tribologische Verhalten von Werkstoffen hoher Härte bei reiner Festkörperreibung
von Dr.-Ing. Aleksandar Tomov
- Nr. 53/Okttober 1978
Bemessung und Optimierung beheizbarer Straßen- und Brückenbeläge
von Rolf Günter Rohrmann und Reinald Rudolphi
- Nr. 54/Okttober 1978
Magnetisches Verhalten dünner Eisenschichten bei mechanischer Wechselbeanspruchung
von Dr.-Ing. Harro Sander
- Nr. 55/November 1978
Beobachtung und Orientierungsbestimmung der Oberflächenkristallite polykristalliner 99,999 %-Al-Proben bei Biegewechselbeanspruchung
von Dr.-Ing. Dieter Klaffke
- Nr. 56/Januar 1979
Stabilität von Sandwichbauteilen
von Dipl.-Ing. W. Brünner und Prof. Dr.-Ing. C. Langlie
- Nr. 57/März 1979
Untersuchungen an Prüfmitteln für die Magnetpulverprüfung
Investigations on Inspection-Media for Magnetic-Particle-Testing
von Dipl.-Ing. Meinhard Stadthaus
- Nr. 58/März 1979
Ermittlung des Bauteilwiderstandes aus Versuchsergebnissen bei vereinbartem Sicherheitsniveau
von Dr.-Ing. Werner Struck
- Nr. 59/Juli 1979
Ermittlung der Verformungen biegebeanspruchter Stahlbetonbalken mit der Methode der Finiten Elemente unter besonderer Berücksichtigung des Verbundes zwischen Beton und Stahl
von Dr.-Ing. Günther Plauk
- Nr. 60/August 1979
Untersuchungen zur Erfassung der Kaltformbarkeit von Feinblechen beim Strecken
von Dr.-Ing. H. Spreckelmeyer, Dr.-Ing. R. Helms und Dr.-Ing. J. Ziebs
- Nr. 61/Dezember 1979
Beschreibung von Problemen der höheren Farbmetrik mit Hilfe des Gegenfarbensystems
von Dr. Klaus Richter
- Nr. 62/Dezember 1979
Geomagnetobiologisch bedingter Zusammenhang zwischen der Fraßaktivität von Termiten und der Zahl der Sterbefälle
von Dir. u. Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Gerisch und Prof. Dr. habil. Dr. h. c. Günther Becker
- Nr. 63/Dezember 1979
Untersuchungen an Stopfbuchsen von Ventilen und Schiebern für Gase
von Dipl.-Ing. E. Behrend und Dipl.-Ing. J. Ludwig
- Nr. 64/Februar 1980
Ermittlung der Schwingungserregung beim Betrieb schienengebundener Fahrzeuge in Tunneln sowie Untersuchung des Einflusses einzelner Parameter auf die Ausbreitung von Erschütterungen im Tunnel und dessen Umgebung
von Dr.-Ing. Werner Rücker
- Nr. 65/Februar 1980
Untersuchungen über den Einfluß des Spannungszustandes auf bruchmechanische Kennwerte
von Dr.-Ing. Peter Schmidt, Dr.-Ing. Dietmar Aurich, Dr.-Ing. Rolf Helms, Dr.-Ing. Helmut Veith und Dr.-Ing. Josef Ziebs
- Nr. 66/Mai 1980
Auswirkung von Druckentlastungsvorgängen auf die Umgebung
von Dr. rer. nat. Martin Hattwig
- Nr. 67/Mai 1980
Beitrag zur dynamischen Analyse von vorgespannten und vorbelasteten Feder-Masse-Systemen mit veränderlicher Gliederung unter stoßartiger Beanspruchung
von Dr.-Ing. Wolfgang Matthees
- Nr. 68/Mai 1980
Oberflächenmeßverfahren unter besonderer Berücksichtigung der Stereomeßtechnik.
Entwicklung eines volleuzentrischen Präzisions-Goniometers
von Dr. rer. nat. Dieter Petersohn
- Nr. 69/Juni 1980
Untersuchungen zur Integrität des Liners von Reaktorsicherheitshüllen (Containments) in Stahlbeton- und Spannbetonbauweise
von Dr.-Ing. Frank Buchhardt und Dipl.-Ing. Peter Brandl
- Nr. 70/August 1980 (vergriffen)
Schwellenwerte beim Betondruckversuch
von Dr.-Ing. Gerald Schickert
- Nr. 71/August 1980
Untersuchungen über durch den Boden gekoppelte dynamische Wechselwirkungen benachbarter Kernkraftwerksbauten großer Masse unter seismischen Einwirkungen
von Dr.-Ing. Wolfgang Matthees und Dipl.-Ing. Götz Magiera

- Nr. 72/September 1980
Übertragbarkeit der Ergebnisse von Brandprüfungen am Beispiel von Stahl- und Holzstützen
von Dr.-Ing. Reinald Rudolphi
- Nr. 73/November 1980
Vergleichende Untersuchungen zum Tragverhalten von Klemmkupplungen für Stahlrohrgerüste nach bestehenden deutschen Prüfvorschriften und geplanten europäischen bzw. internationalen Prüfnormen
von Dipl.-Ing. Peter Wegener
- Nr. 74/November 1980
ALGOL-Computerprogramm zur Berechnung zweidimensionaler instationärer Temperaturverteilungen mit Anwendungen aus dem Brand- und Wärmeschutz
von Dr.-Ing. Reinald Rudolphi und Dipl.-Inform. Renate Müller
- Nr. 75/November 1980
Beitrag zur Kenntnis des zeitlichen und örtlichen Druckverlaufs bei der plötzlichen Entlastung unter Druck stehender Behälter und Behälterkombinationen
von Dir. u. Prof. Dr. Hans-Jürgen Heinrich
- Nr. 76/November 1980
Deformationsverhalten von Rein- und Reinstaluminium sowie Cu 99,9 und St 37 bei Biegewechselbeanspruchung im Rasterelektronenmikroskop
von Dr.-Ing. Dieter Klaffke und Prof. Dr.-Ing. Wolfgang-Werner Maennig
- Nr. 77/April 1981
Untersuchung des Verhaltens von Lagerzementen
von Dipl.-Ing. Michael Gierloff und Dr.-Ing. Matthias Maultzsch
- Nr. 78/September 1981
Dynamische Wechselwirkung eines Schienen-Schwellensystems mit dem Untergrund
von Dr.-Ing. Werner Rücker
- Nr. 79/Dezember 1981
Ein Beitrag zur Untersuchung der wasserstoffbeeinflussten Kaltrißneigung höherfester niedriglegierter Feinkornbaustähle mit dem Implantversuch
von Dr.-Ing. Volker Neumann
- Nr. 80/Dezember 1981
Ursachen des Teileinsturzes der Kongreßhalle in Berlin-Tiergarten
von Dr.-Ing. Arno Plank, Dr.-Ing. Werner Struck und Dr.-Ing. Manfred Tzschätzsch
- Nr. 81/Dezember 1981
Graphisch-rechnerisches Verfahren zum Erfassen der Zündhäufigkeit zündbarer Stoffe; Anwendung auf Datenmaterial aus dem Bereich der Statistik
von Dipl.-Ing. Jürgen Schmidt
- Nr. 82/April 1982
Zur werkstoffmechanischen Beurteilung des Kerbschlagbiegeversuches
Assessment of the mechanical behaviour of materials in the notched bar impact test
von Rolf Helms, Hans-Joachim Kühn und Siegmund Ledworuski
- Nr. 83/Juli 1982
Tribologisches Verhalten von thermoplastischen Kunststoffen — Kontaktdeformation, Reibung und Verschleiß, Oberflächenuntersuchungen —
von Prof. Dr.-Ing. Horst Czichos und Dr.-Ing. Paul Feinle
- Nr. 84/Juli 1982
Übertragbarkeit der Ergebnisse von Brandprüfungen im Kleinprüfstand (Vergleichsversuche)
von Dipl.-Inform. Renate Müller und Dr.-Ing. Reinald Rudolphi
- Nr. 85/ISBN 3-88314-231-X/Okttober 1982
Technische Materialforschung und -prüfung — Entwicklungstendenzen und Rahmenvorschläge für ein EG-Programm „Basic Technological Research“ —
Materials Research and Testing — Development Trends and Outline Proposals for a Community Programme „Basic Technological Research“ —
von Prof. Dr. Horst Czichos
- Nr. 86/ISBN 3-88314-232-8/November 1982
Zur quantitativen Kennzeichnung des Verwitterungsverhaltens von Naturwerksteinen anhand ihrer Gefügemerkmale
von Dr.-Ing. Konrad Niesel und Dr. rer. nat. Peter Schimmelwitz
- Nr. 87/ISBN 3-88314-240-9/Dezember 1982
Einfluß baupraktischer Umgebungsbedingungen auf das Korrosionsverhalten von Spannstählen vor dem Injizieren
von Dr.-Ing. Bernd Isecke und Dr.-Ing. Wolfgang Stichel
- Nr. 88/ISBN 3-88314-254-9/Februar 1983
Untersuchungen zur Ausbreitung von Longitudinalwellen an Oberflächen bei der Materialprüfung mit Ultraschall
von Dr.-Ing. Anton Erhard
- Nr. 89/ISBN 3-88314-263-8/April 1983
Untersuchungen zur Zerfallsfähigkeit von Distickstoffoxid
von Dr. rer. nat. Dietrich Conrad und Dr.-Ing. Siegmund Dietlen
- Nr. 90/ISBN 3-88314-264-6/April 1983
Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen
Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members
von Dr.-Ing. Klaus Brandes, Dipl.-Ing. Ernst Limberger und Dipl.-Ing. Jürgen Herter
- Nr. 91/ISBN 3-88314-265-4/April 1983
Dreidimensionale Analyse von unbewehrtem Beton mit nichtlinear-elastischem Materialgesetz
von Dr.-Ing. Michael Weber
- Nr. 92/ISBN 3-88314-266-2/August 1983
Ausbreitung von Erschütterungen durch den Boden
von Dipl.-Ing. Lutz Auersch
- Nr. 93/ISBN 3-88314-283-2/August 1983
Unterdrückung stick-slip-induzierter Kurvengeräusche schienengebundener Fahrzeuge durch eine physikalisch-chemische Oberflächenbehandlung der Schienen
von Dr. rer. nat. Peter Studt
- Nr. 94/ISBN 3-88314-284-0/August 1983
Untersuchungen der Störschwingungen beim Kerbschlagbiegeversuch und deren Abschwächungen
von Dr.-Ing. Xian-Quan Dong
- Nr. 95/ISBN 3-88314-289-1/August 1983
Über die Fokussierung des Schallfeldes von Ultraschall-Prüfköpfen mit Fresnelschen Zonenplatten
von Dr.-Ing. Manfred Römer

