

Empfindlichkeitseinstellung und Echohöhenbewertung von Prüfköpfen mit schmalen rechteckigen Schwingern

Diplomarbeit

Durchgeführt an der Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung
zu Berlin, Fachgruppe für Zerstörungsfreie Prüfung, Akustische und
Elektrische Verfahren

Vorgelegt von Jens Vierke

Matrikel-Nr.: 188781

Betreuer

Prof. Dr.-Ing. Hermann Wüstenberg (BAM)

Prof. Dr. rer. nat. Walter Reimers (TU-Berlin)

28. September 2004

Die selbstständige und eigenständige Anfertigung versichere ich an Eides statt.

Berlin, den 28. September 2004

Danksagung

Die vorliegende Diplomarbeit entstand im Rahmen meines Studiums der Werkstoffwissenschaften an der Technischen Universität Berlin. Bei der Durchführung und Auswertung der Untersuchungen standen mir eine Vielzahl von Personen zur Seite, denen ich meinen Dank aussprechen möchte:

Herrn Prof. Dr.-Ing. Hermann Wüstenberg für die Betreuung, den Diskussionen und der hilfreichen Unterstützung,

Herrn Prof. Dr. rer. nat. Walter Reimers für die Betreuung an der Technischen Universität Berlin,

Herrn Prof. Dr.-Ing. Anton Erhard für die Bereitstellung von Labor, Materialien und Personal innerhalb der Fachgruppe VIII.4 der BAM,

Herrn Dipl. Physiker Rainer Boehm für die wertvollen Anregungen und Hinweise,

Herrn Ing.-grad. Heinz Mrasek für die Hilfe beim Prüfkopfbau, den Herrn Patrick Naese, Marcel Guichard und Reinhard Heller-Kowallis für ihren Einsatz in der Werkstatt, den Frauen Renate Gierke, Constance Horstmann, Dipl.-Ing. Ute Tessaro sowie den Herrn Dr.-Ing. Dirk Tschantke, Dipl.-Ing. Uwe Völz, Dipl.-Ing. Hans-Joachim Montag, Dipl.-Ing. Thomas Heckel, Dipl.-Ing. Dirk Gohlke, Dipl.-Ing. Elmar Dose, Dr.-Ing. Gerhard Brekow und Dipl.-Ing. Gottfried Schenk für die gelegentliche Hilfe in fachlichen und organisatorischen Fragen,

der Firma IntelligeNDT Systems & Services in Erlangen für ihre finanzielle und technische Unterstützung, insbesondere den Herrn Dr. rer. nat. Eberhard Fischer, Dipl.-Ing. Rainer Meier und Dipl.-Ing. Thomas Rehfeld,

den Frauen Julie Colthorpe (B.A.), Dipl.-Ing. Perrine Debaene und Herrn Dipl.-Inf. Bernd Büttner für ihre Hilfe bei Korrektur und Layout, sowie allen anderen Personen, welche auf die eine oder andere Art und Weise ihren Anteil an der Realisierung dieser Arbeit hatten.

Abschließend möchte ich meinen Eltern Imtraut und Horst Vierke, meiner Großcousine Marga Fischer, der Familie meines Bruders Christina und Dipl.-Ing. Lutz Vierke und Dr.-Ing. Jürgen Meersmann für ihre Unterstützung in den Jahren meines Studiums danken.

Inhaltsverzeichnis

1	Kurzfassung	6
2	Aufgabenstellung und Motivation	7
3	Akustische Grundlagen	9
3.1	Elementare Beschreibung von Ultraschallfeldern	9
3.2	Schallfeld eines kreisförmigen Kolbenschwingers	10
3.3	Schallfeld eines rechteckigen Kolbenschwingers	19
4	Experimentelle Grundlagen	24
4.1	Entstehung eines Echosignals und Echoamplitudenbewertung nach AVG	24
4.2	Gruppenstrahlertechnik	30
4.3	Modellierung mit dem Fast-Semi-Analytical-Model (FASM)	32
5	Durchführung der Untersuchungen	35
5.1	Lösungsmethoden	35
5.2	Vorbereitungen	35
5.3	Charakterisierung der Prüfköpfe	38
5.4	Automatisierte Ultraschallmessung an Flachbodenbohrungen und der Rückwand	44
5.5	Manuelle Ultraschallmessung an querstehenden Zylinderbohrungen	48
5.6	Automatisierte Ultraschallmessung an Reflektoren in Wasser	50
5.7	Computermodellierung	53

6	Ergebnisse und Diskussion.....	54
6.1	Charakterisierung der Prüfköpfe.....	54
6.1.1	Linear-Arrays: Richtcharakteristiken der einzeln angeregten Elemente.....	54
6.1.2	Linear-Arrays: Richtcharakteristiken bei zeitgleicher Anregung der Elemente.	58
6.1.3	Winkel-Prüfköpfe und Linear-Array mit Plexiglaskeil.....	60
6.1.4	Schallfelder an Reflektoren in Wasser	65
6.2	Ultraschallmessung: Echoamplitudenbewertung.....	69
6.2.1	Echoamplitudenbewertung von Kreisscheibenreflektoren.....	69
6.2.2	Echoamplitudenbewertung von Kreisscheiben- und Referenzreflektoren.....	75
7	Schlussfolgerungen und Ausblick.....	82
7.1	Konsequenzen aus der Charakterisierung der Prüfköpfe.....	82
7.2	Konsequenzen aus der Echoamplitudenbewertung von Kreisscheibenreflektoren.	82
7.3	Konsequenzen aus der Echoamplitudenbewertung von Referenzreflektoren.....	83
8	Quellenverzeichnis.....	85
9	Formelzeichen	88
10	Anhang	92

1 Kurzfassung

In der Ultraschallprüfung ist nach DIN-EN 583-2 die AVG-Methode ein bewährtes Verfahren zur reproduzierbaren Echohöhenbewertung von Reflektoren. In der Fachliteratur finden sich wissenschaftliche Arbeiten, welche die Anwendung dieser Methode bei Winkelprüfköpfen mit rechteckförmigen Schwingern bis zu einem Seitenverhältnis von $a/b \geq 0,5$ absichern. In dieser Diplomarbeit wird gezeigt, dass auch mit sehr schmalen rechteckigen Schwingern, deren Seitenverhältnisse $a/b < 0,5$ sind, die Echohöhenbewertung nach AVG vorgenommen werden kann. Die dabei zu beachtenden Bedingungen sind durch Messungen und Berechnungen auf der Basis eines halbanalytischen Modells herausgearbeitet worden.

Abstract

In ultrasonic testing, the DGS-method, standardized in EN 583-2, is a common procedure for reproducible evaluation of defect echo amplitudes normally referring to rectangular side ratios of $a/b > 0.5$, in respect to rectangular transducers for angle beam probes. This work provides measurements and computations based on a semi analytical model, which shows under which conditions and limits the DGS-method is still applicable for transducers with a rectangle side ratio of $a/b < 0.5$.

Résumé

En contrôle ultrasonore, les diagrammes AVG sont fréquemment utilisées pour la mesure reproductible de l'amplitude de l'écho d'un réflecteur. Les règles de la utilisation du système AVG sont spécifiées par la norme européenne EN 583-2. Cette norme permet d'utiliser, entre autres, des palpeurs à angle équipés avec des membrane rectangulaire.

On trouve, dans la littérature scientifique, des travaux relatant l'utilisation d'une membrane rectangulaire avec un rapport largeur/longueur jusqu'à $a/b \geq 0,5$. Le sujet de ce rapport, s'est focalisé sur l'emploi de membranes rectangulaires avec un rapport largeur/longueur $a/b < 0,5$. Des mesures ainsi que des calculs numériques basés sur un modèle semi-analytique sont présentés, qui montrent dans quelles conditions on peut élargir l'utilisation du diagramme AVG au-delà du rapport $a/b < 0,5$, et quelles en sont les limites.

2 Aufgabenstellung und Motivation

Die Verwendung von schmalen rechteckförmigen Ultraschallschwingern mit Seitenverhältnissen $a/b < 0,5$ wird in der zerstörungsfreien Prüfung (ZfP) mit Ultraschall notwendig, wenn die Prüfsituation besondere Schallfelder oder die Bedingungen für Ankopplung und Zugang zur Oberfläche eines Prüfobjektes dies erfordern. Schmale rechteckige Schwinger werden zudem häufig für Sende-Empfangs-Prüfköpfe verwendet. In Sende-Empfangs-Prüfköpfen für Senkrecht- und Schrägeinschallung wird die Wahl für schmale Schwinger durch die Bauweise vorgegeben, da Sende- und Empfangssystem in einem Gehäuse untergebracht werden müssen. Auf die besondere Situation bei den Sende-Empfangs-Prüfköpfen wird in dieser Arbeit nicht eingegangen, da für diese Prüfkopfbauforn die AVG-Methode nur mit eigens für jeden Prüfkopftyp experimentell ermittelten Diagrammen verwendet werden kann.

Bei der Ultraschallprüfung spielt die Empfindlichkeitsjustierung (d.h. die Einstellung der erforderlichen Verstärkung für die Prüfung) eines Ultraschallgerätes mit Hilfe von Testkörpern und Referenzreflektoren eine bedeutende Rolle. In der Bundesrepublik Deutschland sind seit den siebziger Jahren zwei verschiedene Strategien zur Empfindlichkeitsjustierung im Einsatz: die AVG-Methode (Abstand, Verstärkung, Größe des Fehlers) und die Bezugslinienmethode. Beide Methoden sind nach DIN-EN 583-2 standardisiert, um die Echohöhe bzw. die Echoamplitude von Reflektoren reproduzierbar zu bewerten. Die AVG-Methode stützt sich dabei auf allgemeine oder spezielle AVG-Diagramme und die Bezugslinienmethode auf an definierten Reflektoren und Testkörpern gewonnene Echohöhen. Zwischen beiden Strategien kann mit Hilfe von Umrechnungsformeln ein Übergang hergestellt werden. Die AVG-Methode hat den Vorteil, dass für alle Entfernungsbereiche die Echoamplitude nur eines Bezugsreflektors (einer Rückwand, einer querliegenden Zylinderbohrung oder einer wohldefinierten Flachbodenbohrung) benötigt wird. Die Umrechnung auf unterschiedliche Entfernungen wird anhand eines AVG-Diagramms vorgenommen, das mit der Nahfeldlänge normiert werden kann. Die Gültigkeit eines aus dieser Normierung abgeleiteten allgemeinen AVG-Diagramms für Senkrecht- und Schrägeinschallung ist bezüglich der Schwingergeometrie für kreisförmige, quadratische und rechteckförmige Schwinger mit einem Seitenverhältnis $a/b \geq 0,5$ abgesichert. Die Schallfeldausbildung von rechteckigen Schwingern und deren Einfluss auf die Ableitung von Kenngrößen wie der Nahfeldlänge ist bereits von Wüstenberg und Schlengermann in [WÜS74], [WÜS76a], [SCH74] und [SCH77] erörtert worden. Der Einfluss der rechteckigen Schwingergeometrie mit Seitenverhältnissen $a/b \geq 0,5$ auf die AVG-Methode wurde in [SCH75a] und [SCH75b] beschrieben.

Die Aufgabenstellung der vorliegenden Arbeit ist es, zu zeigen, dass auch bei schmalen rechteckförmigen Schwingern mit Seitenverhältnissen $a/b < 0,5$ die Echohöhenbewertung nach AVG vorgenommen werden kann. Die dabei zu beachtenden Einschränkungen sollen durch Messungen und Modellrechnungen herausgearbeitet werden.

Bezüglich der Schwingergeometrie ist die Gültigkeit der AVG-Methode auf folgende Punkte zu prüfen:

Der Verlauf und die Lage der Echoamplitudenkurve der Rückwand sowie der des Kreisscheibenreflektors als Funktion des Abstands zum Prüfkopf müssen denen im allgemeinen AVG-Diagramm zumindest im Fernfeld entsprechen.

Die Abhängigkeit der Echoamplitude von der Schwingerfläche soll den Gesetzmäßigkeiten folgen, auf denen das allgemeine AVG-Diagramm beruht.

Eine Zylinderbohrung soll als Referenz geeignet sein. Dazu soll die Echoanzeige einer querliegenden Zylinderbohrung durch die in der DIN-EN 583-2 angegebene Formel in die Anzeige eines Kreisscheibenreflektors überführbar sein.

3 Akustische Grundlagen

3.1 Elementare Beschreibung von Ultraschallfeldern

In der zerstörungsfreien Prüfung (ZfP) mit Ultraschall wird mit einer Schallquelle, dem Prüfkopf, über ein Koppelmedium in einen Festkörper eingeschallt. Das Präfix „ultra“ weist darauf hin, dass es sich um Frequenzen oberhalb des Hörbaren handelt. In der ZfP mit Ultraschall liegen diese Frequenzen zwischen 50 kHz und 100 MHz. Im Gegensatz zu elektromagnetischen Wellen ist die Existenz von Schallwellen an ein Medium gebunden. In Festkörpern kann der Schall als elastische Welle beschrieben werden. Dabei schwingen die einzelnen Stoffteilchen um ihre Ruhelage, d.h. es findet kein Stofftransport statt. Die Auslenkung der Teilchen bezüglich der Ausbreitungsrichtung der Welle kann unterschiedlich polarisiert sein. Man unterscheidet in isotropen Medien grundsätzlich Longitudinalwellen (Druckwellen), deren Auslenkung in Ausbreitungsrichtung stattfindet, und Transversalwellen (Scherwellen) mit Auslenkung in einer Ebene senkrecht zur Ausbreitungsrichtung. Beide Wellenarten breiten sich mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten aus.

Zur Beschreibung von Ultraschallfeldern in Festkörpern bedient man sich bekannter Modelle aus der theoretischen Optik, Akustik und Elektrodynamik. Zum Beispiel kann nach Huygens jede Wellenfront als eine Überlagerung von Kugelwellen interpretiert werden. Eine piezokeramische Platte, die über die gesamte Oberfläche uniform oszilliert, gilt als idealer Kolbenschwinger.

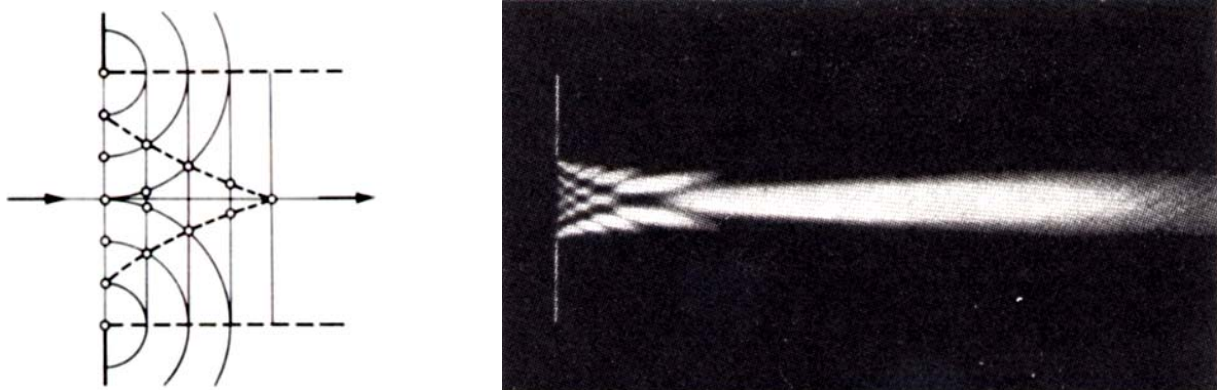


Abb. 3.1 links: Skizze zur Veranschaulichung der Interferenz vor einem begrenzten Schwinger, rechts: Modellbild einer Interferenzstruktur, helle Bereiche zeigen hohen Schalldruck (konstruktive Interferenz) und dunkle Bereiche keinen Druck, nach [KRA86]

Das Schallfeld eines kreisförmigen Kolbenschwingers ist gleich dem Feld hinter einer kreisförmigen Apertur gleichen Durchmessers D , auf die ebene Wellen fallen. Wie in Abb. 3.1 links gezeigt wird, geht ein Teil der ebenen Wellen ungehindert durch die Apertur hindurch. Am Rand werden die ebenen Wellen gebeugt, da sich auf dem Rand viele gedachte punktförmige Quellen befinden, welche Kugelwellen in den Raum abstrahlen. Es entsteht ein „Wellenschlauch“ um die Apertur, der mit den ebenen Wellen interferiert. Es kommt zur Ausbildung von Minima und Maxima. Entlang der gekrümmten, gestrichelten Linie ist der Gangunterschied ein Vielfaches von λ . Dort liegen die Maxima. Abb. 3.2 rechts zeigt ein Modellbild der mathematischen Simulation eines Schallfeldes. Die hellen Bereiche stellen Bereiche hohen Schalldrucks dar. Das Schallbündel bildet sich rotationssymmetrisch um die Mittelachse der kreisrunden Apertur aus.

3.2 Schallfeld eines kreisförmigen Kolbenschwingers

Die Schallabstrahlung in ein unendliches, homogenes und isotropes Medium kann am einfachsten an Hand einer Kugel berechnet werden, deren Radius sich sinusoidal (monofrequent) mit der Zeit ändert. Dieser Strahler wird auch als Strahler nullter Ordnung, Monopolstrahler oder atmende Kugel bezeichnet. Wird der Radius der atmenden Kugel sehr klein zur Wellenlänge, so spricht man von einer Punktquelle. Diese Punktquelle erzeugt Kugelwellen, für deren örtlichen und zeitlichen Verlauf des komplexen Schalldrucks p folgender Ausdruck gilt:

$$p(r, t) \sim j \frac{1}{\lambda r} v_0 e^{j(\omega t - kr)} \quad \text{mit } k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi f}{c} = \frac{\omega}{c} \quad \text{und } \lambda = \frac{c}{f} \quad (1)$$

wobei $v_0 \exp(j\omega t)$ die relative komplexe Form der zeitlichen Abhängigkeit der Auslenkungsgeschwindigkeit der Oberfläche darstellt (Schallschnelle).

Die Schallabstrahlung von ebenen Schallquellen beliebiger Geometrie auf einer endlosen schallharten Wand kann durch Summation der Schallabstrahlung von vielen Punktquellen innerhalb der Schallquellenfläche beschrieben werden (Huygens'sche Prinzip). Gegeben sei ein Kolbenstrahler mit einer Schallschnelle $\exp(j\omega t)$. Den komplexen Schalldruck p in einem beliebigen Punkt im Halbraum, in dem der Schall abgestrahlt wird, erhält man durch Integration über die gesamte strahlende Membranfläche S , siehe Abb. 3.2. Es wird die sogenannte Rayleigh-Formel benutzt:

$$p(r, \theta, t) \sim j \frac{1}{\lambda} \int_S \frac{1}{r'} e^{j(\omega t - kr')} dS \quad (2)$$

Die Rayleigh-Formel ist die Basis der sogenannten Punktquellensynthese, welche oft für die rechnergestützte Modellierung von Schallfeldern verwendet wird. Zur numerischen Lösung des Integrals wird die Membranfläche in Flächenelemente geteilt, von denen ein jedes durch eine Punktquelle repräsentiert wird. Die Abstände der Punktquellen auf der Membranfläche müssen ausreichend dicht sein, so dass das Sampling-Theorem erfüllt ist (siehe [GOO96]).

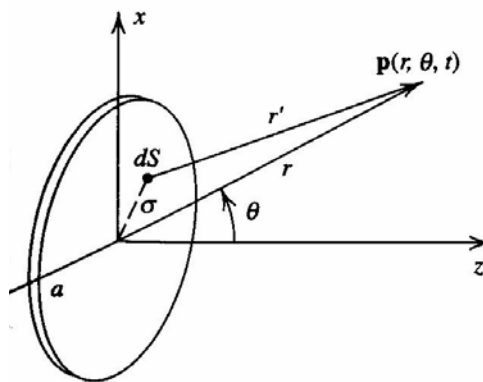


Abb. 3.2: Geometrie zur Beschreibung des Schallfeldes einer Kreiskolbenmembran mit der Rayleigh-Formel, nach [KIN00]

Während dieses Integral für eine beliebige Membrangeometrie und jeden beliebigen Punkt im Halbraum nur numerisch lösbar ist, existieren für die kreisförmige Kolbenmembran in zwei Fällen geschlossene mathematische Lösungen: (a) für die Verteilung des Schalldrucks entlang der Schallbündelachse, welche senkrecht im geometrischen Mittelpunkt der Membran steht und (b) in genügend großen Entfernungen für die Verteilung des Schalldrucks in Abhängigkeit von der Richtung zur Schallbündelachse. Diese Fälle werden benutzt, um die Eigenschaften des Schallfeldes eines Ultraschallprüfkopfes zu charakterisieren und um nötige Kenngrößen einzuführen.

(a) Der Verlauf der Schalldruckamplitude als Funktion des Abstands r entlang der Schallbündelachse wird als Entfernungsgesetz bezeichnet. Die Amplitude entspricht gerade dem Betrag des komplexen Schalldrucks. Nach entsprechender Integration von (2) über die

gesamte Schwingerfläche einer Kreiskolbenmembran erhält man als Lösung eine Funktion für den Verlauf der Schalldruckamplitude $P(r)$:

$$P(r,0) \sim 2 \left| \sin \left\{ \frac{\pi}{\lambda} \left(\sqrt{r^2 + a^2} - r \right) \right\} \right| \quad (3)$$

oder für $a \ll r$:

$$P(r,0) \sim 2 \sin \left[\frac{a^2 \pi}{2\lambda r} \right] \text{ und mit } N = \frac{a^2}{\lambda} \text{ ist } P(r,0) \sim 2 \sin \left[\frac{N\pi}{2r} \right] \quad (4)$$

Der Verlauf von (3) ist in Abb. 3.3 dargestellt. Es lassen sich deutlich zwei Bereiche unterscheiden. Im Bereich direkt hinter der Schallquelle treten mehrere Minima und Maxima auf, die von 0 bis zum zweifachen Anfangsschalldruck variieren. Dieser Bereich wird Nahfeld genannt. Da im Nahfeld große Phasenverschiebungen, die von Punktquellen ausgestrahlten Wellen auftreten, sind hier die Bedingungen für konstruktive und destruktive Interferenzen, deren Häufigkeit abhängig von λ und a ist, erfüllt.

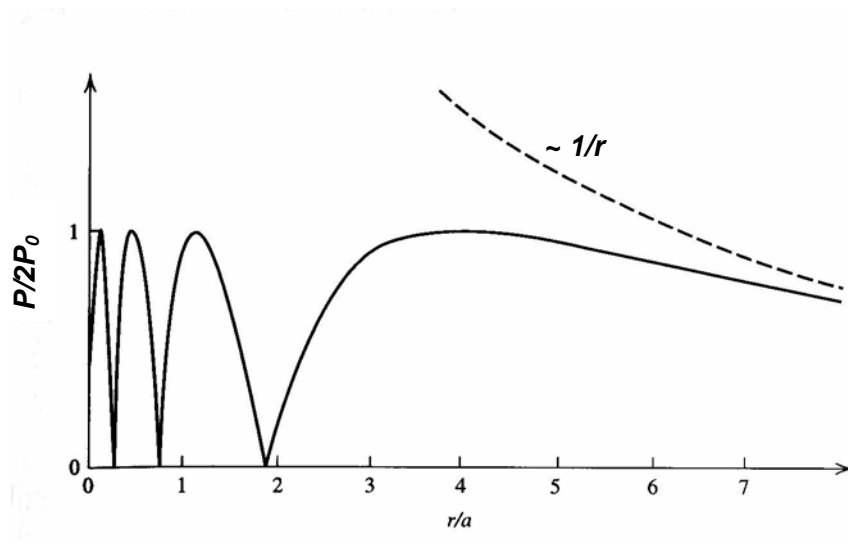


Abb. 3.3 Schalldruckamplitude als Funktion des Abstandes entlang der Schallbündelachse, nach [KIN00]

Aus dem Unendlichen kommend, entlang r auf den Schwinger zu bewegend, erhält man das erste lokale Maximum der Schalldruckamplitude im Abstand r_1 , gegeben durch:

$$r_1 = \frac{a^2}{\lambda} - \frac{\lambda}{4} \approx \frac{a^2}{\lambda} = N \text{ wenn } a \gg \lambda \quad (5)$$

Dieses Maximum wird auch als Nahfeldlänge N oder Rayleigh-Länge bezeichnet. Im Fernfeld fällt die Amplitude asymptotisch monoton ab. Bei genügend großem Abstand r nimmt der Verlauf die Form $1/r$ an, welches dem Amplitudenabfall durch sphärische Divergenz eines Punktstrahlers entspricht. Mit anderen Worten, obwohl im Fernfeld die Wellen nahezu in Phase sind, fällt dennoch die Amplitude auf der Schallbündelachse mit dem Abstand ab, weil das Strahlenbündel breiter wird. Der Schalldruckverlauf im Fernfeld kann angenähert werden durch:

$$P(r) \sim \frac{\pi a^2}{\lambda} \frac{1}{r} \text{ für } r > N \quad (6)$$

Die Nahfeldlänge ist der Ort des Übergangs vom Nahfeld ins sogenannte Fernfeld. N hat eine physikalische Bedeutung für die Ausprägung des gesamten Schallfeldes und die Verwendung von sogenannten AVG-Diagrammen bei der Empfindlichkeitsjustierung für die Ultraschallprüfung. Bei niedriger werdenden Frequenzen ($f = c/\lambda$) und oder kleiner werdenden Schwingerflächen nähert sich der Amplitudenverlauf dem einer Punktquelle an.

(b) Der Verlauf der Schalldruckamplitude im Fernfeld in einem konstanten Abstand, in Abhängigkeit von der Richtung zur Schallbündelachse wird auch als Richtcharakteristik bezeichnet. Anders ausgedrückt: die Richtcharakteristik ist die Schalldruckverteilung entlang der Linie eines Kreises, dessen Mittelpunkt sich im geometrischen Mittelpunkt der Schwingermembran befindet. Die Abb. 3.4 zeigt ein Schallbündel im Fernfeld mit Schalldruckverteilungen senkrecht zur Bündelachse in verschiedenen Abständen r . Wie bereits in (a) beschrieben nimmt für $r > N$ die Amplitude entlang der Schallbündelachse ab

und das Bündel wird breiter. Die Breite des Schallbündels wird durch einen Divergenzwinkel θ angegeben. Bezüglich Abb. 3.4 sei darauf hingewiesen, dass der Schalldruck senkrecht zur Bündelachse nur in großen Entfernungen dem der Richtcharakteristik entspricht. Für kleine Winkelausschnitte und in großen Entfernungen ist in erster Näherung die radiale Verteilung des Schalldrucks gleich der Verteilung senkrecht zur Bündelachse.

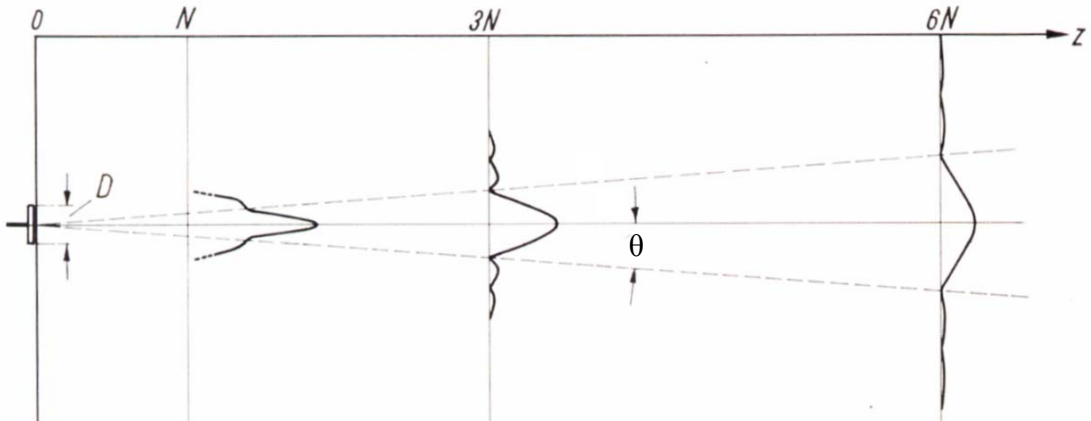


Abb. 3.4 Fernfeld von einem idealen Kreiskolbenschwinger mit Schalldruckverteilungen senkrecht zur Schallbündelachse, nach [KRA86]

Aus der Formel (2) ergibt sich für die Richtcharakteristik $H(\theta)$ eines Kreiskolbenschwingers im Fernfeld ($r \gg a, \lambda$) folgende Lösungsfunktion (Abb. 3.5):

$$H(\theta) \sim \left| \frac{2J_1(\nu)}{\nu} \right| \text{ mit } \nu = ka \sin \theta \text{ wobei } J_1(\nu) \text{ die Besselfunktion erster Ordnung ist.} \quad (7)$$

Der Verlauf der Funktion $2J_1(\nu)/\nu$ wird in Abb. 3.5 links gezeigt. Ein Maximum von $H(\theta)$ existiert immer dann, wenn $\theta = 0^\circ$ ist. Für bestimmte Argumente j_{1m} hat die Besselfunktion Nullstellen, (siehe auch [KIN00] und [GOO96]):

$$ka \sin \theta_m = j_{1m} \text{ für } m = 1, 2, 3, \dots \quad (8)$$

Die Funktion $2J_1(v)/v$ hat ihre erste Nullstelle, wenn das Argument einen konstanten Wert von rund 3,8 annimmt. Somit kann die Abhängigkeit des Divergenzwinkels θ von λ ($k = 2\pi/\lambda$) und a , unter Vernachlässigung der konstanten Werte, wie folgt beschrieben werden:

$$\sin \theta_1 \sim \frac{\lambda}{a} \quad (9)$$

Aus (9) ist ersichtlich, dass das Schallbündel mit größerer Frequenz bzw. größerem Radius a in einer festen Entfernung r schmaler wird.

Abb. 3.5 rechts zeigt ein Modellbild einer sogenannten Fraunhoferbeugung (Abstand ∞) von monochromatischen Wellen an einer kreisrunden Apertur, das einem Schnitt des Schallbündels senkrecht zur Schallbündelachse entspricht. Das Schallbündel bildet sich rotationssymmetrisch um die Mittelachse (entspricht der Schallbündelachse) der Apertur aus. Die hellen Bereiche stellen Bereiche hohen Schalldrucks dar.

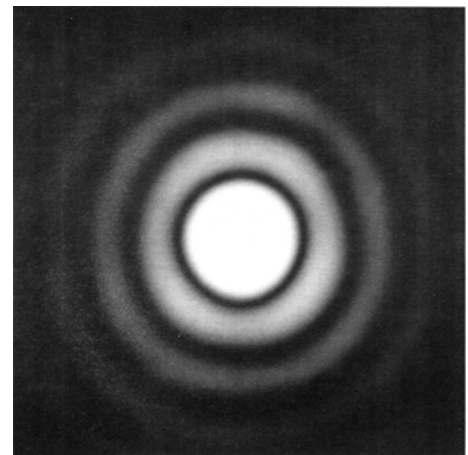
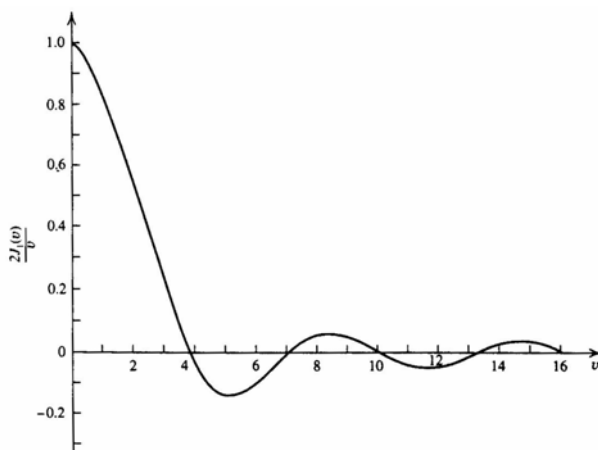


Abb. 3.5 links: Verlauf der Funktion $2J_1(v)/v$, nach [KIN00], rechts: Fraunhofer-Beugungsbild einer kreisrunden Apertur, nach [GOO96]

Die komplette Beschreibung des Schallfeldes im Halbraum eines Kreiskolbenschwingers erhält man durch Multiplikation von Entfernungsgesetz und Richtcharakteristik (siehe auch Abb. 3.6):

$$|p(r, \theta)| \sim P(r)H(\theta) \quad (10)$$

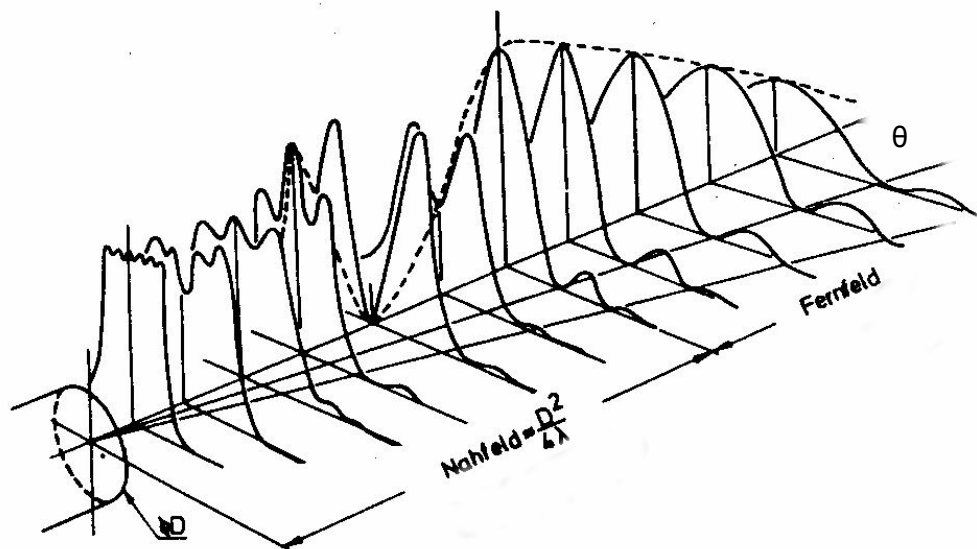


Abb. 3.6 Darstellung des Schallfeldes eines Kreiskolbenschwingers mit dem Entfernungsgesetz und der Richtcharakteristik, nach [WÜS74]

Die vorangeführten Modelle und Eigenschaften der Schallfelder bezogen sich auf harmonische Vorgänge mit der Kreisfrequenz ω . Eine Anregung der Schwinger durch Impulse ändert die Ausprägung des Schallfeldes. Abb. 3.7 links zeigt, dass durch die begrenzte Länge der von verschiedenen Punktquellen ausgehenden Impulsen in bestimmten Punkten des Halbraums keine vollständigen Interferenzen mehr möglich sind. Im Falle der Interferenz von zwei Impulsen bei einem Gangunterschied von $\lambda/2$ (wobei λ der Mittenfrequenz zugeordnet wird) kommt es nicht mehr zur vollständigen Auslöschung, siehe Abb. 3.7 rechts. Die Impulse haben eine örtliche und zeitliche „Kohärenzlänge“.

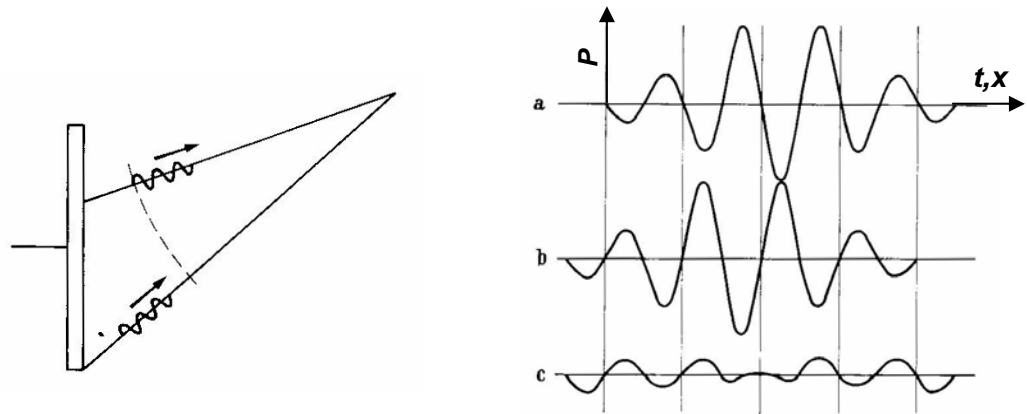


Abb. 3.7 links: Impulse mit großen Gangunterschied, rechts: Impulse mit kleinen Gangunterschied, nach [KRA86]

Rechnerisch kann ein Impuls durch Fouriertransformation von seinem Zeitverlauf in sein Wellenzahl- bzw. Frequenzspektrum überführt werden (siehe Abb. 3.8). Der Ortsverlauf des Schallimpulses kann als Summe von ebenen, unendlich ausgedehnten Wellen und ihren Amplituden dargestellt werden. Damit lässt sich der Schalldruck für jeden beliebigen Punkt im Halbraum als Summe von ebenen Wellen mit einem definierten Wellenzahlspektrum darstellen, d.h. als Fourier-Integral berechnen. An Stelle der Kugelwellen der Rayleigh-Formel treten bei dieser Beschreibung die ebenen Wellen als elementare Wellen, aus denen das Feld zusammen gesetzt ist, auf [CRE96], [GOO96].

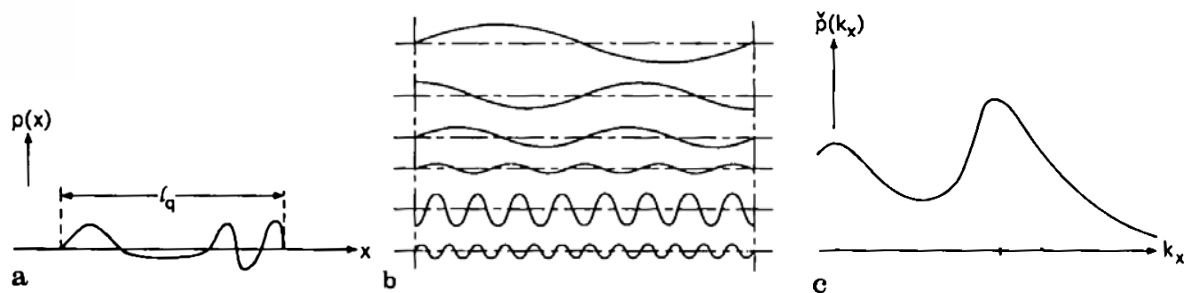


Abb. 3.8 Ortsverlauf und Wellenzahlspektrum (WZS) a – Ortsverlauf des anregenden Drucks, b – Summe von ebenen Wellen mit den Amplituden, c – WZS des angeregten Drucks $p(k_x)$, nach [CRE96]

Abb. 3.9 zeigt die Auswirkungen der Impulslänge und -form auf den Schalldruck entlang der Bündelachse eines Kreiskolbenschwingers. Es ist ersichtlich, dass die Interferenzerscheinungen im Nahfeld verschwinden, je kürzer der Impuls wird. Das Fernfeld wird kaum beeinflusst. Außerdem sei bemerkt, dass bei Schallschwächung der Impuls mit

dem Laufweg länger wird, weil höhere Frequenzanteile stärker geschwächt werden als niedrigere [BAM99].

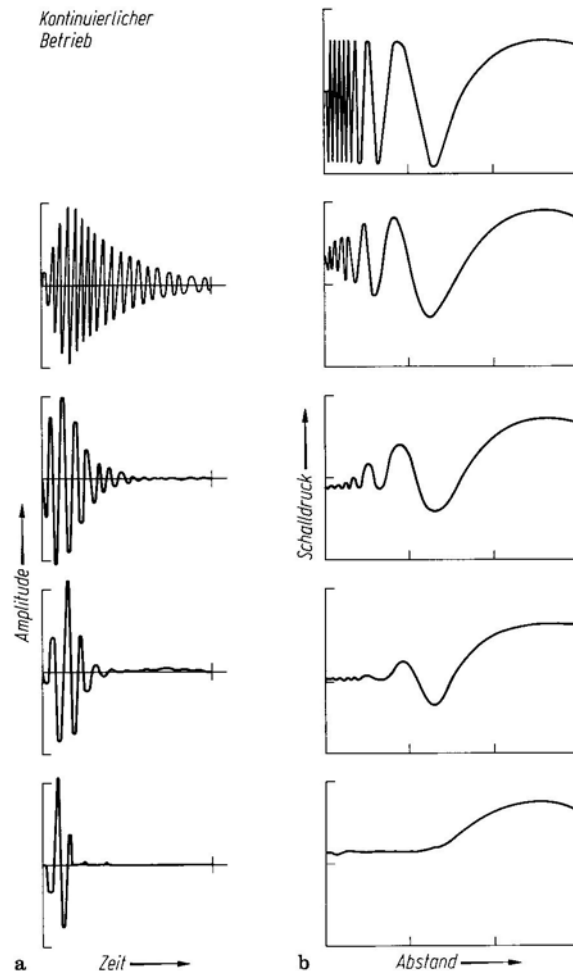


Abb. 3.9 Schalldruck auf der Achse eines Kreiskolbenschwingers bei verschiedenen Impulslängen und -formen, nach [KRA86]

Des Weiteren wurde bei den bisher ausgeführten Betrachtungen von scherspannungsfreien Medien, wie Flüssigkeiten und Gase, ausgegangen. Bei nicht scherspannungsfreien, elastischen Medien sind die Felder von Punktquellen mit Normalspannungsanregung, wie sie bei flüssigkeitsgekoppelten Prüfköpfen angenommen werden kann, für Longitudinalwellen und Transversalwellen von der Richtung abhängig. Diese Punktrichtwirkungen bei elastischen Medien müssen bei Berechnungen von Schallfeldern in Festkörpern berücksichtigt werden. Abb. 3.10 zeigt die Punktrichtwirkung für Longitudinal- und Transversalwellen.

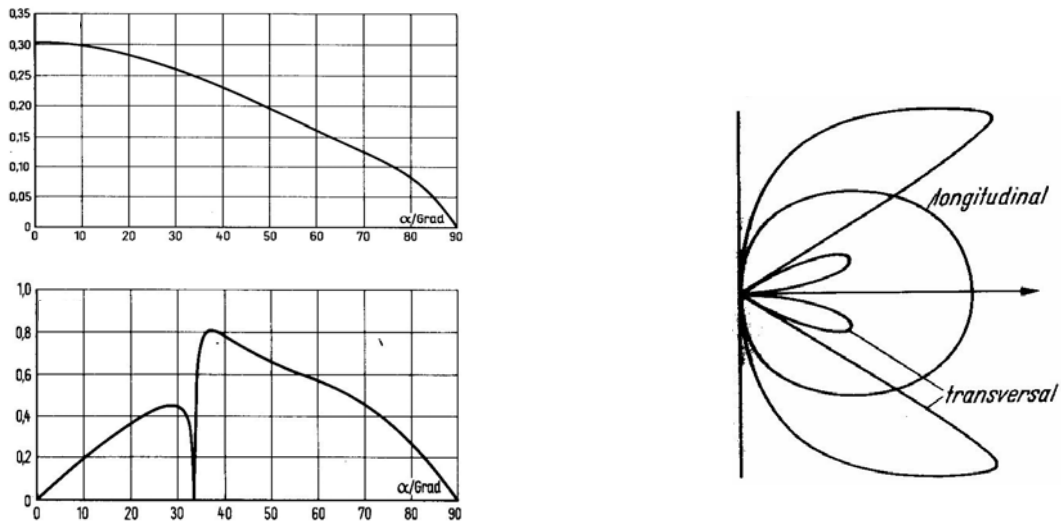


Abb. 3.10 links: Richtcharakteristiken für Longitudinal- (oben) und Transversalwellen (unten) einer Punktquelle (Punktrichtwirkung), nach [KUT83], rechts: wie links nur in Polarkoordinaten-Darstellung, nach [KRA86]

3.3 Schallfeld eines rechteckigen Kolbenschwingers

Auch die Schallfelder eines Kolbenschwingers mit beliebiger Rechteckgeometrie können mittels Rayleigh-Integral (2) berechnet werden. Die resultierenden Schallfelder sind allerdings nicht rotationssymmetrisch um die Schallbündelachse verteilt. Die Ausprägung der Felder ist stark vom Verhältnis der Seitenlängen der Rechteckschwinger abhängig. Abb. 3.11 zeigt den Schalldruck auf der Schallbündelachse von Rechteckschwingern unterschiedlicher Seitenverhältnisse (Seite a / Seite b , wobei $a < b$) im monofrequenten Fall.

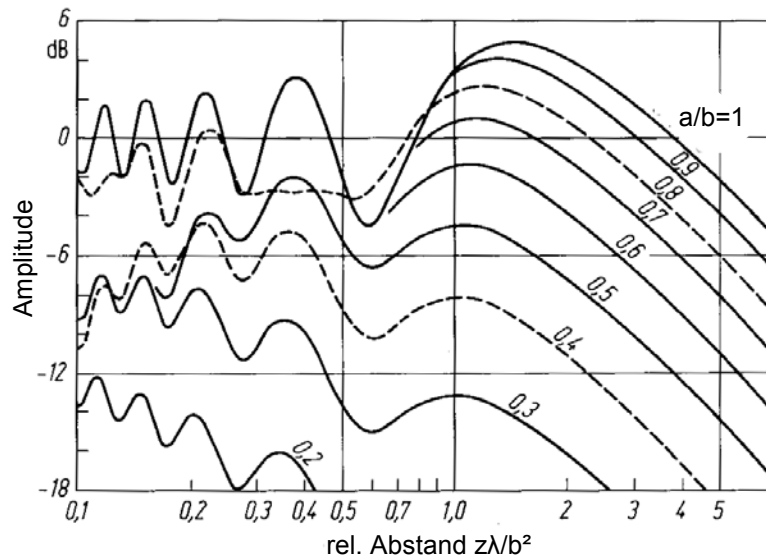


Abb. 3.11 Schalldruck auf der Achse bei verschiedenen Seitenverhältnissen, nach [KRA86]

Der Schalldruckverlauf des quadratischen Schwingers ($a/b = 1$) stimmt im Fernfeld mit dem eines flächenäquivalenten Kreisschwingers annähernd überein. Im Nahfeld zeigen die Verläufe unterschiedliche Strukturen. Aus dem Unendlichen kommend, entlang r auf den Schwinger zu bewegend, verschiebt sich das erste lokale Maximum hin zu kürzeren Abständen und kleineren Amplituden, je kleiner das Seitenverhältnis wird. Ab einem Seitenverhältnis a/b von 0,8 ist das erste Maximum nicht mehr das absolute, wie bei kreisförmigen Schwingern. Für die Lage des ersten Maximums sollte man nach Schlengermann [SCH74] den Begriff „Nahfeldlänge“ für Rechteckschwinger nicht mehr mit dem Term a^2/λ in Zusammenhang bringen. Wüstenberg in [WÜS76a] stellt fest, dass die Nahfeldlängen von Rechteckschwingern mit Seitenverhältnissen $a/b < 1$ nicht mehr klar definiert werden können. Nach [WÜS76a] kann die Nahfeldlänge näherungsweise wie folgt berechnet werden:

$$N \approx \frac{1}{\pi\lambda} (a^2 + b^2) \left(0,78 - 0,27 \frac{a}{b} \right) \text{ für } a < b \quad (11)$$

Diese Näherungsformel wird auch in den Lehrgängen für das Prüfpersonal für die ZfP mit Ultraschall vermittelt [DGZ97]. Die aus dieser Formel resultierende Nahfeldlänge dient hier als Hilfsgröße zur Verwendung von allgemeinen AVG-Diagrammen für Rechteckmembranen.

$$H(\theta) \sim \left(\frac{\sin(v_a)}{v_a} \right) \left(\frac{\sin(v_b)}{v_b} \right) \quad \text{mit. } v_a = ka \sin\theta \quad \text{und } v_b = kb \sin\theta \quad (13)$$

Das gesamte Schallfeld ergibt sich in Anlehnung an den kreisförmigen Schwinger ebenfalls durch Multiplikation von Entfernungsgesetz mit der Richtcharakteristik.

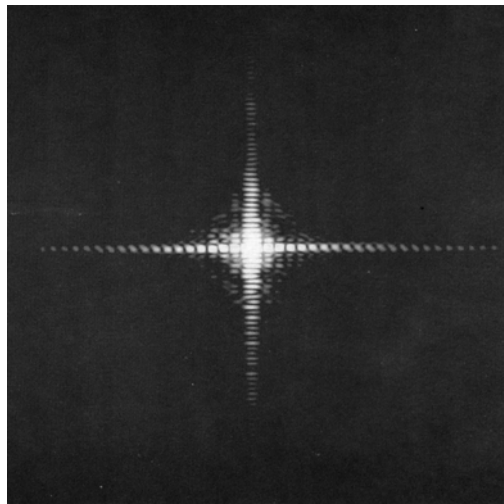


Abb. 3.13 Fraunhofer-Beugungsbild an einer rechteckförmigen Apertur mit Seitenverhältnis $a/b = 0,5$, nach [GOO96]

Rechteckschwinger werden bevorzugt in Winkelprüfköpfen eingesetzt. Je nach Einschallwinkel des Winkelprüfkopfes ändern sich der Schalldruck auf der Bündelachse und die Richtcharakteristik, siehe Abb. 3.14. Des Weiteren wird in der Einschallebene die Seite b durch Brechung zu b' verkürzt. Darum wirkt im Beispiel der Abb. 3.14 der Rechteckschwinger des Winkelprüfkopfes an der Kontaktfläche zwischen Keil und Einschallmedium wie ein quadratischer Schwinger.

4 Experimentelle Grundlagen

4.1 Entstehung eines Echosignals und Echoamplitudenbewertung nach AVG

In der Ultraschallprüfung wird der Schalldruck üblicherweise im logarithmischen Dezibelmaß angegeben, weil die Amplitudenwerte in den erfassten Messbereichen sehr große Unterschiede haben können. Das Dezibelmaß ist ein Relativmaß, das im Falle des Schalldrucks den Unterschied des effektiven Schalldrucks p zu einem Referenzschalldruck p_{ref} angibt. Es gilt für den elektrodynamisch gemessenen Schalldruckmaßstab (SDM):

$$SDM = 20 \log\left(\frac{p}{p_{ref}}\right) \text{ mit } SDM = [\text{dB}] \quad (14)$$

Die Entstehung eines Echosignals kann mittels des Reziprozitätsprinzips beschrieben werden. Das Reziprozitätsprinzip stellt zwischen Feldgrößen eine Beziehung her, wenn Anrege- und Beobachtungsort vertauscht werden. Das bedeutet z.B., dass das Schallfeld der von einem Prüfkopf ausgesendeten Wellen dieselbe Form und Gesetzmäßigkeit hat wie das beim Empfang von Schallwellen durch den gleichen Prüfkopf zu beobachtende Empfindlichkeitsfeld. Voraussetzung dafür ist unter anderem, dass reziproke Wandler wie z.B. Piezoschwinger in den Prüfköpfen verwendet werden. Wenn ein Prüfkopf Schallwellen zu einem Reflektor sendet, werden diese dort reflektiert, d.h. der Reflektor strahlt seinerseits durch die Anregung ebenfalls Wellen (Echos) aus, die von einem Empfänger in ein elektrisches Signal umgewandelt werden. Rechnerisch bedeutet dieses, das dreimal das Rayleigh-Integral (2) jeweils über die Senderfläche S_S , die Reflektorfläche S_R und die Empfängerfläche S_E berechnet werden muss. Es ergibt sich für den komplexen Schalldruck am Empfänger p_E (Abb. 4.1):

$$p_E(r, \theta, t) \sim j \frac{1}{\lambda} \int_{S_R} \left\{ \int_{S_S} \int_{S_E} \frac{1}{r'_S} e^{j(\omega t - kr'_S)} \frac{1}{r'_E} e^{j(\omega t - kr'_E)} dS_S dS_E \right\} dS_R \quad (15)$$

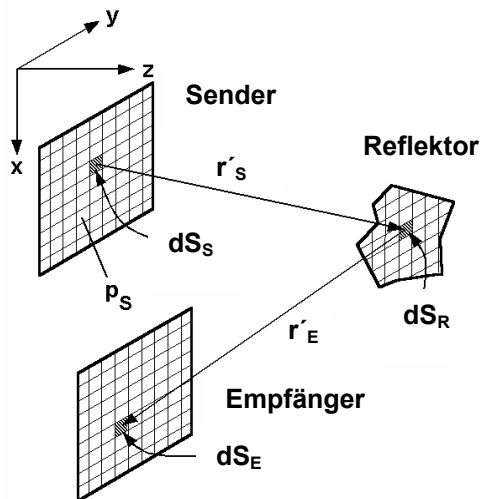


Abb. 4.1 Benennung von (15), Entstehung eines Echosignals, nach [TSC02]

In der Ultraschallprüfung wird die Bewertung von Ultraschallanzeigen hauptsächlich auf die Echoamplitude und die Echodynamik gestützt. Darauf bezogene Schwellwerte für die Zulässigkeit von Anzeigen in Regelwerken, wie der DIN-EN 583, beruhen auf Modellvorstellungen zum Bezug der Echoamplitude zur Reflektorgröße, die den jeweiligen Stand der Entwicklung in der Prüftechnik widerspiegeln. Als wichtigstes Modell dazu gilt die AVG-Methode. Sie bezieht sich auf die Reflexion an Kreisscheibenreflektoren (KSR). Für einen kreisförmigen Reflektor, dessen Durchmesser kleiner ist als der Bündelquerschnitt des vom Sender erzeugten Schallfeldes, gilt für den Schalldruck auf der Achse von einfallender Welle und reflektierter Welle der in Abb. 4.2 dargestellte Verlauf. Der Anfangsschalldruck des Reflektors ist nach dem Reziprozitätsprinzip gleich dem Schalldruck des Senders in dem Abstand ($3N_S$), wo die ausgesendete Welle auf den Reflektor trifft.

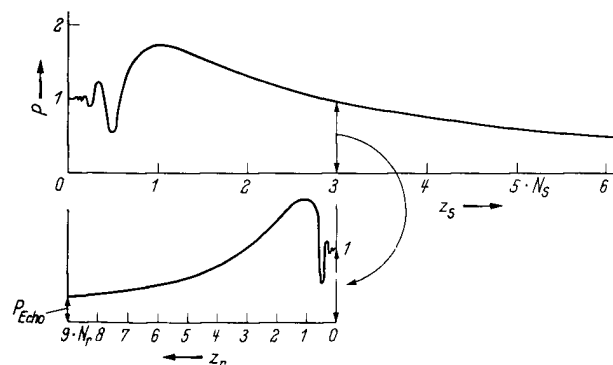


Abb. 4.2 Schalldruck auf der Achse für einfallende Welle (oben) und reflektierte Welle (unten), nach [KRA86]

Für die Echoamplituden bzw. Echohöhen H_R verschiedener Reflektoren auf der Schallbündelachse ergeben sich annähernd die in Tab. 4.1 aufgelisteten Entfernungsgesetze (auch Abstandsgesetze genannt). Die Entfernungsgesetze gelten im Fernfeld, für einen kreisförmigen Kolbenschwinger als Sender mit einem Schallbündeldurchmesser D_B , monofrequenten Schall und Senkrechteinschallung von Longitudinalwellen.

	$D_B > D_R$ $D_R =$ Durchmesser Reflektor	$l_R > D_B$ $l_R =$ Länge Reflektor	Größe Reflektor ∞
Reflektor eben	Kreisscheibenreflektor $H_R \sim D_R^2 \frac{1}{r^2}$	Streifen $H_R \sim D_R \frac{1}{\sqrt{r}}$	Rückwand $H_R \sim \frac{1}{r}$
Reflektor gekrümmt	Kugelreflektor $H_R \sim D_R \frac{1}{r^2}$	Zylinder $H_R \sim \sqrt{D_R} \frac{1}{\sqrt{r}}$	

Tab. 4.1 Entfernungsgesetze für Echos von unterschiedliche Reflektoren

Trägt man das Entfernungsgesetz der Echoamplitude von Kreisscheibenreflektoren $H(a_R, r)$ vs. Abstand r doppellogarithmisch auf, so erhält man das sogenannte AVG-Diagramm. Dabei steht A für Abstand, V für Verstärkung und G für Größe des Fehlers. Die Kurvenverläufe im Nahfeld wurden durch Messungen ermittelt (Abb. 4.3 oben). Im Fall des kreisförmigen Kolbenschwingers kann das AVG-Diagramm normiert werden. Dieses AVG-Diagramm ist durch Normierung mit der Nahfeldlänge, des Schwingerdurchmessers und dem damit verbundenen Zusammenhang $N = a^2/\lambda$ unabhängig von dem Radius des Schwingers und dessen Frequenz. Der normierte Abstand A ergibt sich aus dem Quotienten der Nahfeldlänge N und dem Abstand r des Reflektors zum Schallaustrittspunkt des Prüfkopfes:

$$A = \frac{r}{N} \quad (16)$$

Die normierte Verstärkung V ist die Echoamplitude eines Kreisscheibenreflektors H_{KSR} in Bezug zu einem Rückwandecho H_0 in sehr kleinen Abständen zum Prüfkopf ($r \rightarrow 0$). Es gilt für V :

$$V = 20 \log \left(\frac{H_{KSR}}{H_0} \right) \text{ in [dB]} \quad (17)$$

Die normierte Fehlergröße G ergibt sich aus dem Quotienten der Durchmesser des Kreisscheibenreflektors D_{KSR} und dem des Schwingers D_S :

$$G = \frac{D_{KSR}}{D_S} \quad (18)$$

Da man Ende der sechziger Jahre bestrebt war, auch Winkelprüfköpfe mit annähernd quadratischen Rechteckmembranen in das Verfahren der AVG-gestützten Echoamplitudenbewertung mit einzubeziehen, begann man das AVG-Diagramm nach Abb. 4.3 oben so zu modifizieren, dass sowohl Normalprüfköpfe mit Kreisschwingern als auch Winkelprüfköpfe bei üblichen Impulsdauern (relative Bandbreite ca. 0,3 – 0,5) mit geringfügigen Abweichungen erfasst werden konnten. Dies führte zur Einführung des sogenannten allgemeinen AVG-Diagramms nach Abb. 4.3 unten.

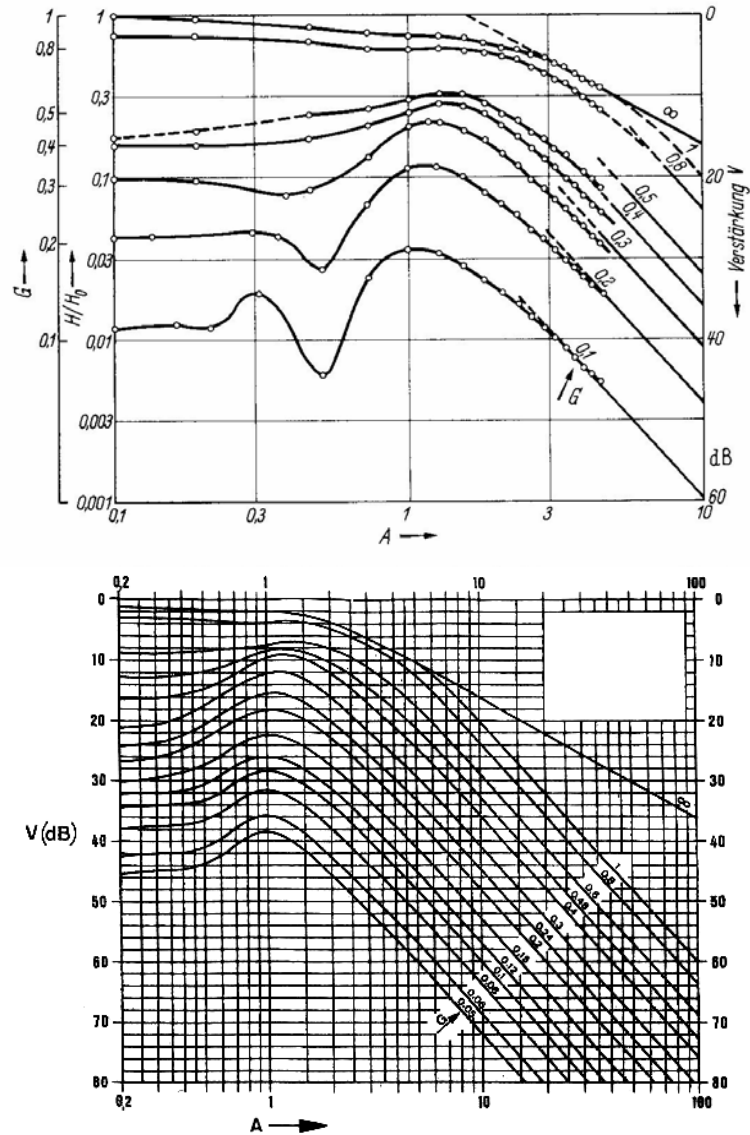


Abb. 4.3 oben: AVG-Diagramm für einen kreisförmigen Schwinger, nach [KRA86], unten: Allgemeines AVG-Diagramm, nach [DIN01]

Nach DIN-EN 583-2 [DIN01] kann das AVG-Diagramm mittels verschiedener Methoden dazu verwendet werden, von der Echohöhe der Ultraschallanzeige eines Fehlers auf die Größe einer äquivalenten Kreisscheibe zu schließen. Daraus wird dann abgeleitet, dass der betreffende Fehler mindestens so groß ist wie diese Kreisscheibe. Die aus dem AVG-Diagramm abgeleitete Größe des Kreisscheibenreflektors (KSR) wird darum auch Ersatzfehlergröße (EFG) genannt.

Die Ultraschallanzeige wird in einem sogenannten A-Bild dargestellt. Nach DIN EN 1330-4 [DIN00a] ist ein A-Bild eine Signaldarstellung, bei der auf der x-Achse die Zeit und auf der y-

Achse die Amplitudenhöhe aufgetragen ist. Die Amplitude wird entweder gleichgerichtet oder als HF-Signal dargestellt.

Zur Anwendung des AVG-Diagramms wird die Echoamplitude, die eine bestimmte Bezugshöhe im A-Bild erreicht oder überschreitet, wie folgt ausgewertet. Nach DIN-EN 583-2: *Es ist die Verstärkung V_U zu notieren, die erforderlich ist, um die Echoamplitude auf Bezugshöhe zu bringen. Dann wird im AVG-Diagramm eine Linie gezeichnet, die der Bezugshöhe entspricht, und es wird die Verstärkungsdifferenz $\Delta V = V_U - V_r$ zur Bezugshöhe am zugehörigen Schallweg s_U aufgetragen (siehe Abb. 4.4). Die Höhe des Echos kann registriert werden, entweder a) als dB-Zahl ΔH_U , um die die korrigierte AVG-Kurve bei demselben Schallweg überschritten wird, oder b) als der im AVG-Diagramm dargestellte Durchmesser des äquivalenten Kreisscheibenreflektors, der in a) gemessenen Verstärkungsdifferenz entspricht.*

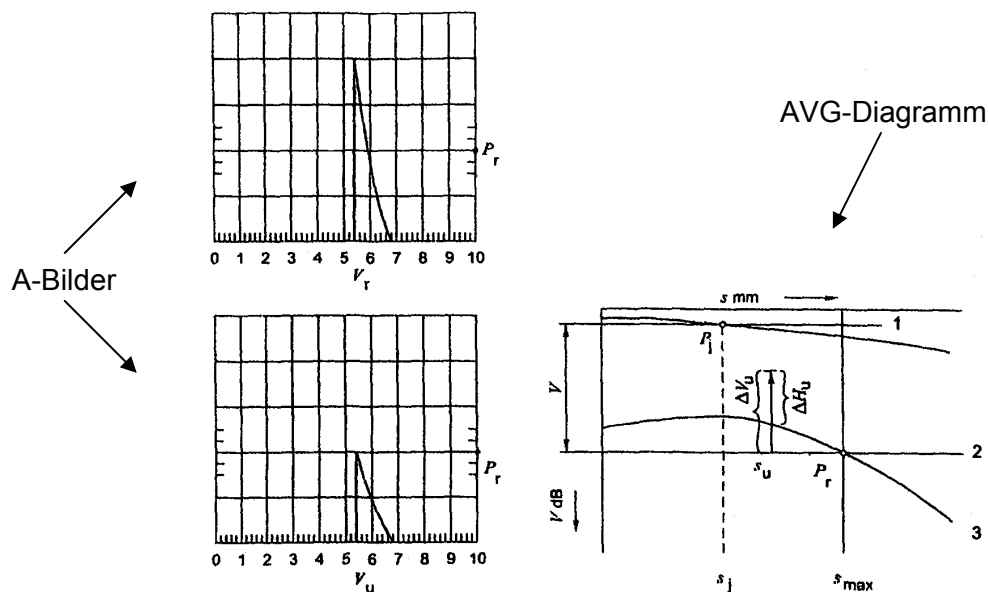


Abb. 4.4 Beispiel einer Echohöhenbewertung nach der AVG-Methode, nach [DIN01]

Als Bezugsechos können in Test- oder Vergleichskörpern (meist Stahl) folgende Reflektoren verwendet werden: Flachbodenbohrungen stellvertretend für einen Kreisscheibenreflektor bestimmter Größe, eine genügend große Rückwand oder Zylinderbohrungen senkrecht zur Einschallebene. Kreisscheibenreflektoren sind als Bezugsreflektoren nur eingeschränkt verwendbar, da sie schwer herstellbar sind. Zudem ändern sich deren Echoamplituden stark bei bereits geringer Neigung der Rotationsachse des Kreisscheibenreflektors zur

Schallbündelachse [WÜS76b]. Die Bezugsreflektoren der Wahl sind Zylinderbohrungen und Rückwände. Zylinderbohrungen haben den Vorteil gegenüber Rückwänden, dass deren Echoamplituden unabhängig vom Einschallwinkel in der Einschallebene sind. Die Echoamplitude einer Zylinderbohrung mit Durchmesser D_{ZYL} kann in eine Echoamplitude eines Kreisscheibenreflektors mit entsprechendem Durchmesser D_{KSR} umgerechnet werden. Zur Herleitung des geometrischen Zusammenhangs von Zylinder und Kreis sei auf [WÜS90] verwiesen. Bei gleicher Echoamplitude von querstehendem Zylinder und Kreisscheibe gilt in Stahl für deren Durchmesser folgende Beziehung (nach DIN-EN 583-2 und [WÜS90]):

$$D_{KSR} = 2a_{KSR} = \sqrt{\frac{\sqrt{2}}{\pi}} \lambda \sqrt{D_{ZYL} r} \quad \text{für } r > 0,7N \text{ und } D_{ZYL} > 1,5\lambda \quad (19)$$

Prinzipiell kann auch für Breitbandimpulse sowie für jede Art von Reflektor, Prüfkopf, Wellenart ein AVG-Diagramm messtechnisch oder rechnerisch aus Modellierungen erstellt werden. Diese sogenannten speziellen AVG-Diagramme können jedoch nicht normiert oder sonst wie verallgemeinert werden.

4.2 Gruppenstrahlertechnik

Im Gegensatz zum konventionellen Prüfkopf enthält ein Gruppenstrahlerprüfkopf (auch *phased array* genannt) einen in einzelne Elemente unterteilten piezoelektrischen Wandler zur elektronischen Steuerung und Formung der Schallbündel. Das Konzept stammt aus der Radartechnik, wo mit Hilfe von Einzelantennen, deren Impulse phasenverschoben angeregt werden, ein Schwenk oder eine andere Änderung des Feldes erzeugt wird. Streng genommen bezieht sich der englische Begriff „phased array“ auf diese phasenverschobene Ansteuerung von einzelnen Elementen (siehe Abb. 4.5 links). In der Gruppenstrahlertechnik für die Ultraschallprüfung werden jedoch kürzere Impulse verwendet, weshalb bei einem Schwenk für die Ansteuerung der einzelnen Elemente, die Laufzeit der einzeln ausgesendeten Impulse angepasst werden muss (siehe Abb. 4.5 rechts). Die Ansteuerung der einzelnen Elemente muss daher bei Gruppenstrahlern durch eine zeitliche Verzögerung (τ) realisiert werden. Dennoch soll der eingeführte Begriff *phased array* in dieser Arbeit verwendet werden.

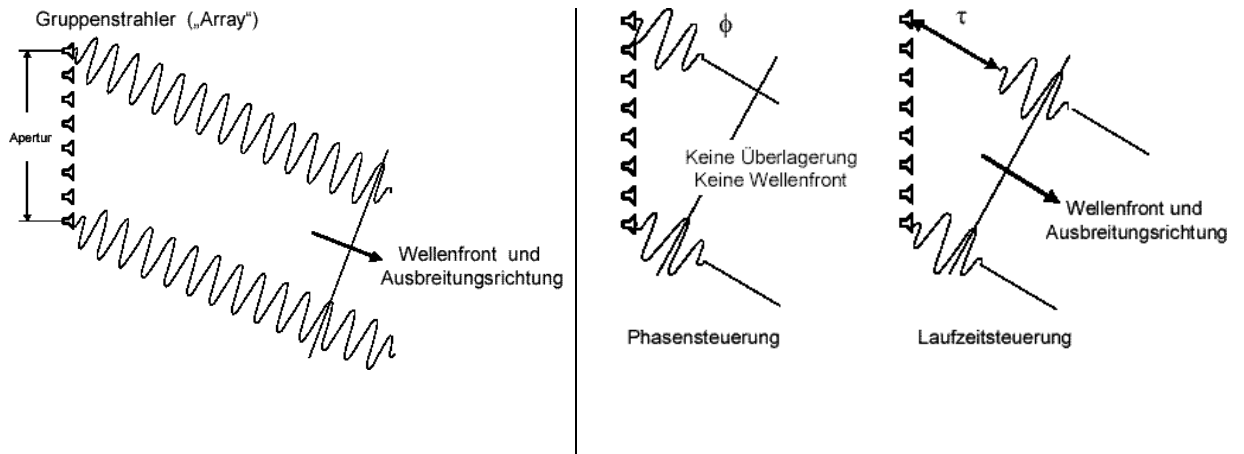


Abb. 4.5 Steuerung durch Phasenverschiebung bei langen Impulsen (links) und Steuerung durch Laufzeitverschiebung bei kurzen Impulsen (rechts), nach [WÜS03]

Bei der Ansteuerung der Elemente können mit einer beliebigen zeitlichen Verzögerung unterschiedliche Richtungs- und Formänderungen der Wellenfronten erzeugt werden. Abb. 4.6 zeigt am Beispiel einer eindimensionalen Anordnung von Elementen, auch Linear-Array genannt, welche Schallfeldvariation in der Praxis damit erzeugt werden kann.

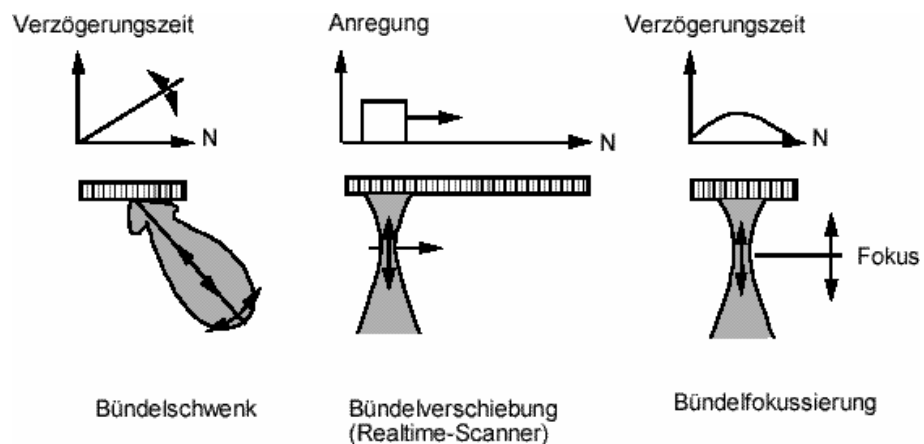


Abb. 4.6 Schallfeldvariation mit Gruppenstrahlern, nach [WÜS03]:

Der allgemeine Aufbau eines Gruppenstrahlergerätes ist in Abb. 4.7 dargestellt. Der Aufbau setzt sich aus dem Prüfkopf (Array), aufwendigen vieladrigen Kabeln zur elektrischen Kontaktierung, den Endstufen (hier in einen Prüfkopf-Anschlusskasten eingebracht) und den im Gerät enthaltenen Einzelkanal-Sender mit variablen Verzögerungen und Verstärkungen zusammen. Außerdem befindet sich im Gruppenstrahlergerät ein Rechner für den Einzug und die Verarbeitung der Daten.

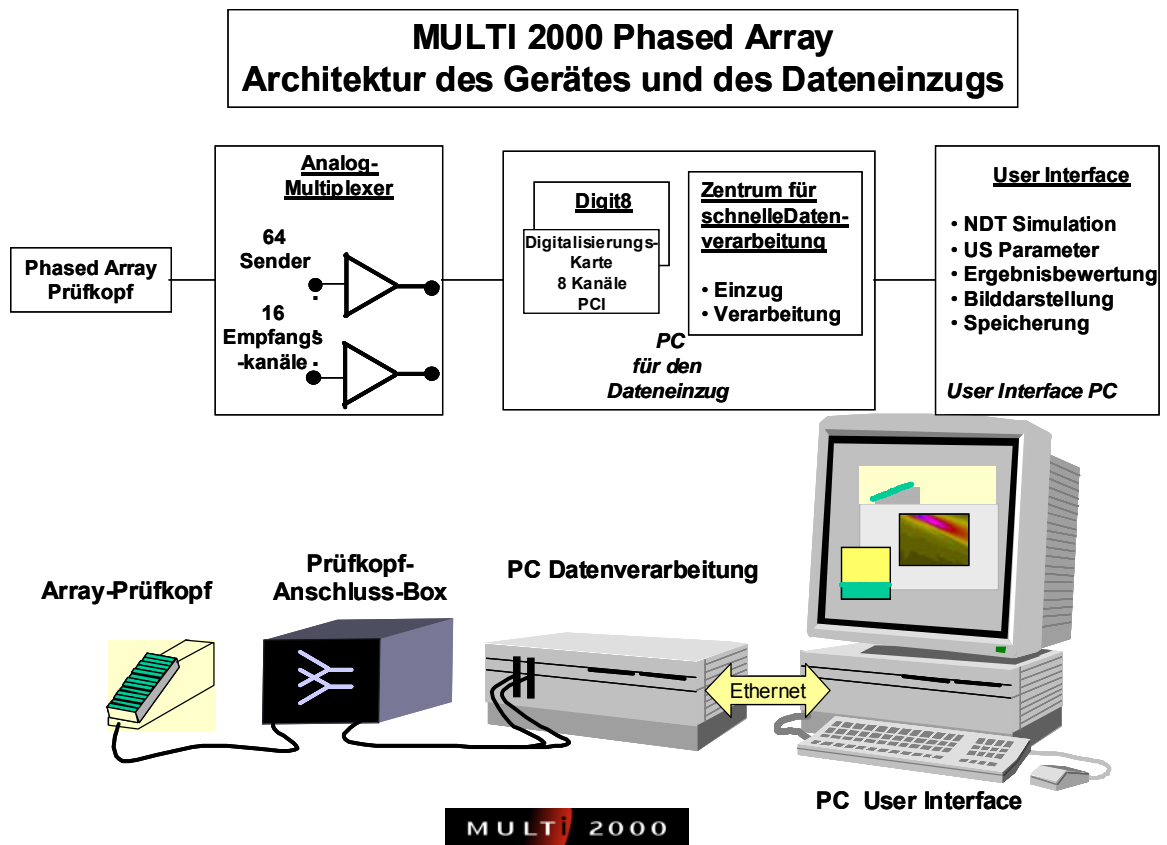


Abb. 4.7 Prinzipieller Aufbau eines Gruppenstrahlergerätes am Beispiel des Systems Multi 2000 von CEA-Technatom, nach [WÜS03]

4.3 Modellierung mit dem Fast-Semi-Analytical-Model (FASM)

Das in der BAM entwickelte Modell zur Berechnung von Echosignalen der Ultraschall-Impuls-Echo-Methode dient der Lösung von praxisnahen Aufgabenstellungen und der Bewertung von Ultraschallprüftechniken. Es wird u.a. zur Beurteilung von Prüfsituationen und der Auswirkungen der Variation von Prüfparametern, zur Berechnung von Echohöhen und -dynamiken und zur Interpretation von Messergebnissen eingesetzt.

Das von Boehm et al. entwickelte FASM [BOE99] beruht prinzipiell auf der Punktquellensynthese, wie im Kapitel 3 vorgestellt. Weiterhin beruht es auf der Schallfeldbeschreibung von Prüfköpfen von Wüstenberg [WÜS74] und Erhard [ERH82] und auf der Beschreibung der physikalischen Elastodynamik nach Langenberg [LAN87], Miller und Pursey [MIL54] und Kutzner [KUT83].

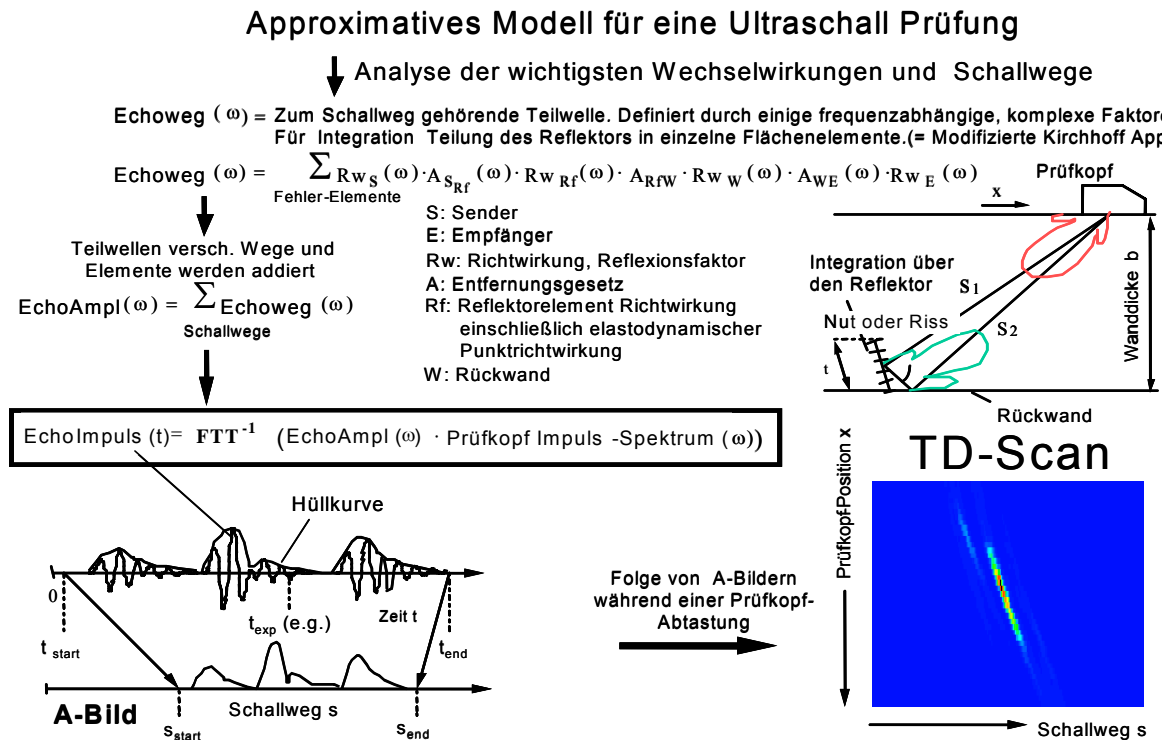


Abb. 4.8 Flussdiagramm des Fast-Semi-Analytical-Model (FASM), nach [R. Boehm]

Das Prinzip des Modells arbeitet wie folgt (Abb. 4.8): Es wird ein Echo synthetisiert, welches vom Prüfkopf zu empfangen ist. Das Echo entsteht aus den Echoanteilen aller Flächenelemente des Fehlers, die durch unterschiedliche Wechselwirkungen bei verschiedenen Schallwegen entstehen. Die Echoanteile werden durch eine Anzahl von wellenlängen-, wellenmode- und polarisationsabhängigen Faktoren bestimmt und im Frequenzraum komplex summiert. Die Eingangsgrößen bestehen aus der analytisch formulierten Geometrie und ca. 50 Parametern zur Anpassung an das Prüfproblem. Als Ergebnis werden Echos im Frequenzbereich erzeugt und durch schnelle Fouriertransformation (FFT) in A-Bilder in den Zeitbereich transformiert. Die Darstellung der Ergebnisse einer modellierten Ultraschallprüfung erfolgt in der praxisüblichen Form von A-Bildern und TD-Bildern mit Farbcodierung, Echodynamiken oder Echotomogrammen. Modell- und Messergebnisse sollen noch möglichst direkt miteinander vergleichbar sein.

Die Gültigkeit des Modells wurde durch Messergebnisse überprüft und dabei auch iterativ korrigiert. Man erhält durch das Modell Aussagen über die Form und Höhe der Echoamplitude und Echodynamik bei Variation der Prüfparameter, wie z.B. Fehlerform und –größe, Prüfkopfgröße, Frequenz und Impulsform, Einschallwinkel usw. Mit diesen Informationen können Prüftechniken auf bestimmte Prüfsituationen eingestellt oder Effekte und deren Ursachen ermittelt werden.

Das Modell ist bestimmten Einschränkungen unterworfen. Es setzt die ultraschallphysikalische Kenntnis der Einzelprozesse bei der Wellenausbreitung und Reflexion voraus. Die Zahl der Einzelprozesse hat Einfluss auf die Rechenzeit, welche ggf. berücksichtigt werden kann. Die Gültigkeit der Annahmen und Näherungen muss jeweils kritisch hinterfragt und messtechnisch für bestimmte Eckdatensätze abgesichert werden.

5 Durchführung der Untersuchungen

5.1 Lösungsmethoden

Mit den in der BAM entwickelten Modellen zur Schallfeldberechnung Array3D und zur Echoberechnung Echo3D wurden Ultraschallfelder sowie Echoamplituden-Abstands-Diagramme für rechteckige Ultraschallschwinger mit verschiedenen Abmessungen erstellt. Die Ergebnisse der Modellierung sind mit Messungen in Stahl an einem Testkörper mit Flachboden- und querstehenden Zylinderbohrungen in Kontakttechnik verglichen worden.

Mithilfe der Linear-Arrays der Bauart BAM/Siemens wurden rechteckförmige Ultraschallschwinger unterschiedlicher Abmessungen durch die Zusammenfassung unterschiedlicher Anzahlen von Schwingerelementen des Gruppenstrahlers dargestellt. Es kann davon ausgegangen werden, dass die gleichzeitig angeregten Schwingerelemente das gleiche Schallfeld erzeugen, wie eine zusammenhängende Schwingerfläche gleicher Abmessungen.

Zusätzlich wurden drei Prüfköpfe mit rechteckigen Einschwingern unterschiedlicher Abmessungen hergestellt. Die Darstellung der Schallfelder der Einschwinger-Prüfköpfe sowie der Arrays erfolgte durch Messen der Richtcharakteristik in zwei Ebenen. Gleichzeitig wurde dabei auch deren Funktionsfähigkeit überprüft.

5.2 Vorbereitungen

Das BAM-Linear-Array ist wahlweise auf einen von zwei Plexiglaskeilen mit unterschiedlichen Keilwinkeln montiert worden, um einen Einschallwinkel des Schallbündels von 45° zur Probenoberfläche für longitudinale bzw. transversale Ultraschallwellen in ferritischen Stahl zu erzeugen. Nach dem Brechungsgesetz von Snellius [KRA86] wurden für Longitudinal- sowie für Transversalwellen zwei unterschiedliche Keilwinkel ermittelt.

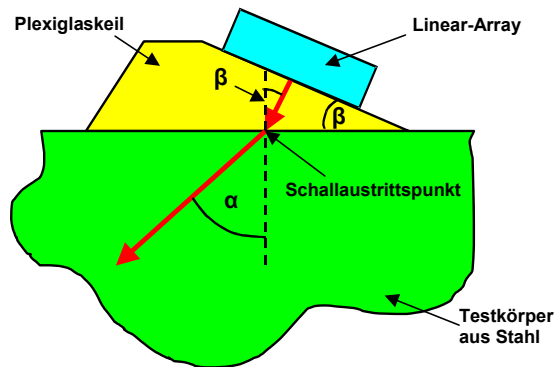


Abb. 5.1 Geometrische Darstellung der Ausbreitung von Ultraschallwellen durch zwei Medien

Abb. 5.1 zeigt schematisch die Einschallebene mit Schnitt durch das Linear-Array, dem Plexiglaskeil und dem Testkörper (Tk) aus Stahl. Die Normalen der Wellenfronten bzw. die Wellenvektoren zeigen in Richtung des roten Pfeils, welche der Ausbreitungsrichtung von ebenen Ultraschallwellen entsprechen. Nach Snellius gilt:

$$c_{i,Tk} \sin(\beta) = c_{L,Plexi} \sin(\alpha) \quad (20)$$

wobei α der Einschallwinkel, β der Einfallswinkel und $c_{i,Tk/Plexi}$ die werkstoff- und wellenmodespezifische Schallgeschwindigkeit ist. Nach dem Innenwinkelsatz für Dreiecke ist der Keilwinkel gleich dem Einfallswinkel β .

In Tab. 5.1 sind die Parameter und Ergebnisse zur Berechnung der Keilwinkel für die Einschallung von 45° in Stahl für Longitudinal- und Transversalwellen angegeben.

Wellenmodus	$c_{i,Tk}$	$c_{L,Plexi}$	α (Sollwert)	β (Sollwert)
i	[m/s]	[m/s]	[°]	[°]
Longitudinal	5920	2730	45°	$19,0^\circ$
Transversal	3255	2730	45°	$36,4^\circ$

Tab. 5.1 Keilwinkel für Longitudinal- und Transversalwellen

Die trapezartige Form der Keile soll verhindern helfen, dass die im Plexiglaskeil reflektierten Ultraschallwellen wiederum durch Reflexion direkt in den Schallstahl treten. Die Einkerbungen auf der Vorderseite, siehe Abb. 5.2, sollen diese unerwünschten Wellen streuen, so dass diese nicht das eigentliche Echosignal stören. Beide Keile wurden in der laborinternen Werkstatt hergestellt. Das Linear-Array der Bauart Siemens ist direkt mit dem zwei Komponenten Epoxidharz „plus sofortfest“ der Firma UHU auf den Keil aufgeklebt worden. Dabei übernahm die Klebschicht gleichzeitig die Funktion der Koppelschicht. Das Linear-Array der Bauart BAM, siehe ebenfalls Abb. 5.2, wurde dagegen mit Madenschrauben an einer zuvor auf dem Keil aufgeklebten Halterung angebracht. Als Koppelmedium diente eine Koppelpaste der Firma Krautkrämer.

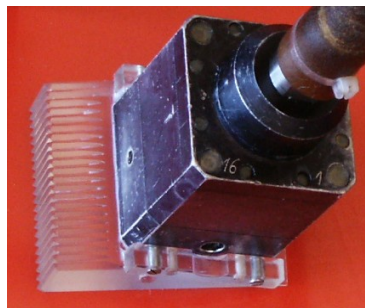


Abb. 5.2 BAM-Linear-Array mit Plexiglaskeil und Halterung

Die Einschwinger-Prüfköpfe sind im Eigenbau in der BAM realisiert worden. Die Plexiglaskeile haben einen Keilwinkel-Sollwert von $36,4^\circ$. Als Schwingermaterial stand die Piezomonolithkeramik Blei-Zirkonat-Titanat (PZT) mit einer Resonanzfrequenz von 2 MHz der Firma Rosenthal zur Verfügung. Der Lieferzustand des Schwingermaterials ist eine kreisförmige Scheibe von 1,35 mm Dicke, deren Oberflächen mit Silber bedampft sind.

In Abb. 5.3 ist der Aufbau des Einschwingerprüfkopfes schematisch dargestellt. Zunächst wurde mit einem Cutter und Schleifpapier die Schwingerkeramik auf die gewünschte rechteckige Geometrie geschnitten. Es folgte das Auflöten eines Kupferdrahtes auf der Unterseite der Schwingerkeramik, welche anschließend entfettet und von der Oxidschicht befreit wurde, um eine bessere Haftung des Klebers zu ermöglichen. Mit dem Zweikomponenten-Kleber „Stycast 1266“ der Firma Emmerson Cumming ist die Schwingerkeramik auf den Plexiglaskeil aufgeklebt worden. Nach Aushärten des Klebers folgte das Auflöten eines zweiten Drahtes auf die versilberte Oberseite der Schwingerkeramik um den elektrischen Anschluss herzustellen. Danach wurde die gesamte

Oberfläche der Schwingerkeramik entfettet und mit einem Pappstreifen der Höhe 10 mm umrahmt. Dieser Rahmen hat die Aufgabe, die noch flüssige Dämpfungsmasse während des Aushärtens aufzufangen. Die Dämpfungsmasse besteht aus dem zwei Komponenten Epoxidharz „Stycast 1266“ und einem Blei(II)oxid- Pulver der Firma Merck, welches in einem Massenverhältnis von 1/5,6 angerührt wurde. Die Dämpfungsmasse erhält durch das angegebene Mischverhältnis eine akustische Impedanz, die sich der Piezokeramik nähert. Nach dem Vergießen der Dämpfungsmasse in den Rahmen, wurde ein Stück Schaumstoff auf die noch flüssige Oberfläche gedrückt, um dieser eine poröse Struktur zu geben, durch die die Ultraschallwellen im Dämpfungskörper gestreut werden. Nach dem Aushärten des Epoxidharzes ist dieser Schaumstoff entfernt worden.

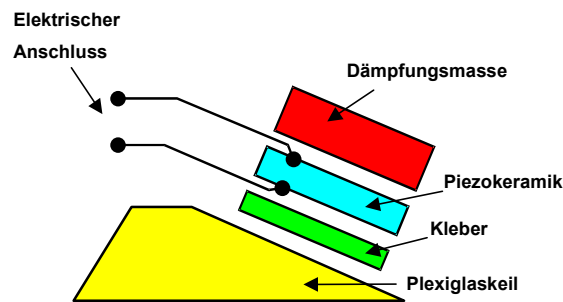


Abb. 5.3 Aufbau eines Einschwinger-Prüfkopfes schematisch

5.3 Charakterisierung der Prüfköpfe

Die Charakterisierung der Ultraschallprüfköpfe ist durch Messung der Richtcharakteristik an einem Versuchsaufbau der Firma WAZAU „messen + prüfen“ Berlin realisiert worden.

Abb. 5.4 und Abb. 5.5 zeigen die Messvorrichtung, bestehend aus Halbzylindern ferritischen Stahls mit unterschiedlichen Durchmessern, an denen die Schalldruckverteilungen auf einem Halbkreis senkrecht zur Schallbündelachse des Prüfkopfes gemessen werden können. Während des Messvorgangs wird eine elektrodynamische Sonde, welche die Schallschnelle berührungsfrei misst, tangential über die zylindrische Mantelfläche des Testkörpers automatisch verfahren [WÜS74]. Schematisch ist der Weg der Sonde als roter Pfeil in Abb. 5.5 dargestellt. Die Messsonden, sind je nach Aufbau für eine Teilchenbewegung normal zur Oberfläche (Longitudinalwellen) und für eine Teilchenbewegung tangential zur Oberfläche (Transversalwellen) empfindlich. Der zu untersuchende Prüfkopf wird als Sender verwendet

und die elektrodynamische Sonde als Empfänger. Für eine detailliertere Beschreibung des Aufbaus und des Messprinzips sei auf [WAZ80], [WÜS74] sowie auf DIN 25450 [DIN90] und EN 12668-2 [EN00] verwiesen.

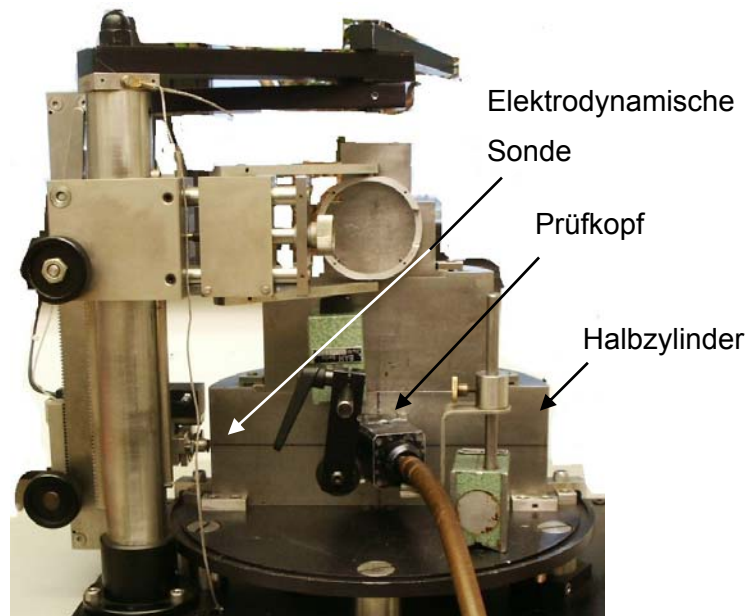


Abb. 5.4 Vorderansicht des Richtcharakteristik-Messplatzes

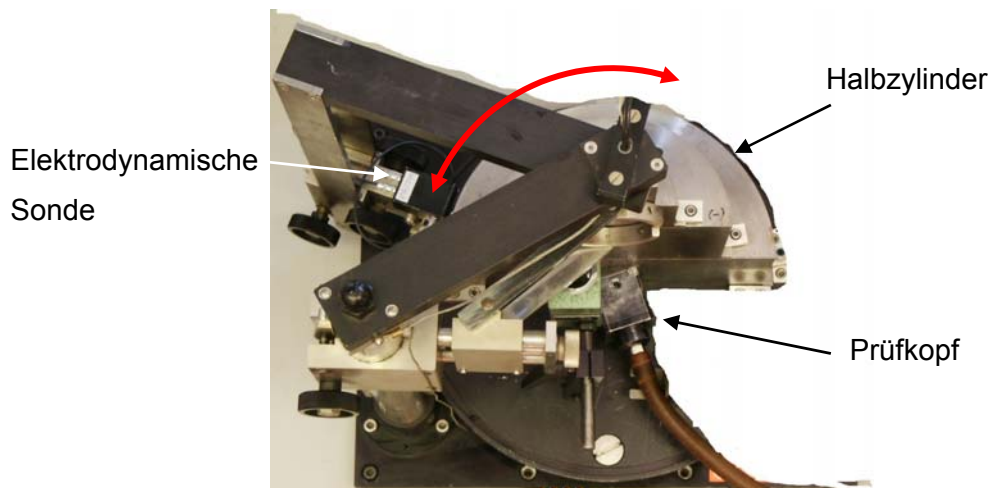


Abb. 5.5 Draufsicht des Richtcharakteristik-Messplatzes

Die Richtcharakteristiken wurden an einem Halbzylinder $R = 150$ mm gemessen. Die Empfindlichkeit der Messsonde wurde entsprechend der Mittenfrequenz der Prüfköpfe angepasst. Als Ultraschallgerät ist das Gruppenstrahler-Gerät UZFP der BAM verwendet


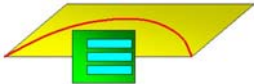
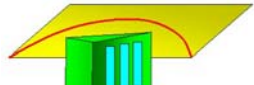
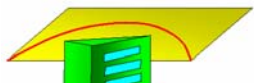
worden. In ca. 1/7 Grad-Schritten erfolgte die Aufzeichnung eines A-Bildes, welches im Anschluss durch die Software „UT-View“ Version 5.9.13.1 der BAM ausgewertet wurde. Der Kurvenverlauf der Richtcharakteristik ergab sich aus dem Maximum der Amplitude des A-Bildes als Funktion der tangentialen Wegänderung in Grad. Zur Verringerung des statistischen Rauschens im Signal sind die Richtcharakteristiken abschließend gemittelt worden. Aus je 7 Werten wurde der Mittelwert ausgewertet.

In Tab. 5.2 sind die Prüfköpfe aufgelistet, deren Richtcharakteristiken gemessen wurden.

<p>BAM-Linear-Array: 16 Schwingerelemente je $32 \cdot 1,82 \text{ mm}^2$, Gesamtfläche = $32 \cdot 32 \text{ mm}^2$, Senkrechteinschallung, Mittenfrequenz = 2,8 MHz, Schwingermaterial: PTZ</p>	
<p>Siemens-Linear-Array 0 EI3 (32 × 32) V16 MC 149/98: 16 Schwingerelemente je $32 \cdot 1,82 \text{ mm}^2$, Gesamtfläche = $32 \cdot 32 \text{ mm}^2$, Senkrechteinschallung, Mittenfrequenz = 2,8 MHz, Schwingermaterial: Piezo-Composite</p>	
<p>Einschwinger-Prüfkopf PK 32•04: Schwingerfläche = $32 \cdot 4 \text{ mm}^2$, Einschallwinkel von 45° in Stahl, Transversalwelle, längere Rechteckseite liegt parallel zur Einschall- ebene, Mittenfrequenz = 1,65 MHz, Schwingermaterial: PTZ</p>	
<p>Einschwinger-Prüfkopf PK 32•16: Schwingerfläche = $32 \cdot 16 \text{ mm}^2$, Einschallwinkel von 45° in Stahl, Transversalwelle, längere Rechteckseite liegt parallel zur Einschall- ebene, Mittenfrequenz = 1,65 MHz, Schwingermaterial: PTZ</p>	
<p>Einschwinger-Prüfkopf PK 32•32: Schwingerfläche = $32 \cdot 32 \text{ mm}^2$, Einschallwinkel von 45° in Stahl, Transversalwelle, Mittenfrequenz = 1,65 MHz, Schwingermaterial: PTZ</p>	

Tab. 5.2 Prüfkopfdaten

In den Tabellen Tab. 5.3 und Tab. 5.4 sind die Versuchsparameter und die geometrischen Anordnungen der Prüfköpfe am Richtcharakteristik-Messplatz zusammengefasst. In der rechten Spalte ist schematisch die Ausrichtung der Schwingerelemente des Arrays und der Schwinger der Einschwinger-Prüfköpfe am Richtcharakteristik-Messplatz dargestellt. Die rote Linie beschreibt den Weg der elektrodynamischen Sonde in der betrachteten Ebene, in der die Richtcharakteristik gemessen wurde. Die Begriffe horizontale/ vertikale Anordnung beziehen sich auf die Ausrichtung der längeren Seite b der Schwingerelemente relativ zu dieser Ebene.

Prüfkopf	Ansteuerung von...	Einschallwinkel β , Wellenmodus;	Anordnung der Schwingerelemente am Richtcharakteristik-Messplatz
Linear-Array BAM	einzelnen Schwingerelementen und Elementgruppen des Arrays	$\beta = 0^\circ$ in Stahl, Longitudinalwelle	
			Bild: vertikale Anordnung
		$\beta = 45^\circ$ in Stahl, Longitudinal- /Transversalwelle	
			Bild: horizontale Anordnung
Linear-Array Siemens	einzelnen Schwingerelementen und Elementgruppen des Arrays	$\beta = 0^\circ$ in Stahl, Longitudinalwelle	
			Bild: vertikale Anordnung
		$\beta = 45^\circ$ in Stahl, Longitudinal- /Transversalwelle	
			Bild: horizontale Anordnung

Tab. 5.3 Versuchsparameter der Messungen der Richtcharakteristiken

Prüfkopf	Einschallwinkel β , Wellenmodus;	Anordnung des Schwingers am Richtcharakteristik- Messplatz
Einschwinger PK 32•04	45° in Stahl, Transversalwelle	 <i>Bild: horizontale Anordnung</i>
Einschwinger PK 32•16	45° in Stahl, Transversalwelle	 <i>Bild: horizontale Anordnung</i>
Einschwinger PK 32•32	45° in Stahl, Transversalwelle	 <i>Bild: Anordnung</i>

Tab. 5.4 Versuchsparameter der Messungen der Richtcharakteristiken, Einschwinger

Die Prüfköpfe waren am Halbzylinder angekoppelt. Bei Senkrechteinschallung ($\beta = 0^\circ$) wurden die Mittelachsen der Arrays mit der Mittelachse des Halbzylinders in Deckung gebracht. Bei Einschallung unter 45° ist der Schallaustrittspunkt (Anregung von 14 Schwingerelementen) annähernd auf die Mittelachse des Halbzylinders ausgerichtet worden, in dem im Impuls-Echo-Betrieb das Echo der zylindrischen Rückwand, durch Verschieben des Prüfkopfes, auf maximale Amplitude gebracht wurde.

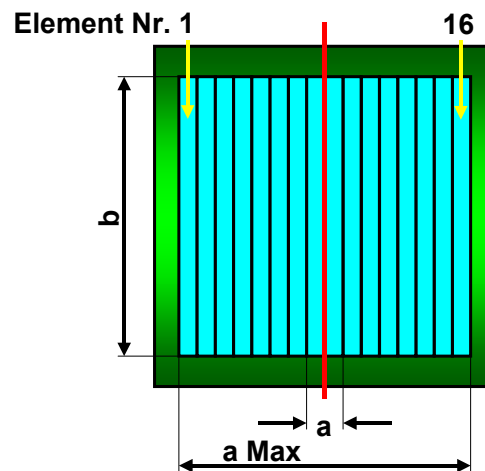


Abb. 5.6 Schematische Darstellung des Siemens-/ BAM-Linear-Arrays

Wie im Kapitel 5.1 beschrieben, sind mit dem Linear-Array unterschiedliche Rechteckgeometrien durch Anregung einer unterschiedlichen Anzahl von Schwingerelementen realisiert worden. Abb. 5.6 zeigt schematisch den Aufbau des Siemens- bzw. BAM-Linear-Arrays. Die Seite b ($a < b$) ist durch die Länge der Schwingerelemente gegeben und bleibt konstant. Seite a vergrößert sich mit Anzahl der angeregten Schwingerelemente. Die strahlende Fläche ergibt sich aus der Anzahl der angeregten Elemente und der Lücken, welche zwischen zwei Elementen 0,2 mm beträgt. Das Zuschalten der Elemente erfolgte paarweise, jeweils links und rechts von der Mittelachse ausgehend (rote Linie). Des Weiteren sind die Schwingerelemente durch vorhandene Kennzeichen am Array eindeutig nummeriert. Tab. 5.5 zeigt, welche Schwingergeometrien erzeugt wurden.

Anzahl der angesteuerten Elemente der Linear-Arrays	Geometrie des simulierten Einschwingers ($a \cdot b$) [mm ²]	a/b-Verhältnis
2	4 • 32	0,13
4	8 • 32	0,25
6	12 • 32	0,38
8	16 • 32	0,50
10	20 • 32	0,63
12	24 • 32	0,75
14	28 • 32	0,88
16	32 • 32	1,00

Tab. 5.5 Übersicht über die erzeugten Schwingergeometrien mittels Linear-Arrays

5.4 Automatisierte Ultraschallmessung an Flachbodenbohrungen und der Rückwand

Abb. 5.7 und Abb. 5.8 zeigen den Messaufbau, mit dem die Ultraschallmessungen der maximalen Echoamplituden an Flachbodenbohrungen (Kreisscheibenreflektoren) als Funktion des Abstands zum Schallaustrittspunkt durchgeführt wurden. Es stand ein Testkörper mit einem Keil im Winkel von 45° aus dem Stahl St 52-2 zur Verfügung (siehe auch technische Zeichnung im Anhang). Entlang der Keilseite sind senkrecht, in definierten Abständen, Flachbodenbohrungen mit einem Durchmesser von 3 mm eingebracht. Die Bohrgründe stellen die kreisförmigen Reflektoren dar. Bei einem Einschallwinkel von 45° werden die Kreisscheibenreflektoren senkrecht getroffen.

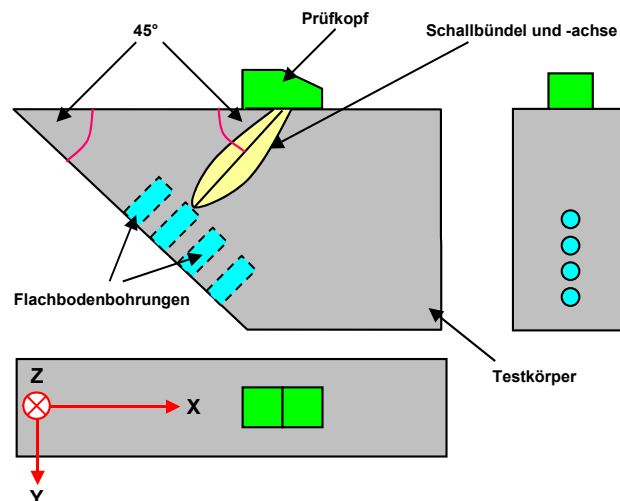


Abb. 5.7 Messaufbau schematisch

Mittels eines Manipulators konnte der Prüfkopf auf der Oberseite des Testkörpers in beiden Richtungen in x (Zeilen) und y (Spalten) verfahren werden. Die Messpunkte wurden zeilenweise abgearbeitet. Alle 0,5 mm in x -Richtung und 1 mm in y -Richtung wurde ein A-Bild aufgezeichnet. Als Koppelmedium zwischen Prüfkopf und Testkörper diente Wasser, dem einige Tropfen handelsüblichen Geschirrspülmittels beigegeben wurden, um die Benetzung zu verbessern.

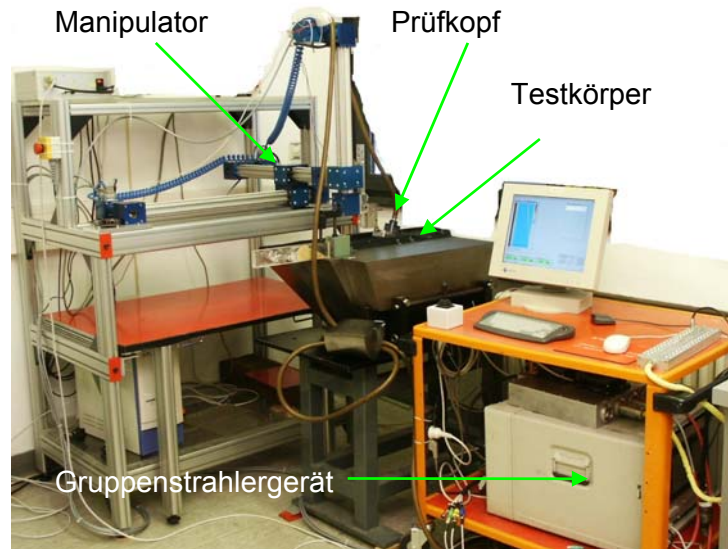


Abb. 5.8 Messaufbau

Die Daten sind mit der Software „UT-View“ Version 5.9.13.1 der BAM wie folgt ausgewertet worden: zunächst wurden zweidimensionale Amplitudendarstellungen mit Farbcodierung in der Ebene der Bohrgründe erstellt (Abb. 5.9). Aus diesen Darstellungen wurde die Spalte (y -Koordinate) und die Zeile (x -Koordinate) der maximalen Echoamplituden der Bohrgründe lokalisiert. In dieser Zeile wurde anschließend die Echodynamik betrachtet und das A-Bild (Abb. 5.10) mit der maximalen Echoamplitude bestimmt.

Des Weiteren sind die Rückwandeckkurven einiger Messreihen ausgewertet worden. In bestimmten Abständen wurden in einer Spur (y -Koordinate) die Echoamplituden der Rückwandeckchos in Abhängigkeit vom Schallweg bestimmt. Die Messpunkte wurden zwischen den Orten der Flachbodenbohrungen gesetzt, um deren Einfluss auf das Rückwandeckcho zu verringern. Dort waren die Rückwandeckchoamplituden in der Regel maximal.

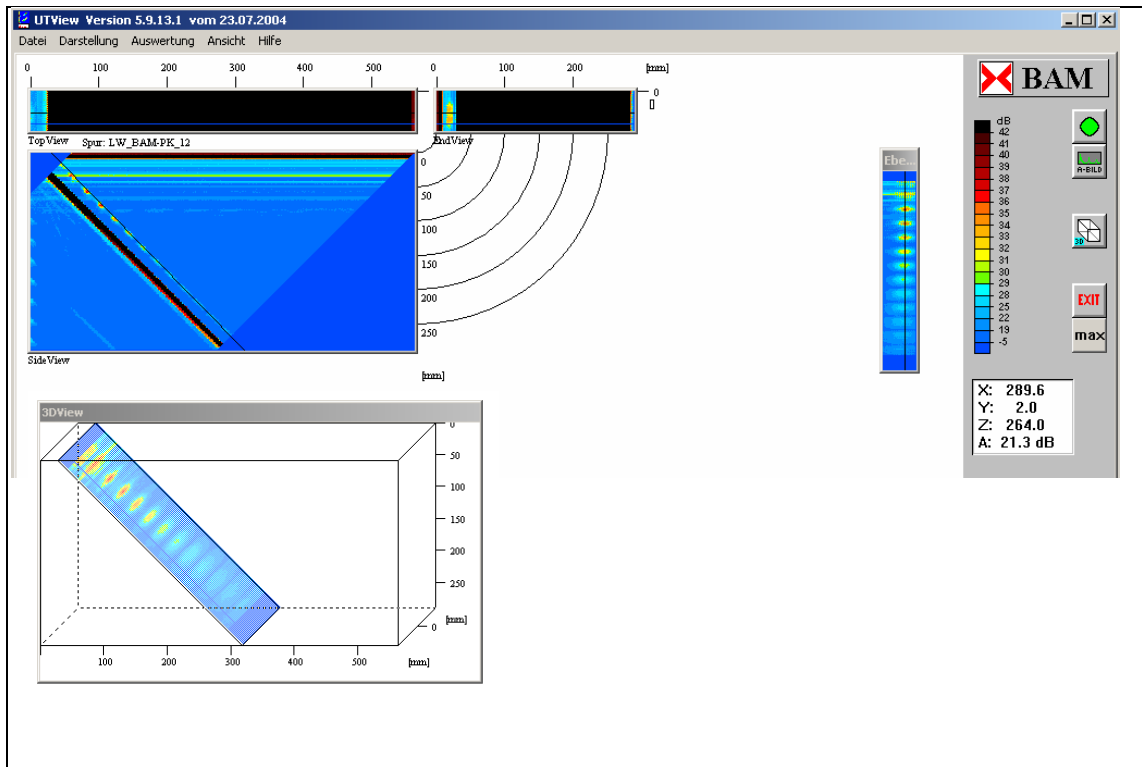


Abb. 5.9 Beispiel einer Amplitudenverteilungen mit Farbcodierung in der Ebene der Bohrgründe

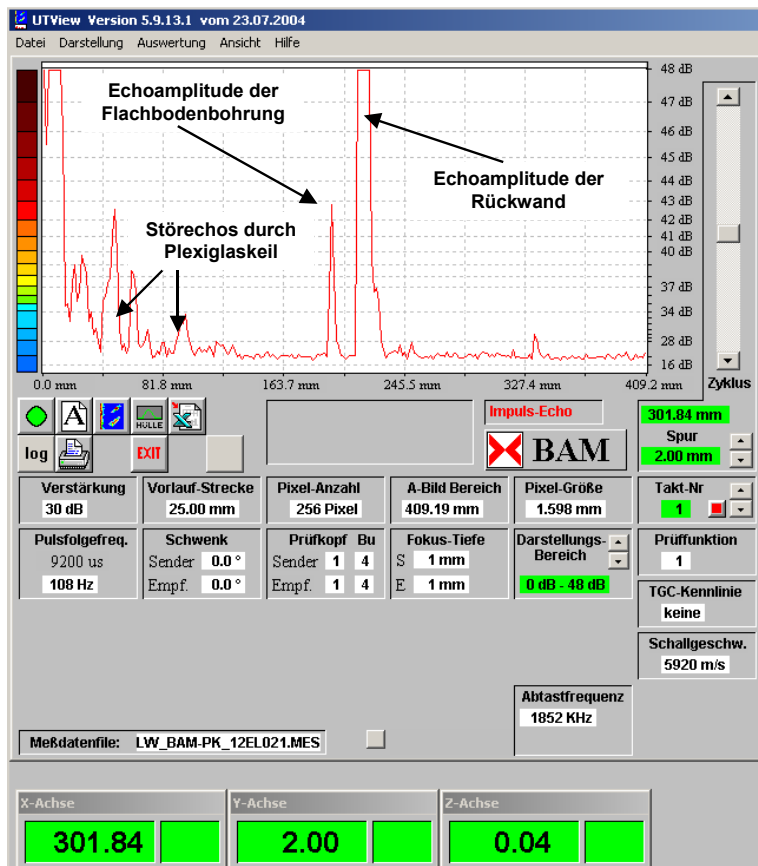


Abb. 5.10 Beispiel eines A-Bildes

Der Abstand r zum Kreisscheibenreflektor ist gleich dem Schallweg s entlang der Schallbündelachse und errechnete sich aus der halben Schalllaufzeit des Impulses innerhalb des Testkörpers $t/2$ und der spezifischen Schallgeschwindigkeit des Testkörpers $c_{T,TK}$ für Transversal- und $c_{L,TK}$ für Longitudinalwellen. Es gilt:

$$s = \frac{c_{T,TK} t}{2} \text{ für Transversalwellen} \quad (21)$$

$$s = \frac{c_{L,TK} t}{2} \text{ für Longitudinalwellen} \quad (22)$$

wobei $c_{T,TK} = 3255$ m/s und $c_{L,TK} = 5920$ m/s.

Des Weiteren ist bei der Auswertung die Schallschwächung berücksichtigt worden. Von einer exponentiellen Schallschwächungsfunktion ausgehend, ergeben sich für Longitudinal- und Transversalwellen unterschiedliche Schwächungskoeffizienten ρ . Die Schallschwächungskoeffizienten wurden durch Anpassen der Messergebnisse an die Werte der Modellrechnung (ohne Schallschwächung gerechnet) empirisch ermittelt. Es folgt für den Schallweg s :

$$s = \frac{c_{T,TK} t}{2} \exp\left(\frac{-\rho_{T,TK} c_{T,TK} t}{2}\right) \text{ für Transversalwellen} \quad (23)$$

$$s = \frac{c_{L,TK} t}{2} \exp\left(\frac{-\rho_{L,TK} c_{L,TK} t}{2}\right) \text{ für Longitudinalwellen} \quad (24)$$

wobei $\rho_{L,TK} = 0,9$ dB/m und $\rho_{T,TK} = 17$ dB/m.

Die Ultraschallmessungen wurden in Anlehnung an die DIN-EN 583-2 mit den Einschwinger-Prüfköpfen 04•32/ 16•32/ 32•32 mm² und mit Hilfe der Linear-Arrays durchgeführt. Jedoch waren nur die Ergebnisse der Messungen des 16•32 mm² Einschwingers und des BAM-Linear-Arrays auswertbar. Die Prüfköpfe sind in Kapitel 5.3 beschrieben.

Für die Reproduzierbarkeit der Messpunkte kann ein Fehlerbereich von ± 2 dB angenommen werden, in dem Gerätefehler, Ankoppelfehler und Ähnliches zusammengefasst sind.

5.5 Manuelle Ultraschallmessung an querstehenden Zylinderbohrungen

Abb. 5.11 und Abb. 5.12 zeigen den Messaufbau, an dem die manuellen Ultraschallmessungen der maximalen Echoamplituden von querliegenden Zylinderbohrungen (Linienreflektoren) durchgeführt wurden. Es wurde derselbe Testkörper wie in Kapitel 5.4 verwendet. Entgegengesetzt der Keilseite sind senkrecht zur Seitenansicht in definierten Abständen Zylinderbohrungen mit einem Durchmesser von 4 mm eingebracht. Der Prüfkopf ist manuell auf der Oberseite des Testkörpers verfahren worden, um bei Einschallung unter einem Winkel von 45° mit dem Schallbündel die querliegenden Zylinderbohrungen senkrecht zu deren Mantelfläche zu treffen. Als Koppelmedium zwischen Prüfkopf und Testkörper diente Feinmechaniköl.

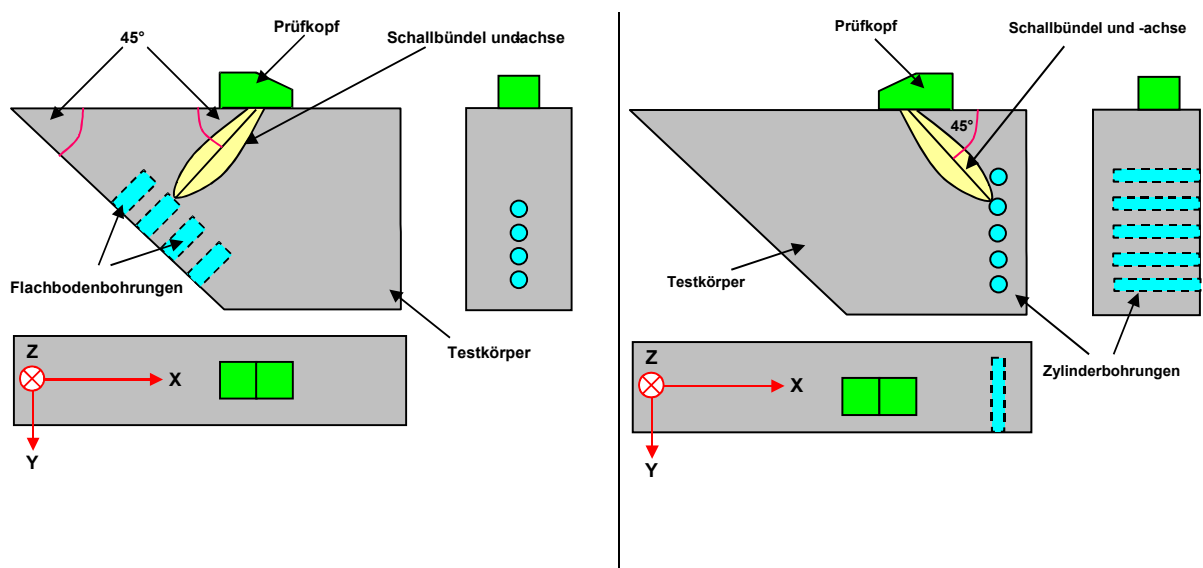


Abb. 5.11 Schematischer Messaufbau, links: Messung von Flachbodenbohrungen, rechts: Messung von querliegenden Zylinderbohrungen

Die Ultraschallmessungen wurden in Anlehnung an die DIN-EN 583-2 mit den Einschwinger-Prüfköpfen 04•32, 16•32, 32•32 mm² für die Einschallung unter 45° von Transversalwellen durchgeführt. Als Ultraschallgerät diente das USM25 der Firma Krautkrämer. Der Schallaustrittspunkt und die Justierung des Schallweges sind am Kalibrierkörper K1 (nach

DIN EN 12223, [DIN00b]) durchgeführt worden. Die nähere Beschreibung der Prüfköpfe befindet sich in Kapitel 5.3.

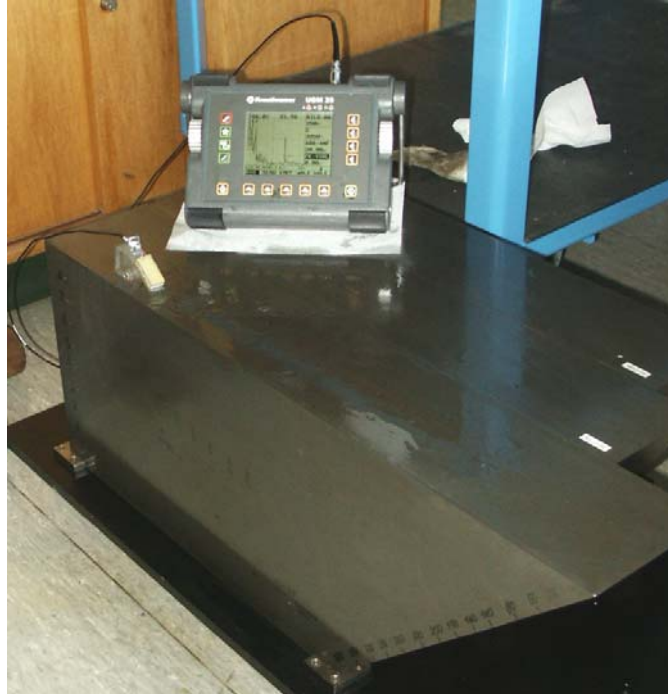


Abb. 5.12: Messaufbau zur Echomessung an querliegenden Zylinderbohrungen

Es ist die Geräteverstärkung der maximalen Echoamplitude bei 80% der Bildschirmhöhe (BSH) jeweils einer Zylinderbohrung bei einem Schallweg von 180 und 220 mm gemessen worden. Aus beiden Verstärkungen wurde der Mittelwert bestimmt und der Verstärkung des Echos einer Zylinderbohrung bei einem Schallweg von 200 mm zugeordnet. Anschließend ist mit dem selben Prüfkopf an der entgegengesetzten Seite des Testkörpers eine Flachbodenbohrung mit einem Durchmesser von 3 mm bei einem Schallweg von 200 mm senkrecht angeschallt worden. Es wurde die Verstärkung bei 80% Bildschirmhöhe des maximalen Echos gemessen.

Nach Formel (19), Kapitel 4.1, aus der DIN-EN 583-2 wurde der Zusammenhang der Echoamplituden von Zylinderbohrungen und Flachbodenbohrungen hergestellt. Die Echoamplitude einer querliegenden Zylinderbohrung mit einem Durchmesser D_{ZYL} von 4,0 mm entspricht der Echoamplitude einer Flachbodenbohrung (Kreisscheibenreflektor) mit einem Durchmesser D_{KSR} von 5,0 mm bei gleichem Schallweg s von 200 mm, siehe (25).

$$D_{KSR} = \sqrt{\frac{\sqrt{2}}{\pi} 1,973 \sqrt{4 \cdot 200}} = 5,01 \text{ mm} \quad \text{mit} \quad \lambda = \frac{3255 \text{ m}}{1650 \text{ s kHz}} = 1,973 \text{ mm} \quad (25)$$

Der Unterschied der Echoamplituden eines Kreisscheibenreflektors mit einem Durchmesser von 5 mm zu einem mit 3 mm ist nach Tab. 4.1 (Formel Kreisscheibenreflektor) berechnet worden. Aus dieser Formel geht hervor, dass die Echoamplitude proportional zum Quadrat des Durchmessers der Kreisscheibe ist. Es resultiert ein Echoamplituden- bzw. Verstärkungsunterschied $V_{5 \rightarrow 3}$ von 8,9 dB.

$$V_{5 \rightarrow 3} = 20 \log \left(\frac{5,0^2}{3,0^2} \right) = 8,9 \text{ dB} \quad (26)$$

Unter Berücksichtigung dieses Unterschieds konnten die gemessenen Verstärkungen der Echos von Zylinderbohrung ($V_{ZYL \ 4mm}$) und Flachbodenbohrung ($V_{FBB \ 3mm}$) miteinander verglichen werden:

$$V_{ZYL \ 4mm} + \Delta + 8,9 = V_{FBB \ 3mm} \quad \text{in [dB]} \quad (27)$$

Das Delta Δ steht für die Abweichung der Echoamplituden der Flachbodenbohrung zu der amplitudenäquivalenten querstehenden Zylinderbohrung.

Bei der manuellen Ultraschallmessung kann für die Reproduzierbarkeit der Messpunkte ein Fehlerbereich von +/- 1 dB angenommen werden, in dem Gerätefehler, Ankoppelfehler und Ähnliches zusammengefasst sind.

5.6 Automatisierte Ultraschallmessung an Reflektoren in Wasser

Es sind zweidimensionale Echofelder am Kreisscheibenreflektor (KSR) von 3 mm und am Linienreflektor mit einem Durchmesser von 6 mm in Wasser gemessen worden. Dafür wurde das Linear-Array von Siemens ohne Plexiglaskeil und unter gleichzeitiger Anregung von 16

Schwingerelementen verwendet. Gleiche Messungen mit dem BAM-Linear-Array konnten aus Zeit- und Verfügungsgründen der Tauchtechnik nicht durchgeführt werden.

Das Gruppenstrahlergerät diente allein dem Betrieb des Linear-Arrays. Die Steuerung des Manipulators sowie die Registrierung der Echoamplituden erfolgten durch einen externen PC. Der Messaufbau wird in Abb. 5.13 und Abb. 5.14 vorgestellt.

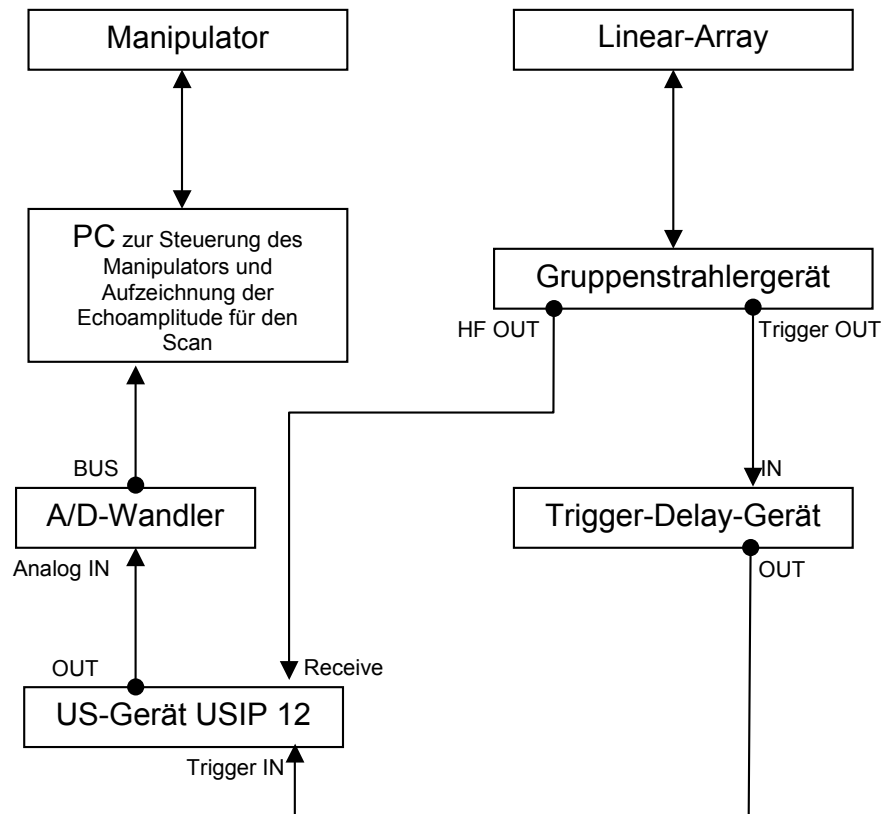


Abb. 5.13 Schematischer Messaufbau Tauchtechnik

Das analoge HF-Signal des Gruppenstrahlergerätes wurde dem Ultraschallgerät USIP12 der Firma Krautkrämer, welches im Empfangsmodus arbeitete, zugeführt. Das Signal der maximalen Echoamplitude gelangte über einen Analog-Digital-Wandler vom USIP12 an einen PC, der den Manipulator steuerte und die Echoamplitude dem Ort des Messpunktes zuordnete. Die Registrierung der maximalen Echoamplitude erfolgte im USIP 12 durch das Setzen eines Fensters (Gate) über die Laufzeit des Echos. Das Fenster konnte nicht über den gesamten A-Bildbereich ausgedehnt werden, da das Echo des KSR/ Linienreflektors vom Rückwandecho getrennt werden musste. Der Zeitpunkt der Impulserregung im

Gruppenstrahler wurde durch den Trigger OUT über ein Trigger-Delay-Gerät an das USIP12 weitergegeben. Dadurch stimmten die A-Bilder in beiden Ultraschallgeräten überein.

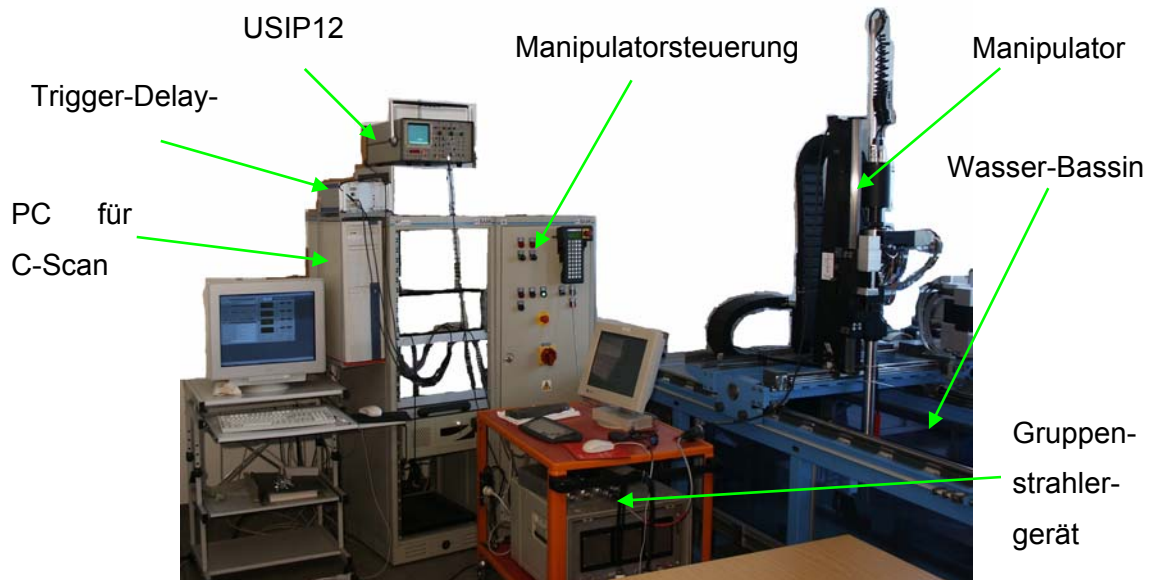


Abb. 5.14 Messaufbau Tauchtechnik

Bei Bedarf ist mit dem Trigger-Delay-Gerät das Trigger-Signal des Gruppenstrahlergerätes verzögert worden, wodurch sich der A-Bild-Anfang im USIP12 hin zu längeren Zeiten verschob. Die Verzögerung wurde notwendig bei Scans, bei denen sich der Abstand zum Reflektor kontinuierlich vergrößerte, welches ein Verschieben des Echosignals hin zu längeren Zeiten zur Folge hatte. Um das Echosignal über dem Fenster zu halten, wurde zunächst mit dem USIP12 das Fenster manuell verschoben bis der A-Bildbereich ausgeschöpft war und im Anschluss mit dem Trigger-Delay-Gerät durch Verzögerung des Triggersignals.

Als Kreisscheibenreflektor diente die Grundfläche eines Metalldrahtes mit einem Durchmesser von 3 mm. Die Rotationsachse des Kreisscheibenreflektors war horizontal angeordnet in ca. der halben Höhe des mit Wasser gefüllten Bassins. Die Schallbündelachse des Prüfkopfes sowie die Rotationsachse des Kreisscheibenreflektors waren parallel zur x-Achse im Manipulator-Koordinatensystem. In verschiedenen Abständen zum KSR sind zweidimensionale Amplitudendarstellungen mit Farbcodierung in der y-z-Ebene aufgenommen worden. Alle 0,5 mm in y-Richtung und 0,5 mm in z-Richtung wurde die maximale Echoamplitude des Reflektors registriert.

Als Linienreflektor diente die zylindrische Mantelfläche eines Metallstabes mit Durchmesser von 6 mm, dessen Rotationsachse horizontal oder vertikal angeordnet werden konnte, siehe Abb. 5.15. Im Manipulatorkoordinatensystem ist die horizontale Anordnung parallel der y -Achse, die vertikale parallel der z -Achse und die Schallbündelachse des Prüfkopfes parallel der x -Achse. Der Scan wurde in der x - z -Ebene bei horizontaler Anordnung des Stabes und in der x - y -Ebene bei vertikaler Anordnung durchgeführt. Alle 1 mm in x -Richtung und 1 mm in z - bzw. y -Richtung wurde die maximale Echoamplitude registriert.

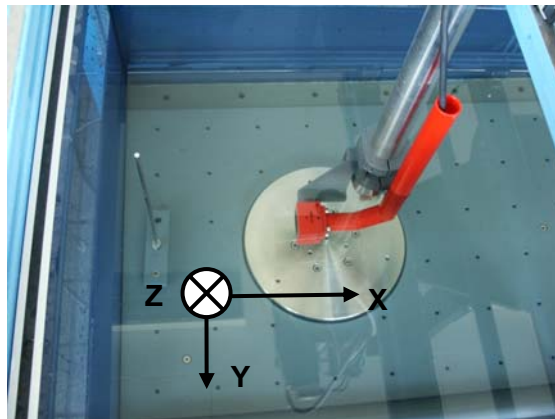


Abb. 5.15 Linear-Array mit vertikalen Metallstab im Wasser-Bassin

Diese Amplitudendarstellungen sind mit der Auswerte-Software „viewMDI“, Version 1.0 erstellt worden. In der Darstellung wurde zwischen den diskreten Messwerten interpoliert.

5.7 Computermodellierung

Die Modellrechnungen sind an Personalcomputern mit CPUs Pentium III 1 GHz und Pentium IV 1,8 GHz durchgeführt worden. Für die Berechnungen von Schallfeldern, des Schalldrucks auf der Schallbündelachse sowie der Richtcharakteristiken wurde das Programm „Array3D25“ der BAM, für die Echobetrachtungen die Programme „Echo3D06“ und ein A-Bild-Programm der BAM verwendet.

Für alle Berechnungen sind die Versuchsparameter und Prüfkopfdaten der Messungen verwendet worden. Die Darstellung der Ergebnisse erfolgte in graphischen Modulen der BAM-Software oder in MS Excel®.

6 Ergebnisse und Diskussion

6.1 Charakterisierung der Prüfköpfe

6.1.1 Linear-Arrays: Richtcharakteristiken der einzeln angeregten Elemente

Abb. 6.1 zeigt Richtcharakteristiken in zwei Ebenen für eine Auswahl von Schwingerelementen des BAM-Linear-Arrays bei Senkrechteinschallung in Stahl.

Es ist deutlich der Einfluss der geometrisch bedingten Richtwirkung erkennbar. In horizontaler Anordnung des Schwingerelementes ist die Seite b ($a < b$) parallel zur Ebene der Richtcharakteristik. Die relative Amplitude der Messungen weist um 0° ein Maximum auf. Die Verteilung hat eine Halbwertsbreite von ca. 10° und liegt bei $\pm 5^\circ$ um das Maximum. Für alle Schwingerelemente in horizontaler Anordnung stimmen die Modellrechnungen sehr gut mit den Messungen überein. Die Messungen weisen zusätzlich ein Nebenmaximum bei ca. -3° auf, dessen Ursache womöglich auf die durch die Kontaktierung bedingte Unsymmetrie der Elementanregung zurückzuführen ist, (welche durch den Einfluss der Lötanschlüsse bei den relativ schmalen Elementen zustande kommen kann).

Bei vertikaler Anordnung des Schwingerelementes ist die Seite a parallel zur Ebene der Richtcharakteristik. Die gemessene Verteilung der relativen Amplitude umspannt bis zur halben Amplitudenhöhe einen Winkelbereich von ca. 60° , bei $\pm 30^\circ$ um das Maximum liegend, und ist damit sechsfach größer als bei horizontaler Anordnung des Schwingerelementes. Die Breite der gemessenen Richtcharakteristik ist etwas schmaler als die der Modellrechnungen. Der Grund dafür liegt im unvermeidlichen, sogenannten akustischen und elektrischen „Übersprechen“ oder „cross talk“ zwischen den einzelnen Elementen, welches zu einer etwas größeren effektiven Schwingerbreite und folglich zu einer schmaleren Richtcharakteristik führt. Des Weiteren fällt bei vertikaler Anordnung aller Schwingerelemente auf, dass bei ca. 0° die Messergebnisse einen starken Anstieg bzw. Einbruch der relativen Amplitude aufweisen, welches ebenfalls auf das Übersprechen zurückzuführen ist. Im Falle des Elementes Nr. 2 beträgt der Unterschied der Amplitude bei 0° ca. 60% im Vergleich zur Modellrechnung (siehe Abb. 6.1 rechts oben).

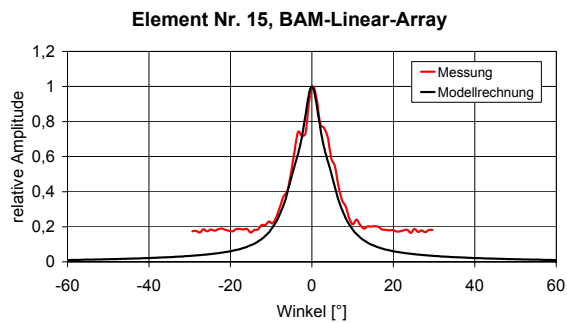
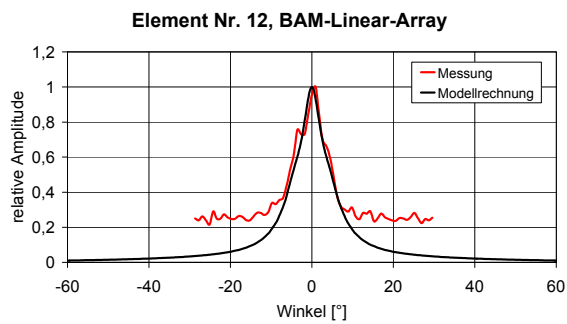
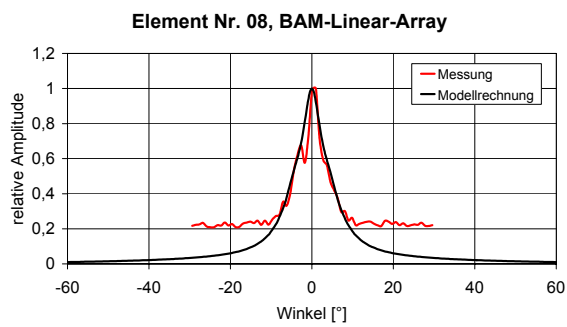
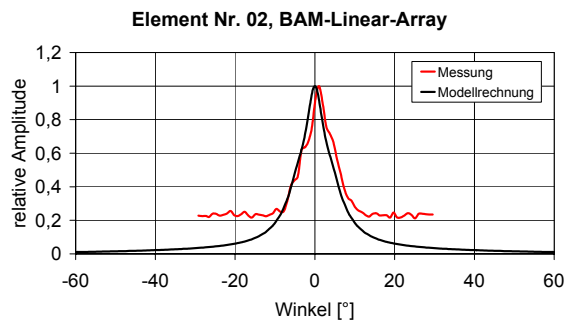
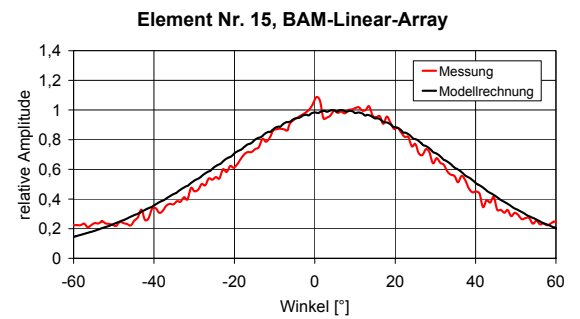
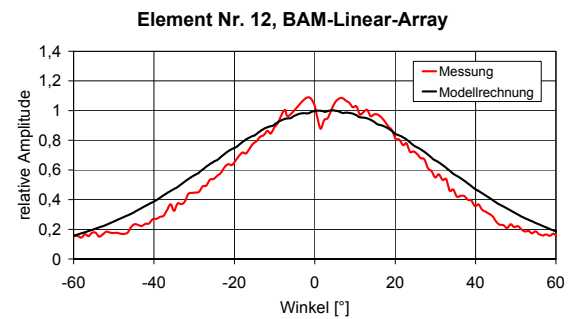
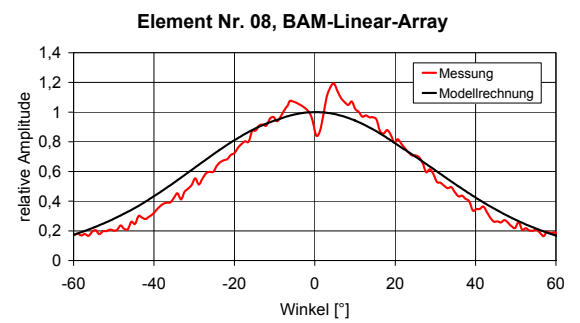
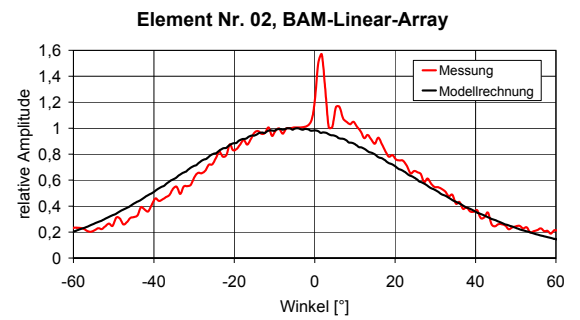
Schwingerelemente horizontal zur Ebene der
RichtcharakteristikSchwingerelemente vertikal zur Ebene der
Richtcharakteristik

Abb. 6.1 Richtcharakteristiken einzelner Schwingerelemente des BAM-Linear-Arrays

Das Übersprechen ist durch die physikalischen Grenzen der elektrischen sowie akustischen Isolation zwischen den Schwingerelementen eines Prüfkopf-Arrays bedingt. Die Ursache ist das elektrische Feld des aktiven Elements innerhalb des Arrays, welches auch auf die inaktiven Nachbarschwinger übertritt und diese, vor allem mit höheren Frequenzen, anregt. Die Nachbarschwinger emittieren phasengleiche/ phasenverkehrte Ultraschallwellen, die bei 0° konstruktiv/ destruktiv interferieren, welches zu einem Anstieg/ Abfall der relativen Amplitude und zu größeren effektiven Schwingerflächen führt (siehe auch [WÜS03]).

Abb. 6.2 zeigt Richtcharakteristiken in zwei Ebenen für eine Auswahl von Schwingerelementen des Siemens-Linear-Arrays bei Senkrechteinschallung in Stahl.

Auch hier sind im Prinzip die Einflüsse der geometrischen Richtwirkung offensichtlich. Jedoch weisen die gemessenen Richtcharakteristiken starke Abweichungen zu den Modellrechnungen und den bereits vorgestellten Ergebnissen des geometriegleichen BAM-Linear-Arrays in Abb. 6.1 auf. Des Weiteren unterscheiden sich die Messergebnisse der Schwingerelemente untereinander gravierend.

Bei horizontaler Anordnung der Schwingerelemente zur Ebene der Richtcharakteristik stimmen die Messungen der Elemente Nr. 2 und Nr. 15 noch gut mit den Modellrechnungen überein, während die Elemente Nr.8 und 12 mehrere ausgeprägte Maxima aufweisen.

In vertikaler Anordnung der Schwingerelemente zeigen die gemessenen Richtcharakteristiken aller Elemente einen starken Anstieg bei ca. 0° bei den Randelementen und einen Einbruch bei den mittleren Elementen, welches auf das Übersprechen zurückzuführen ist. Die Verläufe sind, wie beim BAM-Array, ebenfalls etwas schmaler als die der Modellrechnungen.

Es liegt die Vermutung nahe, dass die Randelemente voll funktionstüchtig sind, und die mittleren Elemente durch schlechte Massezuführungen erheblich schwächer angeregt werden. Die Ungereimtheiten beim Siemens-Array führten dazu, dass alle Messungen mit diesen Kopf nicht zur Auswertung herangezogen werden konnten.

Es sei darauf hingewiesen, dass sich, durch die Ausrichtung der Array-Mitte auf die Mittelachse des Halbzylinders, die Schwerpunkte der Messkurven der Randelemente von BAM- und Siemens-Array im Vergleich zu den mittleren Elementen nach links bzw. rechts verschieben. Außerdem wurden die Messkurven einzeln normiert, so dass die Amplitudenunterschiede der einzelnen Elemente untereinander nicht erkennbar sind. Sie sind jedoch erheblich.

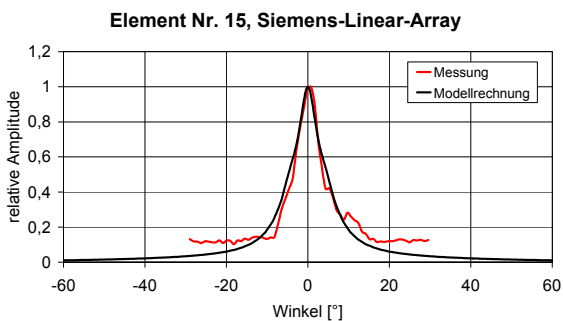
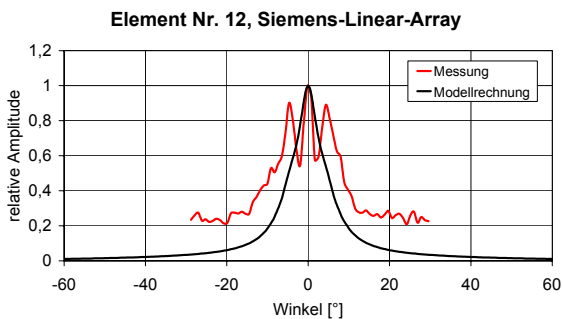
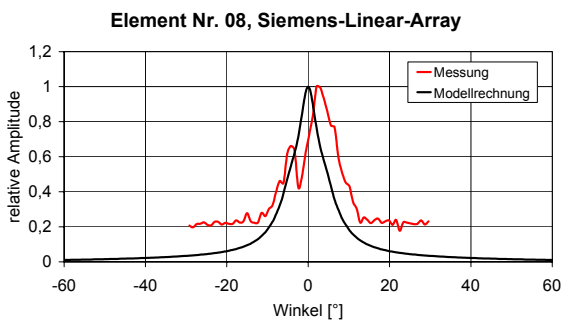
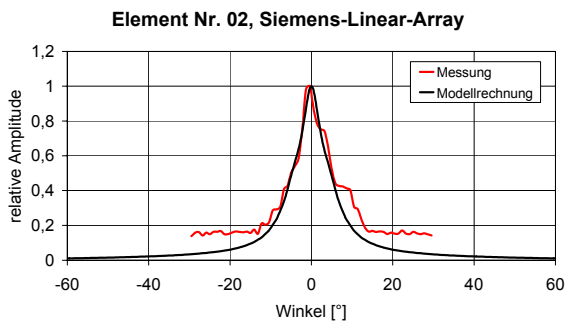
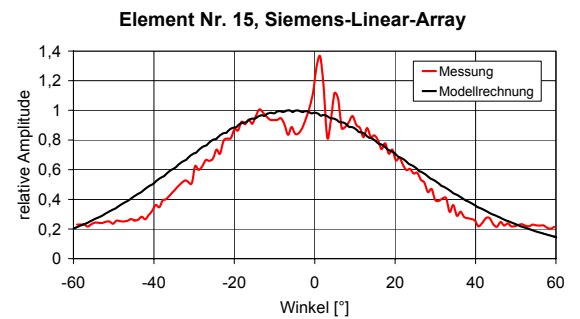
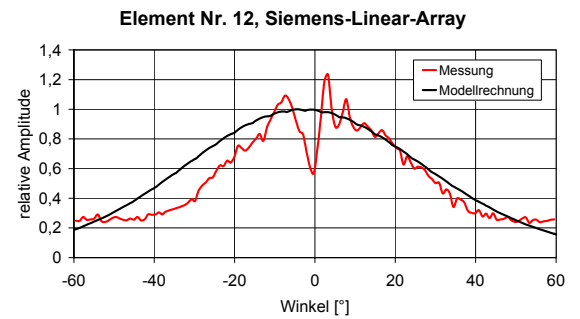
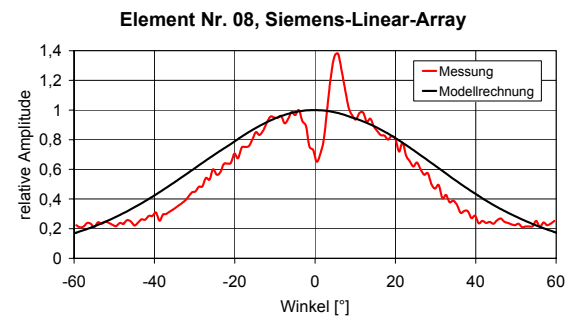
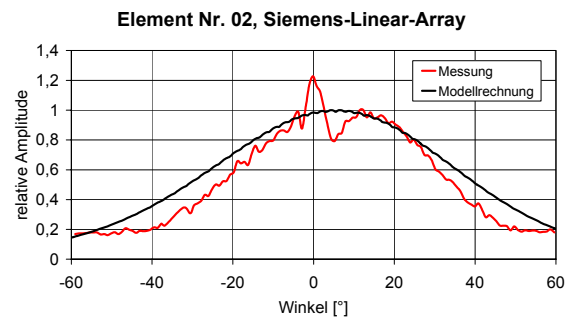
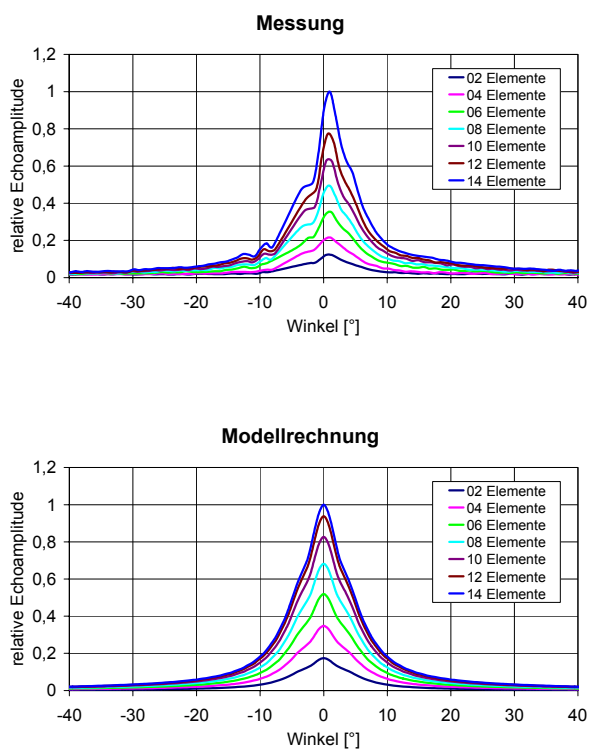
Schwingerelemente horizontal zur Ebene der
RichtcharakteristikSchwingerelemente vertikal zur Ebene der
Richtcharakteristik

Abb. 6.2 Richtcharakteristiken einzelner Schwingerelemente des Siemens-Linear-Arrays

6.1.2 Linear-Arrays: Richtcharakteristiken bei zeitgleicher Anregung der Elemente

In Abb. 6.3 liegen die Richtcharakteristiken in zwei Ebenen für die gleichzeitige Anregung von 2, 4, ..., 14 Elementen des BAM-Linear-Arrays bei Senkrechteinschallung in Stahl vor. Da Element 1 des BAM-Linear-Arrays nicht ansteuerbar war, ist aus Gründen der Symmetrie, eine Gruppe von maximal 14 Elementen angeregt worden.

Schwingerelemente horizontal zur Ebene der
Richtcharakteristik



Schwingerelemente vertikal zur Ebene der
Richtcharakteristik

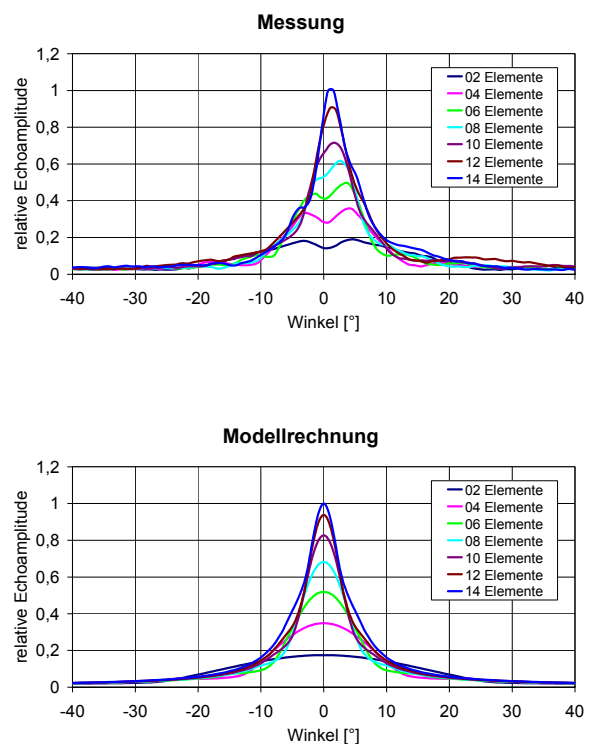


Abb. 6.3 Richtcharakteristiken der Elementgruppen des BAM-Linear-Arrays bei Senkrechteinschallung

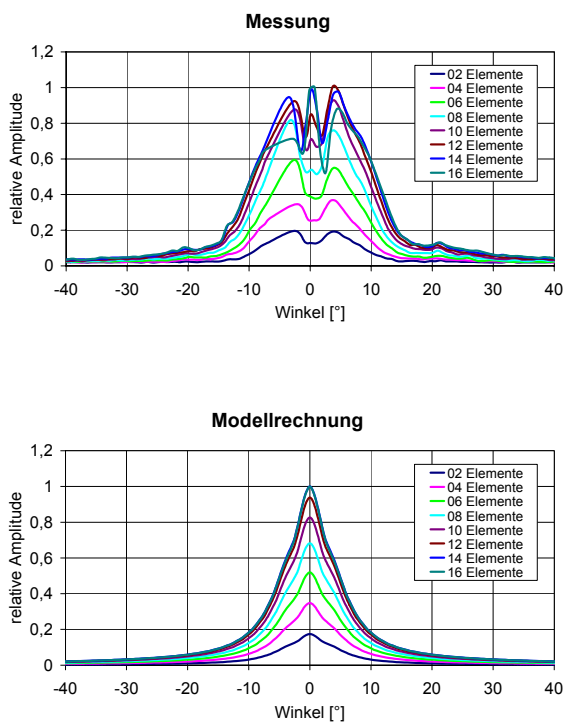
Erwartungsgemäß sind auch hier die Einflüsse der geometrischen Richtwirkung sichtbar. In horizontaler Anordnung der Schwingerelemente zur Ebene der Richtcharakteristik bleibt die Seitenlänge b des Rechteckschwingers konstant über alle zugeschalteten Elemente. Folglich bleibt der Amplitudenverlauf der Richtcharakteristik gleich und ändert sich nur relativ zur Anzahl der zugeschalteten Elemente, mit Ab- oder Zunahme der strahlenden Fläche. Die Maxima der Messergebnisse sind von denen der Modellrechnung um ca. 1° verschoben, welches durch die Ausrichtung des Arrays am Messaufbau der Richtcharakteristik bedingt

ist. Zudem sind die Verläufe der Messungen nicht symmetrisch, bezogen auf eine senkrechte Achse im Maximum. Diese Asymmetrie ist vergleichbar mit den Nebenmaxima der einzelnen Elemente und vermutlich auf die nicht uniforme Auslenkung der Piezo-Keramik rückführbar.

Bei vertikaler Anordnung der Schwingerelemente ist die Seite a parallel zur Ebene der Richtcharakteristik. Die Seite a verlängert sich mit Zuschalten der Elemente. Mit größer werdenden a werden die Richtcharakteristiken schmäler und die relativen Amplituden nehmen zu. Auch hier sind die Messergebnisse um ca. 1° verschoben, bedingt durch den Messaufbau. Außerdem weisen die Messungen bei Ansteuerung von 2 bis 10 Elementen einen Einbruch im Verlauf bei 0° auf, welches auf ein Übersprechen hinweist. Der Einfluss des Übersprechens nimmt ab, je weniger Elemente inaktiv sind.

In Abb. 6.4 sind die Richtcharakteristiken in zwei Ebenen für die gleichzeitige Anregung von 2, 4, ..., 16 Elementen des Siemens-Linear-Arrays dargestellt.

Schwingererelemente horizontal zur Ebene der
Richtcharakteristik



Schwingererelemente vertikal zur Ebene der
Richtcharakteristik

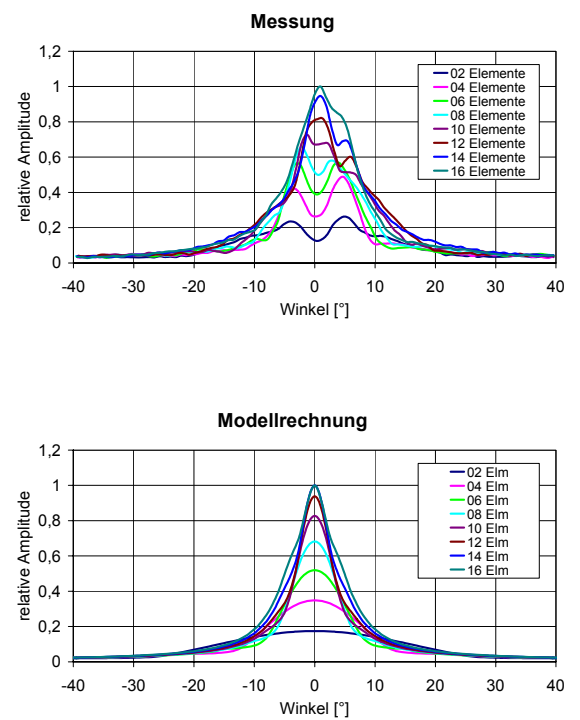


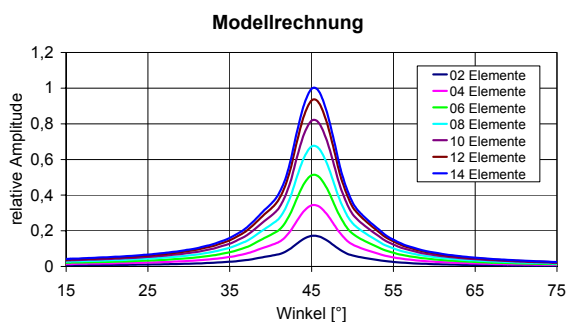
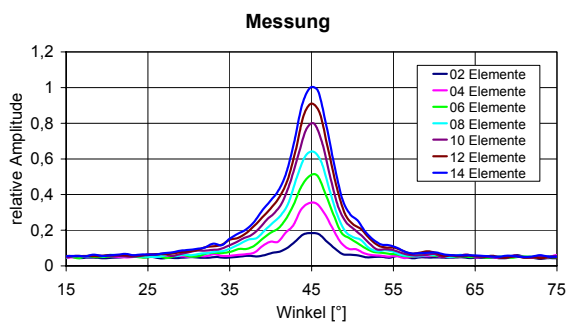
Abb. 6.4 Richtcharakteristiken der Elementgruppen des Siemens-Linear-Arrays bei Senkrechteinschallung

Im Vergleich mit den Messergebnissen des BAM-Linear-Arrays sowie den Modellrechnungen sind bei den Messergebnissen des Siemens-Linear-Array erhebliche Abweichungen festzustellen. Bei horizontaler Anordnung der Elemente wird mit zunehmender Elementanzahl die Ausprägung von zunächst zwei, dann drei ausgeprägten Maxima deutlich. Die beiden Nebenmaxima bei Anregung von 12, 14 und 16 Elementen befinden sich jeweils um ca. 4° vom Hauptmaximum entfernt, ausgehend von der Mittelachse des Halbzylinders des Richtcharakteristikmessplatzes. Wie bereits an den Richtcharakteristiken der einzelnen Schwingerelemente wird auch hier deutlich, dass das Siemens-Linear-Array defekt ist und nicht für die Echohöhenbewertung verwendet werden kann.

6.1.3 Winkel-Prüfköpfe und Linear-Array mit Plexiglaskeil

In Abb. 6.5 sind die Richtcharakteristiken in zwei Ebenen des BAM-Linear-Arrays mit Plexiglaskeil für die Einschallung unter 45° von Longitudinalwellen in Stahl dargestellt.

Schwingerelemente horizontal zur Ebene der Richtcharakteristik bzw. parallel der Einschallebene



Schwingerelemente vertikal zur Ebene der Richtcharakteristik bzw. senkrecht zur Einschallebene

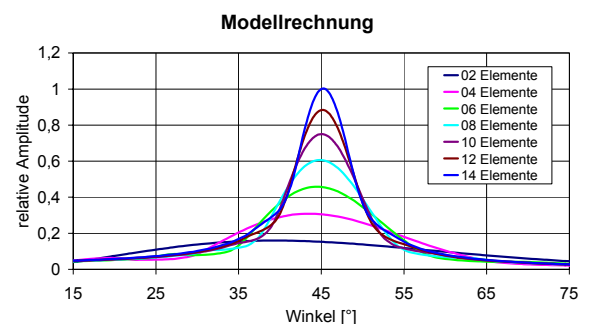
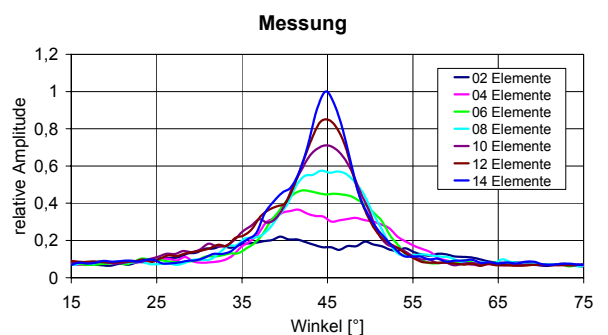


Abb. 6.5 Richtcharakteristiken der Elementgruppen des BAM-Linear-Arrays für die Einschallung unter 45° von Longitudinalwellen in Stahl

Auch bei Einschallung unter 45° treten die Einflüsse der geometrischen Richtwirkung auf Messungen und Modellrechnungen stimmen gut überein. In vertikaler Anordnung der Schwingerelemente zur Ebene der Richtcharakteristik verschieben sich, mit kleiner werdenden Seite a , die Maxima hin zu kleineren Einschallwinkeln, welches durch den zunehmenden Einfluss der Punkttrichtwirkung im Bereich des Schalleintritts bedingt ist. Auch ist der Einfluss des Übersprechens nachweisbar.

Elementgruppen	Schwingererelemente horizontal zur Ebene der Richtcharakteristik		Schwingererelemente vertikal zur Ebene der Richtcharakteristik	
	Halbwertsbreite bei 0° Einschallung [°]	Halbwertsbreite bei 45° Einschallung [°]	Halbwertsbreite bei 0° Einschallung [°]	Halbwertsbreite bei 45° Einschallung [°]
02	9,9	6,6	30,4	51,2
04	9,3	6,6	16,2	28,7
06	9,3	6,6	12,8	22
08	9,3	6,2	10,0	18,3
10	9,3	6,2	8,4	15,3
12	8,7	6,2	7,8	12,8
14	7,0	6,2	7	11,6

Tab. 6.1 BAM-Linear-Array: Bündelbreiten bei Senkrechteinschallung und Einschallung unter 45° von BAM-Linear-Array - Bündelbreiten bei Senkrechteinschallung und Einschallung unter 45° von longitudinalen Wellen

Ein Vergleich der Aufweitung der Schallbündel, quantifiziert mit Hilfe der Halbwertsbreite, zeigt, dass sich die Schallbündel unter Einschallung von 45° im Vergleich zur Senkrechteinschallung bei vertikaler Anordnung der Schwingerelemente verbreitern und bei horizontaler Anordnung verkleinern, siehe Tab. 6.1. Durch Brechung des Schalls zwischen Plexiglaskeil und Probe kommt es zur Verkürzung der Membranseite, die sich parallel zur Einschallebene befindet, siehe auch [WÜS76a]. Deshalb ist bei horizontaler Anordnung der Schwingerelemente, wo sich die Seite b parallel der Einschallebene befindet, das

Schallbündel kleiner. Bei vertikaler Anordnung ist die Aufweitung des Schallbündels im Plexiglaskeil bereits sehr groß, so dass ein Bereich des Bündels unter anderen Einfallswinkeln in die Probe eintritt, wodurch das Bündel noch breiter wird.

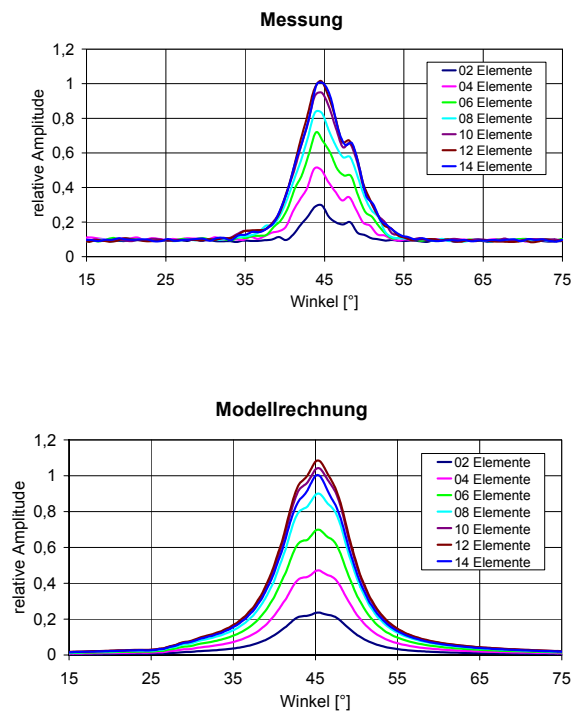
In Tab. 6.2 sind die relativen Halbwertsbreiten der Schallbündel, welche durch Zuschalten der Schwingerelemente entstehen, aufgelistet. Es ist ersichtlich, dass sich die relative Aufweitung der Schallbündel in Abhängigkeit der angeregten Elemente, zwischen Senkrechteinschallung und Einschallung unter 45° , nicht wesentlich unterscheiden. Prinzipiell bleiben die Breiten der Schallbündel bei horizontaler Anordnung der Schwingerelemente konstant und bei vertikaler Anordnung ändern sich die Breiten relativ zueinander mit ähnlichen Faktoren. Damit gelten prinzipiell die gleichen Zusammenhänge zwischen Senkrechteinschallung und Einschallung unter 45° . Die Tabellen Tab. 6.1 und Tab. 6.2 zeigen deutlich den Einfluss extremer Seitenverhältnisse bei Rechteckmembranen. Der Bündelquerschnitt weicht im Fernfeld immer stärker von der Kreisform ab, er wird elliptisch deformiert [WÜS74], [WÜS76a].

Relative Halbwertsbreiten der Richtcharakteristiken der Elemente	Schwingerelemente horizontal zur Ebene der Richtcharakteristik		Schwingerelemente vertikal zur Ebene der Richtcharakteristik	
	Relative Halbwertsbreiten bei 0° Einschallung	Relative Halbwertsbreiten bei 45° Einschallung	Relative Halbwertsbreiten bei 0° Einschallung	Relative Halbwertsbreiten bei 45° Einschallung
14/02	0,70	0,93	0,23	0,23
14/04	0,75	0,93	0,43	0,40
14/06	0,75	0,93	0,55	0,53
14/08	0,75	1,00	0,70	0,63
14/10	0,75	1,00	0,83	0,76
14/12	0,80	1,00	0,90	0,90

Tab. 6.2 BAM-Linear-Array - relative Bündelbreiten bei Senkrechteinschallung und Einschallung unter 45° von longitudinalen Wellen

Abb. 6.6 zeigt Richtcharakteristiken in zwei Ebenen des BAM-Linear-Arrays mit Plexiglaskeil für die Einschallung unter 45° von Transversalwellen in Stahl.

Schwingerelemente horizontal zur Ebene der Richtcharakteristik bzw. parallel der Einschallebene



Schwingerelemente vertikal zur Ebene der Richtcharakteristik bzw. senkrecht zur Einschallebene

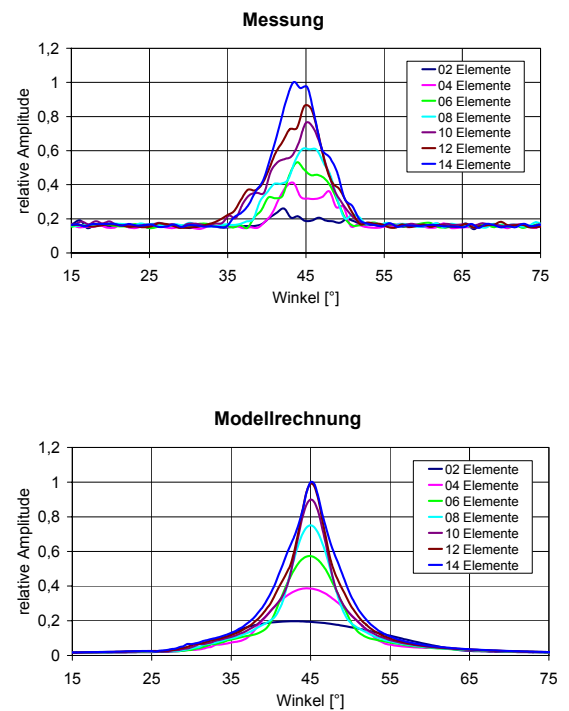


Abb. 6.6 Richtcharakteristiken der Elementgruppen des BAM-Linear-Arrays für die Einschallung unter 45° von Transversalwellen in Stahl

Auch bei Transversalwellen ist der Einfluss der geometrischen Richtwirkung erkennbar, welches in Tab. 6.3 quantitativ bestätigt wird. Bei horizontaler Anordnung der Elemente zur Ebene der Richtcharakteristik sind die Hauptmaxima um ca. 1° nach links verschoben, welches durch die Ausrichtung des Arrays am Messplatz bedingt ist. Ein Nebenmaximum befindet sich im Unterschied zur Einschallung longitudinaler Wellen bei einem Winkel größer 45° (siehe Abb. 6.3 und Abb. 6.5), welches durch eine spiegelverkehrte Anordnung der Elemente bedingt ist. Bei vertikaler Anordnung der Elemente weichen die Messungen stärker von den Modellrechnungen ab. Die Kurve mit 2 Elementen kann nicht ausgewertet werden, da der Signal-Rauschabstand zu klein ist. Bei kleineren Winkeln treten mehrere Nebenmaxima auf. Eine Betrachtung der Halbwertsbreiten ist nicht möglich, da die Verteilungen nicht glatt und stark asymmetrisch sind.

Elementgruppen	Halbwertsbreite bei 45° Einschallung [°]	
	Schwingerelemente horizontal zur Ebene der Richtcharakteristik	Schwingerelemente vertikal zur Ebene der Richtcharakteristik
02	8,5	-
04	8,2	-
06	8,2	-
08	8,6	-
10	8,6	-
12	8,6	-
14	8,6	-

Tab. 6.3 BAM-Linear-Array: Bündelbreiten bei Senkrechteinschallung und Einschallung unter 45 ° von transversalen Wellen

In Abb. 6.7 liegen die Richtcharakteristiken der Einschwinger-Prüfköpfe für Einschallung unter 45° von Transversalwellen in Stahl vor. Die Seite b ($a < b$) ist bei allen Prüfköpfen konstant und parallel zur Einschallebene sowie zur Ebene der Richtcharakteristik. Im Vergleich zur Modellrechnung sind die Maxima der Messungen der größeren Schwinger zu größeren Einschallwinkeln, beim kleineren Schwinger zu einem kleineren Winkel verschoben. Dieser Effekt ist vermutlich auf herstellungsbedingte Fehler zurückzuführen.

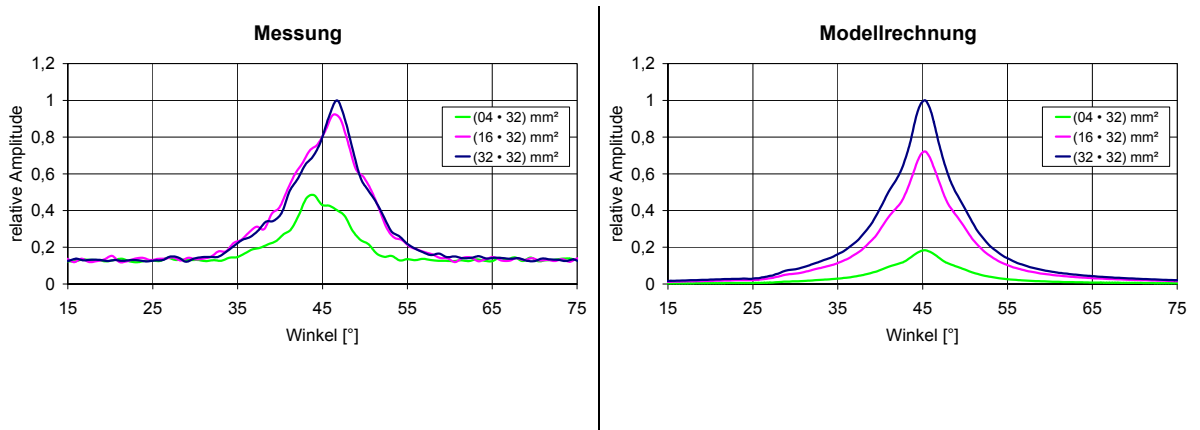


Abb. 6.7 Richtcharakteristiken der Einschwinger-Prüfköpfe für die Einschallung unter 45° von Transversalwellen in Stahl

6.1.4 Schallfelder an Reflektoren in Wasser

In Abb. 6.8 sind farbcodierte Echoamplituden-Bilder eines Kreisscheibenreflektors von 3 mm in Wasser in verschiedenen Abständen senkrecht zur x -Achse des Manipulatorkoordinatensystems dargestellt. Abb. 6.9 zeigt farbcodierte Echoamplituden-Bilder eines Linienreflektors mit Durchmesser 6 mm in der x - y -Ebene und x - z -Ebene. Alle Messungen sind mit dem Siemens-Linear-Array gemessen worden, bei gleichzeitiger Anregung von 16 Schwingerelementen. Die Schwingerelemente sind parallel zur z -Achse angeordnet.

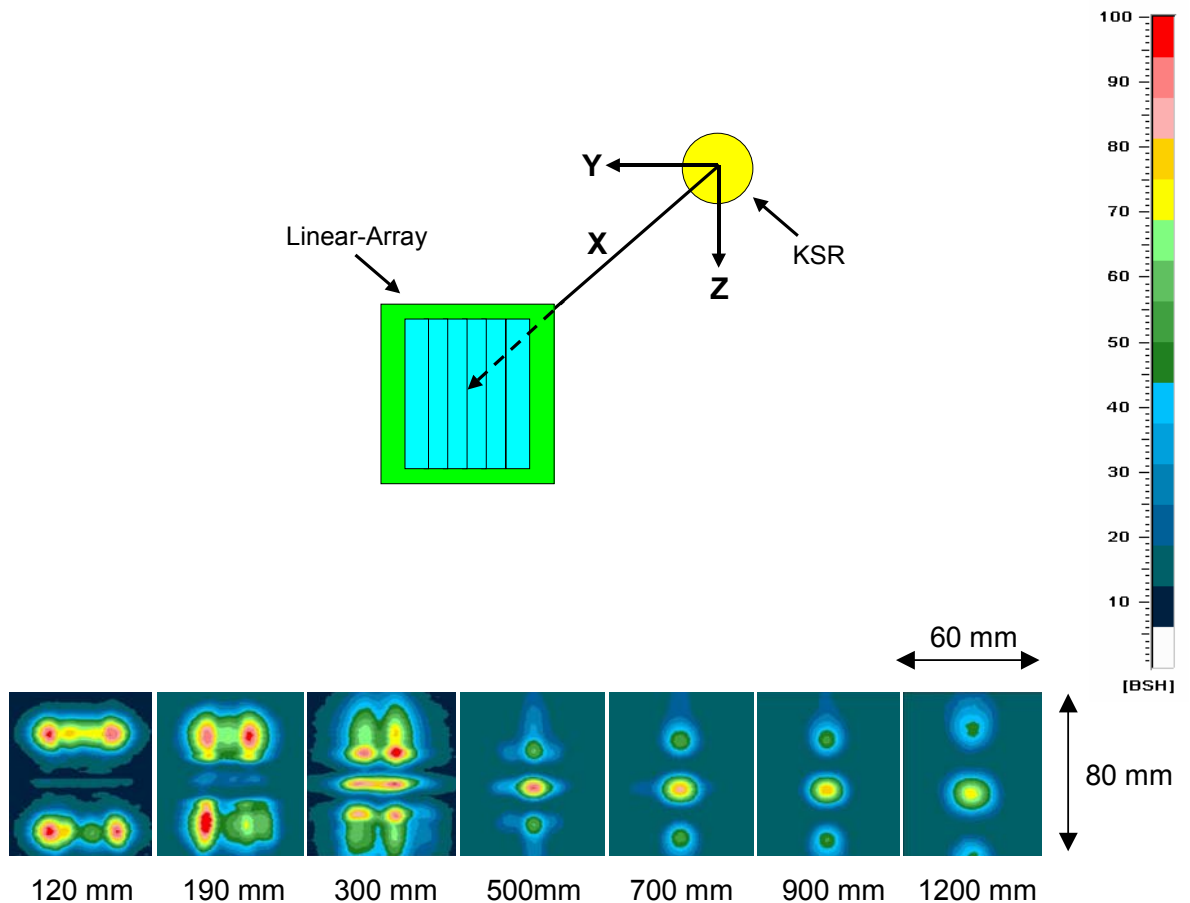


Abb. 6.8 Echoamplituden-Bilder mit Farbcodierung eines KSR3 in Wasser senkrecht zur x-Achse, Siemens-Linear-Array, 16 Elemente (BSH = Bildschirmhöhe)

Im Bereich bis $x = 300$ mm sind typische Nahfeldstrukturen zu erkennen. Das Maximum des Schalldrucks liegt in diesem Bereich nicht auf der Schallbündelachse. Die Mehrfach-Maxima sind aber symmetrisch verteilt. Des Weiteren sind im Fernfeld drei ausgeprägte Schallbündelkeulen zu sehen. Ab 700 mm haben die Maxima der Nebenkeulen einen Abstand zum Maximum der Hauptkeule von ca. $1,5^\circ$. Die Existenz der Schallbündel stimmt mit der Ausprägung von 3 Maxima in der Richtcharakteristik von 16 Elementen (Vgl. Abb. 6.4) überein.

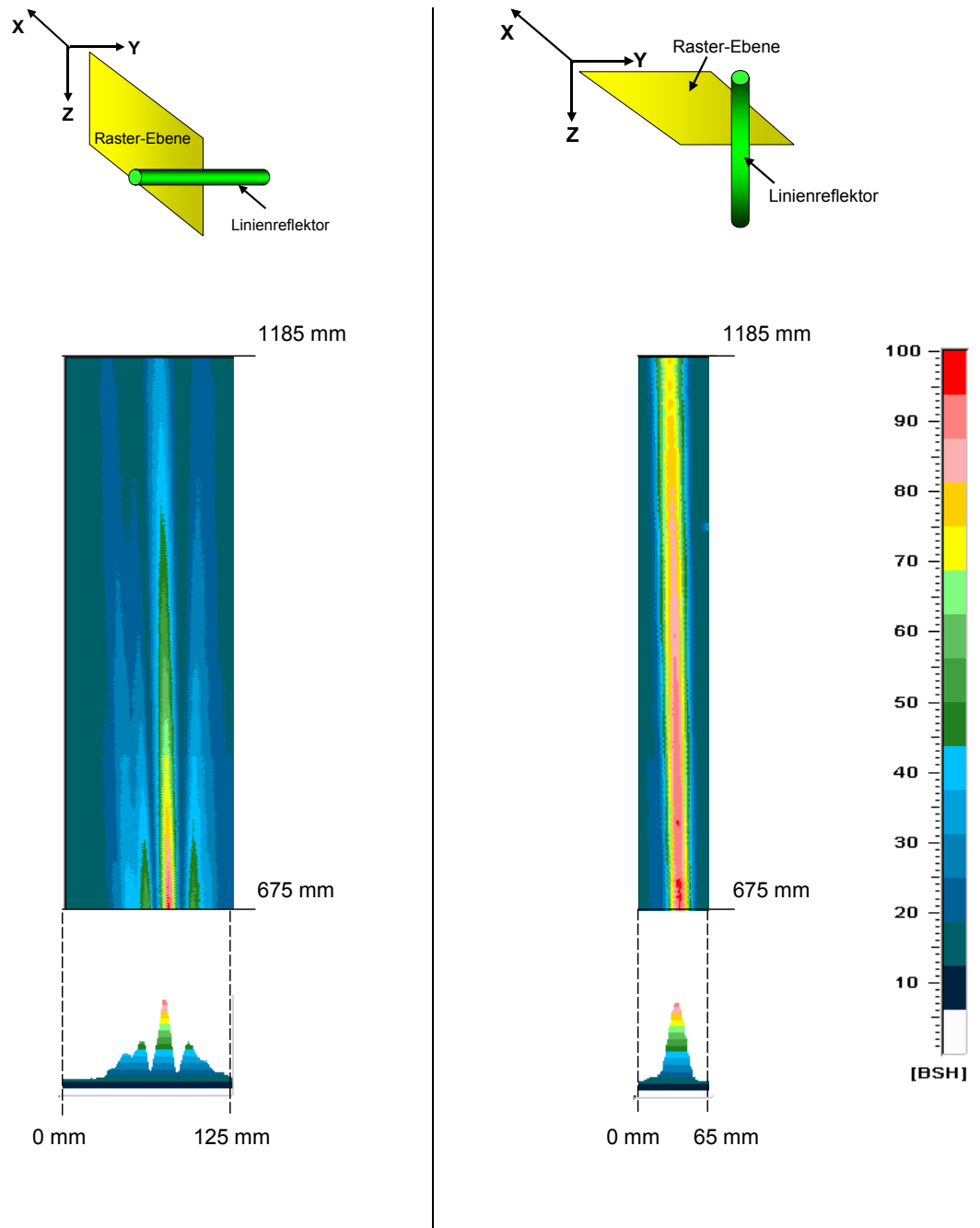


Abb. 6.9 Echoamplituden-Bilder mit Farbcodierung eines Linienreflektors in x-z-Ebene (links) und in x-y-Ebene (rechts), Siemens-Linear-Array, 16 Elemente parallel z-Achse (BSH = Bildschirmhöhe)

Die hier vorliegenden Echoamplituden-Bilder mit Farbcodierung sind untypisch für eine quadratische Schwingermembran (16 Elemente = $32 \cdot 32 \text{ mm}^2$), deren Schallbündel nur eine Hauptkeule im Fernfeld aufweist. Die Bilder stimmen aber mit Modellrechnungen überein, die von der Annahme ausgehen, dass ein Problem der elektrischen Leitfähigkeit der Beschichtung des Piezo-Composite vorliegt. Diese eingeschränkte Leitfähigkeit führt dazu, dass die Randbereiche der Elemente stärker angeregt werden als die Mitte. Die Modellrechnung von Richtcharakteristiken unter dieser Annahme zeigt Abb. 6.10.

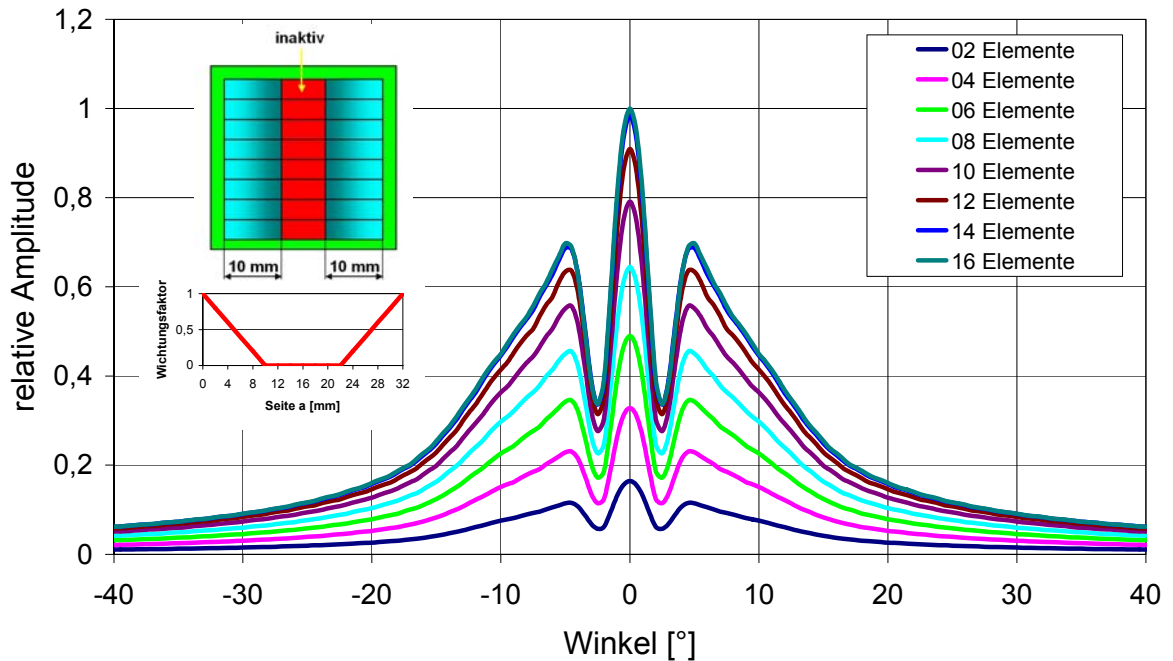


Abb. 6.10 Gerechnete Richtcharakteristiken der Elementgruppen des Siemens-Linear-Arrays bei Senkrechteinschallung unter Berücksichtigung eines Auslenkungsgradienten (Wichtungsfunktion)

Man kann deutlich die drei Keulen des Schallbündels erkennen, die auch in der Messung auftauchen. Aufgrund der Kenntnis des prinzipiellen Aufbaus des Siemens-Arrays kann man mehrere hypothetische Ursachen nennen, welche zu dem anzunehmenden Anregungsgradienten führen können. Erstens, die Kontaktschicht in der Mitte der Schwingerelemente hat sich vom Piezo-Composite abgelöst. Zweitens, das Piezo-Composite ist in der Mitte depolarisiert. Drittens und am wahrscheinlichsten: die elektrische Leitfähigkeit des metallischen Belages des Piezo-Composite ist so klein, dass durch die beim Sendeimpuls auftretenden Ströme die elektrische Feldstärke in der Elementmitte, d.h. fern von den Anlötstellen, sehr klein wird.

Auf Grund der Fehler am Prüfkopf musste das ursprüngliche Vorhaben, die wesentlichen Messungen zur Diplomarbeit mit dem Siemens-Linear-Array durchzuführen, aufgegeben werden. Nach Feststellung schwer zu interpretierender Befunde wurde dieser Defekt identifiziert und anschließend für die weiteren Ultraschallmessungen auf das BAM-Linear-Array zurückgegriffen.

6.2 Ultraschallmessung: Echoamplitudenbewertung

6.2.1 Echoamplitudenbewertung von Kreisscheibenreflektoren

Abb. 6.11 und Abb. 6.12 zeigen jeweils das Maximum der Echoamplitude eines Kreisscheibenreflektors von 3 mm als Funktion von dessen Abstand zum Schwinger bei Einschallung unter 45° von Longitudinalwellen in Stahl. Wie zu erwarten, verschieben sich die Kurven zu geringeren Echoamplituden und die Orte der letzten Maxima zu geringeren Abständen, je kleiner die strahlende Schwingerfläche wird, also je weniger Elemente zugeschaltet sind. Für Elementgruppen größer gleich 8 Elemente ist das letzte Maximum auf der Schallbündelachse auch das absolute. Im Fernfeld folgen die Kurven unabhängig von der Schwingergeometrie und -fläche dem Abstandsgesetz für Echos $1/r^2$. Im Nahfeld folgen die Kurven unterschiedlichen Funktionen.

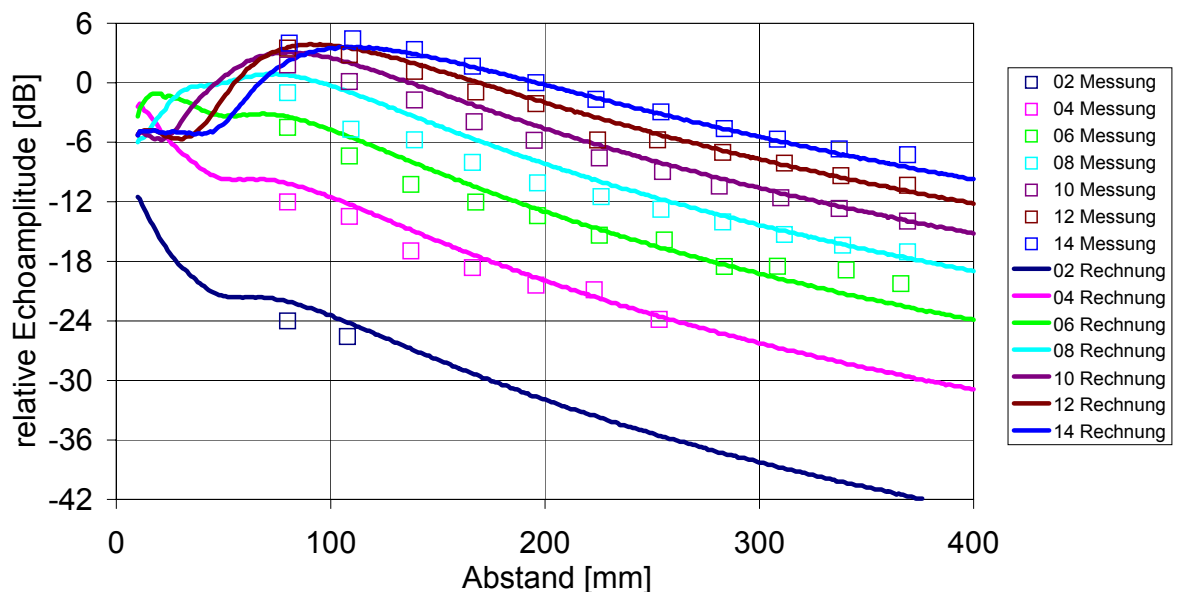


Abb. 6.11 Elementgruppen parallel zur Einschallebene: Relative Echoamplitude vs. Abstand des Kreisscheibenreflektors mit einem Durchmesser von 3 mm bei Einschallung unter 45° von Longitudinalwellen in Stahl

Bei paralleler Anordnung der Schwingerelemente zur Einschallebene (Abb. 6.11) werden die Kurven aus der Modellrechnung durch die Messungen bestätigt. Bei senkrechter Anordnung zur Einschallebene (Abb. 6.12) befinden sich mit kleiner werdender Seite a des

Rechteckschwingers, also mit abnehmender Elementanzahl, die Messpunkte bei höheren Echoamplituden. Es ist anzunehmen, dass mit Abnahme der Elementanzahl und daraus resultierender breiterer Richtcharakteristik des Schallbündels in der Einschallebene, mehrere Reflektoren gleichzeitig angeschallt werden, was durch die Anordnung der Bohrungen im Testkörper bedingt ist. Die Echos benachbarter Reflektoren überlagern sich mit den Echowellens des anvisierten Reflektors konstruktiv. Es resultiert ein Zuwachs der Echoamplitude auf der Schallbündelachse. Am Beispiel einer Modellrechnung kann der Zuwachs der Echoamplitude auf der Schallbündelachse nachgewiesen werden. Der übermäßige Echoamplitudenzuwachs bei kleineren Seitenabmessungen a ist also durch den Testkörper bedingt.

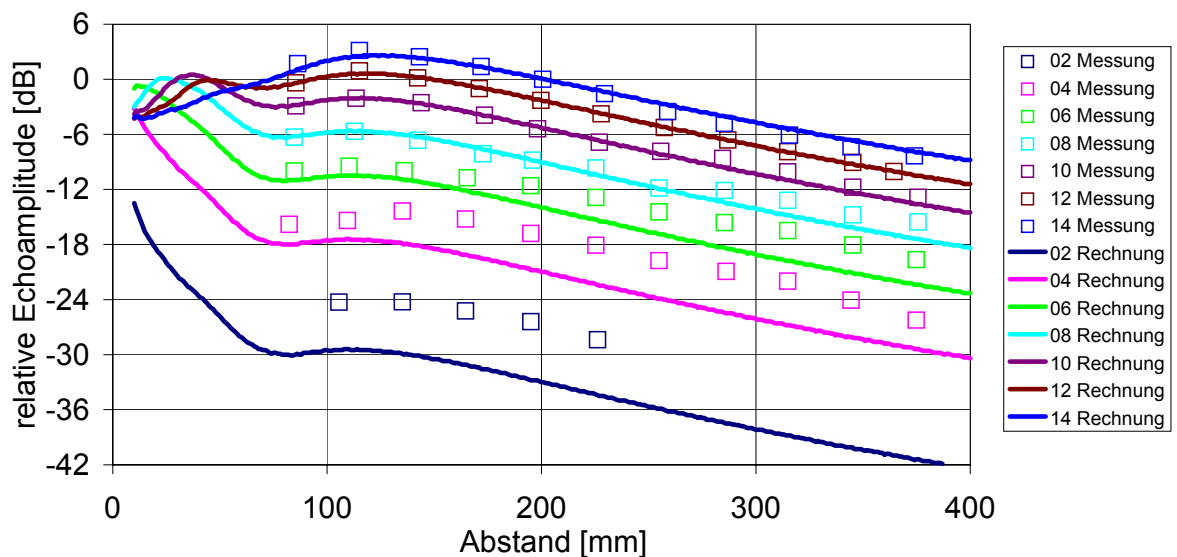


Abb. 6.12 Elementgruppen senkrecht zur Einschallebene: Relative Echoamplitude vs. Abstand des Kreisscheibenreflektors mit einem Durchmesser von 3 mm bei Einschallung unter 45° von Longitudinalwellen in Stahl

Nach dem Reziprozitätsprinzip zwischen Senden und Empfangen kann ein Kreisscheibenreflektor mit einem Kreiskolbenschwinger gleichgesetzt werden. Abb. 6.13 zeigt die Richtcharakteristik in Einschallebene auf einem Radius von 260 mm von einem und drei Kreiskolbenschwingern bzw. Reflektoren mit Durchmesser 3 mm. Der mittlere der drei Reflektoren steht senkrecht bei 0° . Links und rechts im Abstand von 30 mm in der Einschallebene befinden sich zwei weitere Reflektoren. Diese werden nur von geschwächten Randstrahlen des Schallbündels ausgehend vom Prüfkopf getroffen. Ein Prüfkopf mit einer

Länge von 4 mm in Einschallebene „sieht“ einen Winkelausschnitt von rund $\pm 0,3^\circ$. Im Vergleich zur Richtcharakteristik eines Reflektors führt die Überlagerung der Echowellens der drei Reflektoren zu einer erhöhten Echoamplitude in diesem Winkelausschnitt. Das Oszillieren des Schalldrucks zwischen -20° und $+20^\circ$ entsteht durch konstruktive und destruktive Interferenz der sich überlagernden Echowellens. Diese Interferenzerscheinungen sind vergleichbar mit denen eines Beugungsbildes an einem Gitter mit einer Gitterkonstante viel größer als dessen „Gitterstäbe“.

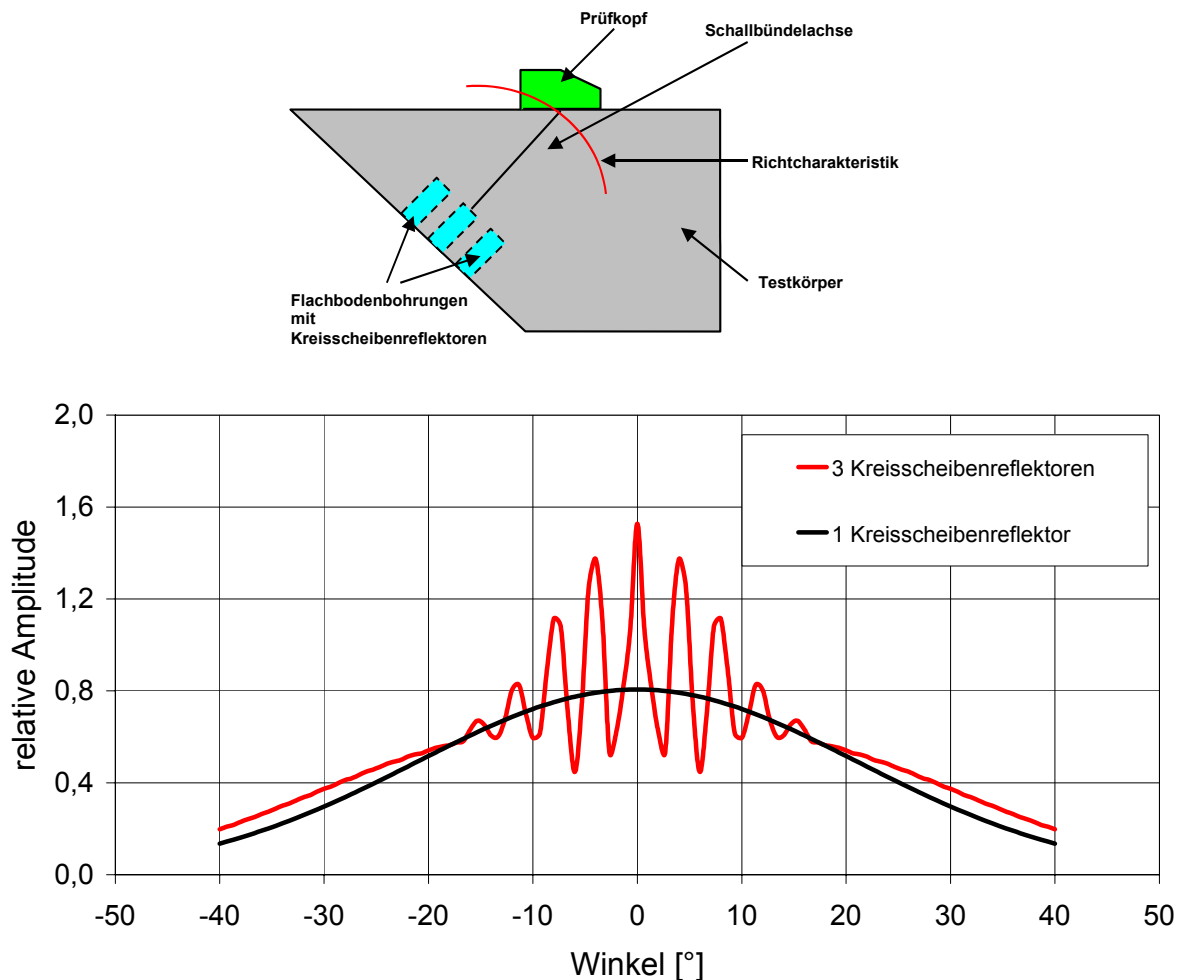


Abb. 6.13 Richtcharakteristik von drei Kreisscheibenreflektoren mit einem Durchmesser von 3 mm, Überlagerung der Ultraschallwellen führt zu höherer Amplitude bei 0°

In Abb. 6.14 und Abb. 6.15 sind jeweils das Maximum der Echoamplitude eines Kreisscheibenreflektors von 3 mm als Funktion von dessen Abstand zum Schwinger bei Einschallung unter 45° mit Transversalwellen in Stahl dargestellt.

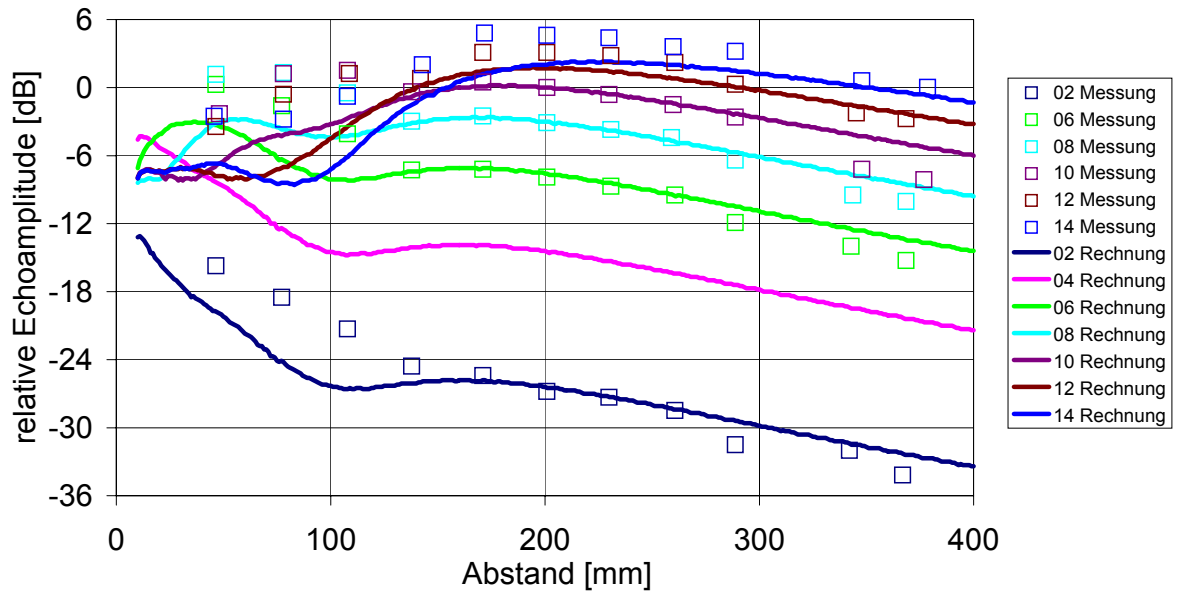


Abb. 6.14 Elementgruppen parallel zur Einschallebene: Relative Echoamplitude vs. Abstand des Kreisscheibenreflektors mit einem Durchmesser von 3 mm bei Einschallung unter 45° von Transversalwellen in Stahl

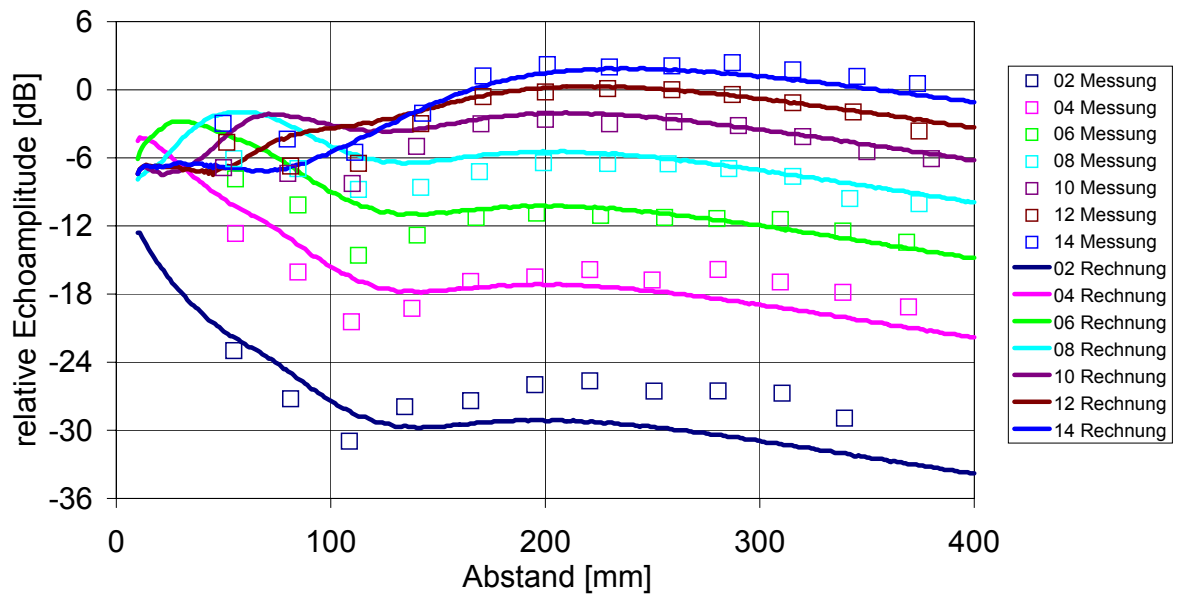


Abb. 6.15 Elementgruppen senkrecht zur Einschallebene: Relative Echoamplitude vs. Abstand des KSRs mit einem Durchmesser von 3 mm bei Einschallung unter 45° von Transversalwellen in Stahl

Wie bereits für Longitudinalwellen beschrieben, verschieben sich auch hier die Kurven zu geringeren Echoamplituden und die Orte der letzten Maxima zu geringeren Abständen, je weniger Elemente zugeschaltet sind. Auch bei Transversalwellen treten die gleichen Gesetzmäßigkeiten in Nahfeld- und Fernfeld auf. Bei paralleler Anordnung zur Einschallebene (Abb. 6.14) zeigen die Messpunkte der Elemente gute Übereinstimmung mit den Modellrechnungen. Die relativen Zunahmen der Echoamplituden zwischen 14, 12 und 10 Elementen sind jedoch größer als die der Rechnungen. Die Messreihe „4 Elemente“ konnte durch einen Fehler der Messwerterfassung nicht ausgewertet werden. Bei senkrechter Anordnung (Abb. 6.15) nehmen die Echoamplituden der Messungen mit abnehmender Elementanzahl zu. Vermutlich kommt es auch bei Transversalwellen zum Überlagern mehrerer Echowellens. Jedoch ist im Vergleich zu Longitudinalwellen auf Grund geringerer Bündelbreiten der Effekt deutlich geringer.

Anders als bei den Longitudinalwellen konnten für Transversalwellen auch Reflektoren im Nahfeldbereich erfasst werden. Die Messwerte im Nahfeld weichen von denen der Modellrechnung ab, da die Rechnungen sich auf die Echoamplitude auf der Schallbündelachse bzw. Rotationsachse des Reflektors beziehen. Im Nahfeld liegen die Maxima nicht immer auf der Schallbündelachse. Aus diesem Grund sind die Messwerte (Maxima der Echoamplituden) in Abb. 6.16 und Abb. 6.17 zusammen mit Modellrechnungen dargestellt, welche die Maxima der Echoamplituden aus der Echodynamik in Einschallebene in verschiedenen Tiefenlagen berücksichtigen. Die Tiefenlagen der Kreisscheibenreflektoren sind durch den Testkörper definiert. Die Abbildungen zeigen eine gute Übereinstimmung von Messung mit Modellrechnung im Nah- wie im Fernfeld.

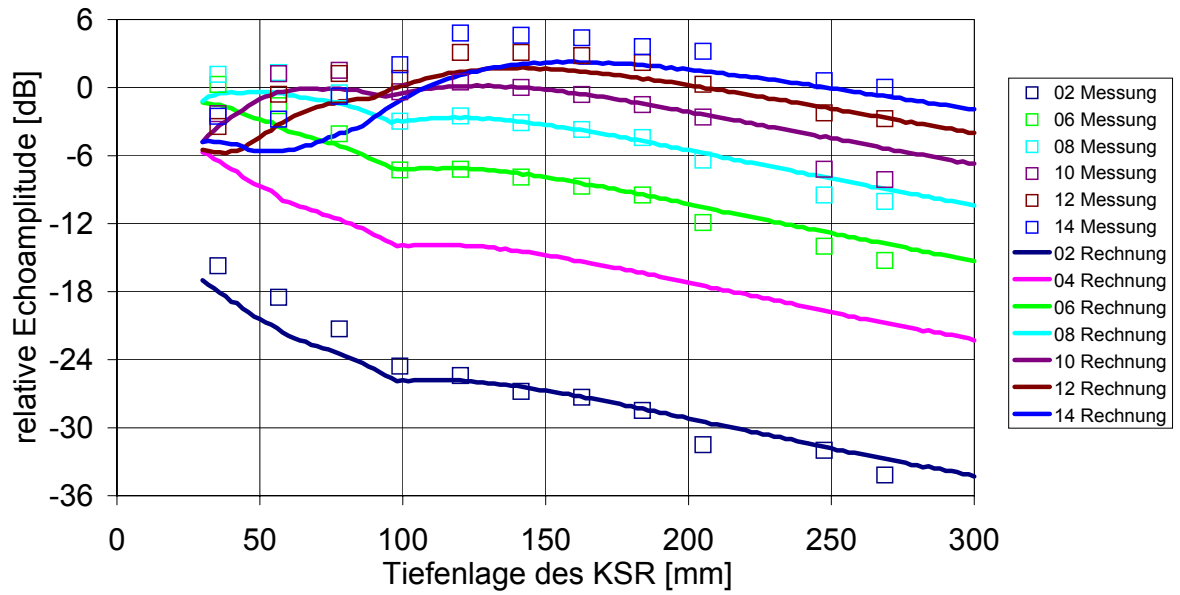


Abb. 6.16 Elementgruppen parallel zur Einschallebene: Relative Echoamplitude vs. Tiefenlage des KSRs bei Einschallung unter 45° von Transversalwellen in Stahl

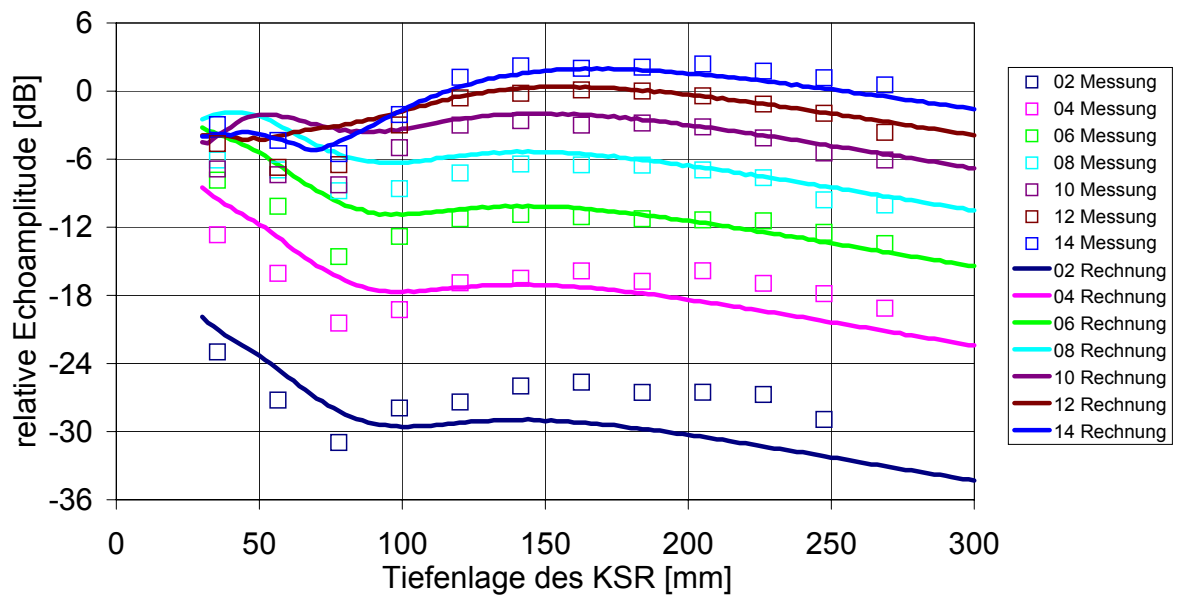


Abb. 6.17 Elementgruppen senkrecht zur Einschallebene: Relative Echoamplitude vs. Tiefenlage des KSRs bei Einschallung unter 45° von Transversalwellen in Stahl

Abb. 6.18 zeigt das Maximum der Echoamplitude eines KSRs von 3 mm als Funktion des relativen Abstandes bei Einschallung unter 45° von Transversalwellen in Stahl. Es sind die Messpunkte des Einschwingers $16 \cdot 32 \text{ mm}^2$, $f = 1,65 \text{ MHz}$, sowie des geometrieäquivalenten BAM-Linear-Arrays bei gleichzeitiger Ansteuerung von 8 Elementen, $f = 2,8 \text{ MHz}$ und deren Kurven aus der Modellrechnung dargestellt. Die Normierung des Abstands durch Multiplikation mit der Mittenfrequenz f und Division durch die wahre Membranfläche macht die Darstellung von den beiden letztgenannten Größen unabhängig. Alle Kurven zeigen im Fernfeld gute Übereinstimmung. Offensichtlich kann ein Linear-Array, bei gleichzeitiger Ansteuerung von Elementgruppen, gut zur Simulation von Einschwingern verwendet werden.

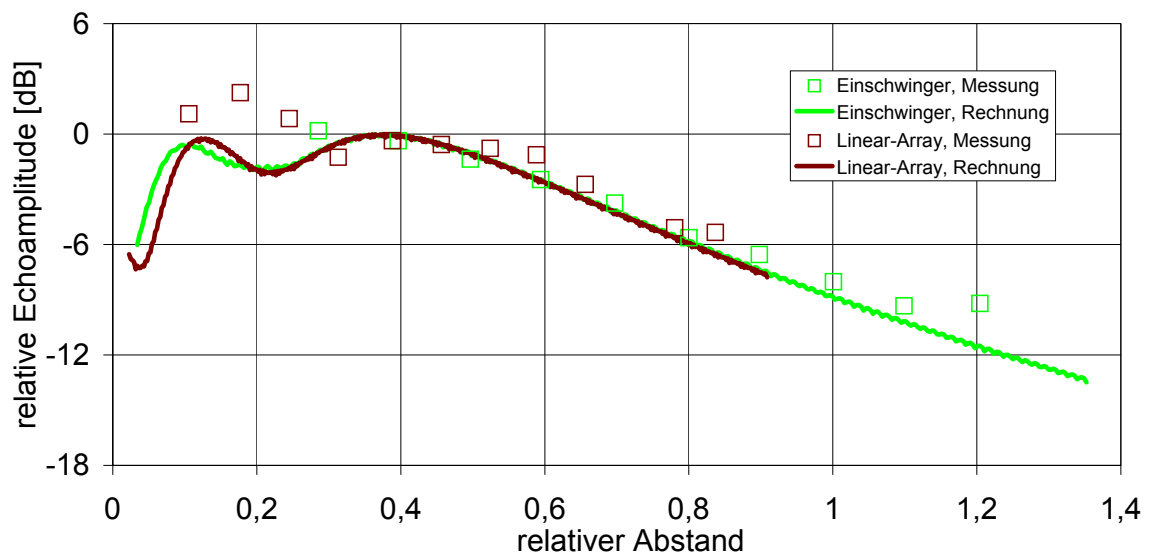


Abb. 6.18 Vergleich Einschwinger $16 \cdot 32 \text{ mm}^2$ mit Linear-Array 8 Schwingerelemente: Relative Echoamplitude vs. relativen Abstand des KSRs von 3 mm bei Einschallung unter 45° von Transversalwellen in Stahl

6.2.2 Echoamplitudenbewertung von Kreisscheiben- und Referenzreflektoren

Abb. 6.20 und Abb. 6.21 zeigen allgemeine AVG-Diagramme nach DIN-EN 583-2, in welche die gemessenen Echoamplituden der Kreisscheibenreflektoren mit einem Durchmesser von 3 mm relativ zu den Rückwandechoamplituden als Funktion von deren Abständen zum Schwinger bei Einschallung unter 45° in Stahl eingetragen sind. Der Abstand A ist mit der Nahfeldlänge N nach der Näherungsformel von Wüstenberg [WÜS76a], unter Berücksichtigung der Verkürzung der Schwingerseite durch Brechung des Schallbündels in

Einschallebene, normiert worden. Die Verkürzung wird durch den Korrekturfaktor $K(\alpha)$ ausgedrückt, welcher sich aus dem Verhältnis der Cosinus-Funktion des Einfallswinkels β und des Einschallwinkels α ergibt, siehe Abb. 6.19 und Formel (28). Weitere Einflüsse auf die effektiven Seitenlängen, die aus der Herstellung des Prüfkopfes resultieren, sind nicht berücksichtigt worden.

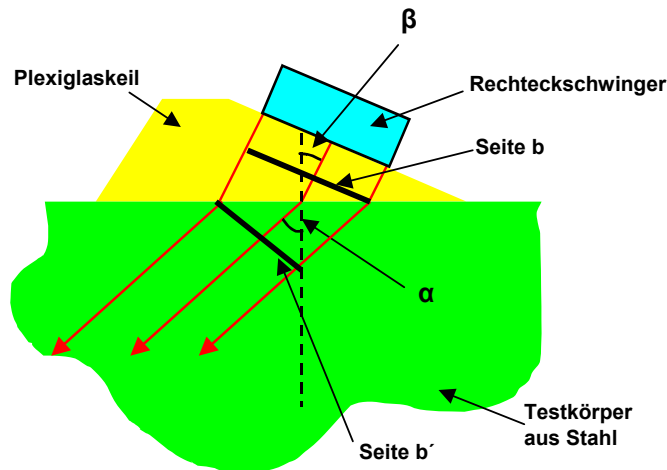


Abb. 6.19 Herleitung des Korrekturfaktors $K(\alpha)$ zur Berechnung der effektiven Schwingerfläche bei Schrägeinschallung

$$\text{mit } K(\alpha) = \frac{b}{b'} = \frac{\cos(\beta)}{\cos(\alpha)} = \frac{\sqrt{1 - \left(\frac{c_{L, Plexi}}{c_{i, Tk}}\right)^2 \sin^2(\alpha)}}{\cos(\alpha)} \quad (28)$$

Nach Wüstenberg [WÜS76a] beträgt $K(\alpha)$ für die Einschallung unter 45° in Stahl den Wert 1,14 für Transversal- und 1,34 für Longitudinalwellen. Es ergibt sich für A:

$$A = \frac{r}{N} \quad (28)$$

$$\text{mit } N \approx \frac{1}{\pi\lambda} \left(a_{\text{eff}}^2 + b_{\text{eff}}^2 \right) \left(0,78 - 0,27 \frac{a_{\text{eff}}}{b_{\text{eff}}} \right) \text{ wobei } a_{\text{eff}} = a \text{ und } b_{\text{eff}} = \frac{b}{K(\alpha)} \quad (30)$$

Aus der Nahfeldlänge nach (30) wurde ein fiktiver Durchmesser D_S eines kreisförmigen Schwingers nach $N = D_S^2/4\lambda$ berechnet, aus der die Größe des Fehlers $G = D_{KSR}/D_S$ hervorgeht.

Als Referenz- bzw. Bezugsecho diente ein Rückwandecho im Fernfeld. Die Verstärkung V ergibt sich aus der Differenz der Rückwandechoamplitude H_{RW} zur Echoamplitude eines Kreisscheibenreflektors H in dB, also $V = H_{RW} - H$.

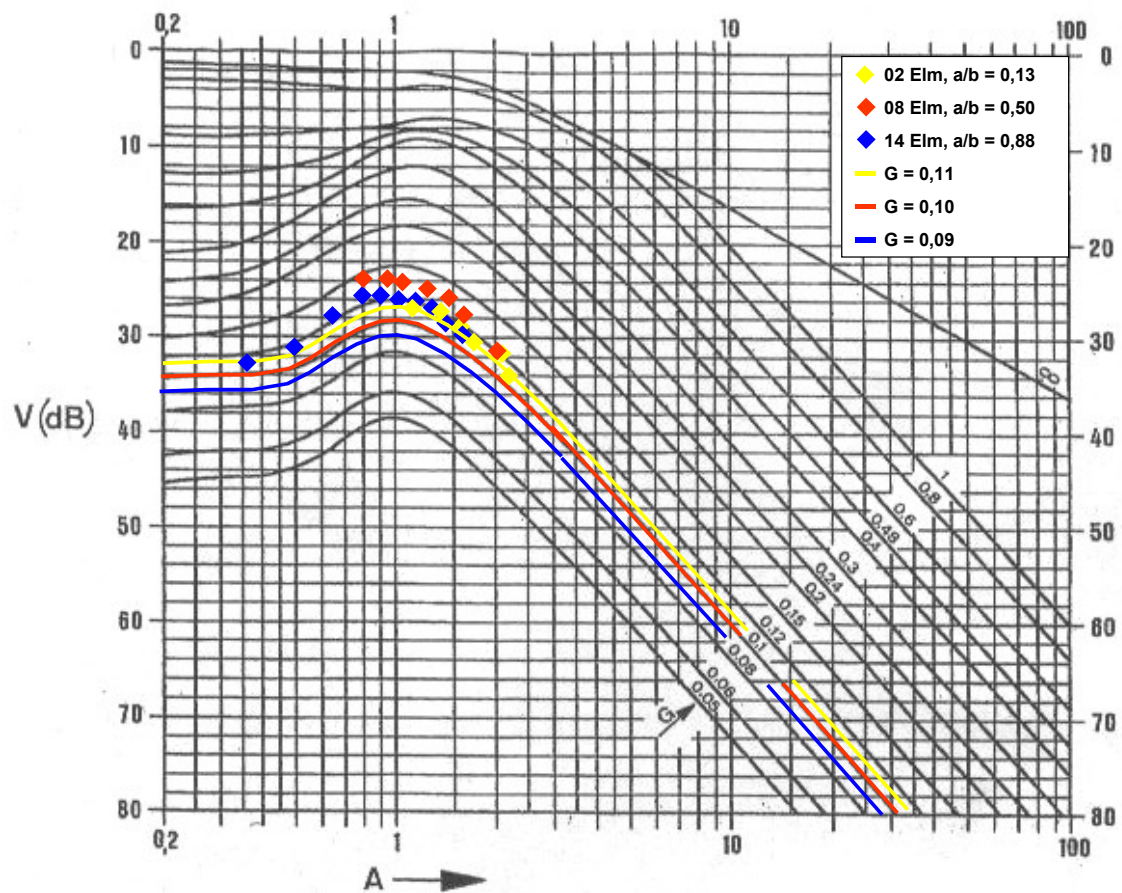


Abb. 6.20 Relative Echoamplitude eines Kreisscheibenreflektors mit einem Durchmesser von 3 mm in Bezug zum Rückwandecho bei Transversalwellen vs. Abstand, aufgetragen im allgemeinen AVG-Diagramm

In Abb. 6.20 sind die relativen Echoamplituden des Kreisscheibenreflektors von 3 mm in Bezug zum Rückwandecho als Funktion des Abstands für eine unterschiedliche Anzahl von angeregten Schwingerelementen bei Einschaltung von Transversalwellen dargestellt. Die Schwingerelemente sind parallel zur Einschallebene ausgerichtet, d.h. die längere Seite b liegt parallel zur Einschallebene und bleibt bei allen Messreihen konstant. Die farblich markierten AVG-Kurven ergeben sich aus den Fehlergrößen G , welche zwischen 0,09 für 14

Schwingerelemente und 0,11 für 2 Schwingerelemente liegen. Diese AVG-Kurven entsprechen alle einem Kreisscheibenreflektor mit einem Durchmesser von 3 mm.

Durch den Testkörper bedingt, liegen nur Messpunkte im Übergang vom Nahfeld zum Fernfeld bei $A \approx 1$ vor. Die Messwerte zeigen eine hinreichend gute Übereinstimmung mit den AVG-Kurven. Jedoch können die Abweichungen zwischen den Messwerten und den entsprechenden AVG-Kurven bis zu 4 dB betragen. Dabei ist festzustellen, dass, unabhängig von der Schwingergeometrie, die Echoamplituden der Messwerte immer größer sind als die Echoamplituden aus den AVG-Kurven. Das bedeutet, dass in der Praxis ein Fehler zu groß bewertet werden würde.

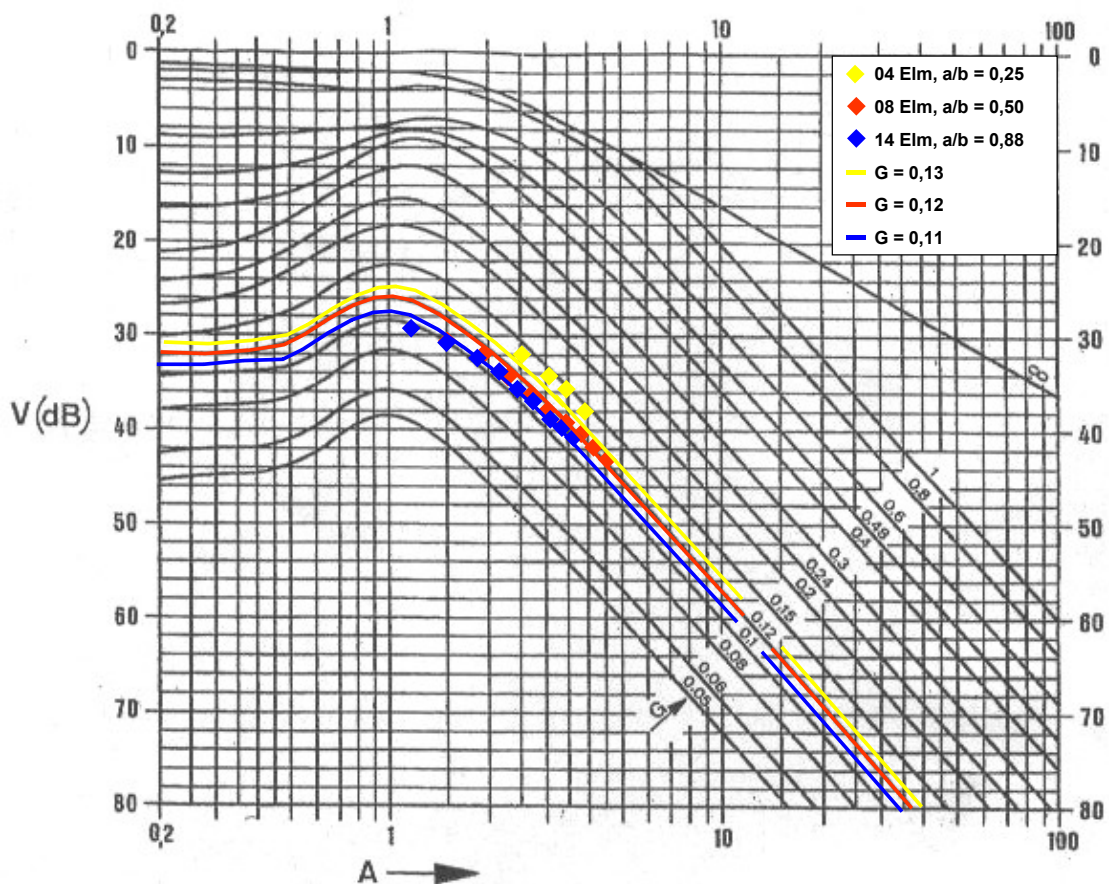


Abb. 6.21 Relative Echoamplitude eines Kreisscheibenreflektors mit einem Durchmesser von 3 mm in Bezug zum Rückwandecho bei Longitudinalwellen vs. Abstand, aufgetragen im allgemeinen AVG-Diagramm

Abb. 6.21 zeigt das gleiche Diagramm wie in Abb. 6.20 jedoch bei Einschaltung von Longitudinalwellen. Die Schwingerelemente sind auch hier parallel zur Einschallebene ausgerichtet. Die farbig markierten AVG-Kurven ergeben sich aus den Fehlergrößen G ,

welche zwischen 0,11 für 14 Schwingerelemente und 0,13 für 4 Schwingerelemente liegen. Diese AVG-Kurven entsprechen alle einem Kreisscheibenreflektor mit einem Durchmesser von 3 mm.

Im Gegensatz zur Einschallung von Transversalwellen liegen, bei gleichbleibender Testkörpergeometrie, bei Longitudinalwellen nur Messpunkte im Fernfeld für Abstände $A > 1$ vor. Die Messwerte stimmen auch hier hinreichend gut mit den entsprechenden AVG-Kurven überein. Die Abweichungen der Messwerte zu dieser Kurve können mit maximal 2 dB beziffert werden. Die Echoamplituden der Messwerte sind auch bei Longitudinalwellen immer etwas höher als die der entsprechenden AVG-Kurven.

Aus Abb. 6.20 und Abb. 6.21 geht hervor, dass das Rückwandecho als Referenz für Winkelprüfköpfe mit rechteckigen Schwingern auch für a/b -Seitenverhältnisse kleiner 0,5 geeignet ist, sowohl für Longitudinal- als auch für Transversalwellen. Die Normierung des Abstands ist dabei mit der Nahfeldlänge vorzunehmen. Die Nahfeldlänge kann, unter Berücksichtigung der Verkürzung der Recheckseite in Einschallebene, mit den Näherungsformeln in [WÜS76a] und in [SCH75b] oder mit Hilfe der hier verwendeten Simulationsprogramme (Echo3D06 und Array3D25) berechnet werden. Die Näherungsformel in [WÜS76a] ist in Formel (30) dargestellt und die in [SCH75b] lautet (Seite b parallel in Einschallebene und $b > a$):

$$N \approx Z \frac{b_{eff}^2}{4\lambda} \text{ mit } Z = 1,04 - 0,45 \left(\frac{a_{eff}}{b_{eff}} \right) + 0,76 \left(\frac{a_{eff}}{b_{eff}} \right)^2 \text{ wobei } a_{eff} = a \text{ und } b_{eff} = \frac{b}{K(\alpha)} \quad (31)$$

Abb. 6.22 zeigt die berechneten Nahfeldlängen der unterschiedlichen Modelle bei Einschallung von Longitudinalwellen unter einem Winkel von 45° in Stahl. Obwohl die Nahfeldlänge bei Rechteckschwingern nach [WÜS76a] nicht mehr scharf definierbar ist, kann festgestellt werden, dass die Ergebnisse der unterschiedlichen Modelle dennoch hinreichend gut übereinstimmen. Die berechneten Nahfeldlängen genügen alle der Normierung des Abstands A . Welche der Modelle die wahre Nahfeldlänge am besten widerspiegelt, könnte ein Vergleich von Modellrechnungen mit Schalldruckmessungen in Wasser entlang der Bündelachse mittels Hydrophon oder nach DIN 25450 [DIN90] mit Echomessungen an Flachbodenbohrungen mit einem Durchmesser von 2 mm in unterschiedlichen Abständen klären. Aufgrund der Erfahrung mit den rechnergestützten Modellen kann angenommen werden, dass die Nahfeldlänge aus Array3D25 der wahren

Nahfeldlänge am nächsten kommt. Inwiefern die Näherungsformeln zur Berechnung der Nahfeldlänge aus den gemessenen Schallbündelquerschnitten nach EN 12668-2 [EN00] und DIN 25450 [DIN90] mit den Werten aus den Näherungsformeln in [WÜS76a] und in [SCH75b] oder aus den Simulationsprogrammen übereinstimmen, wurde in dieser Arbeit nicht untersucht. Für die Anwendung in der Praxis kann die Nahfeldlänge mit der Näherungsformel in [WÜS76a] berechnet werden, da diese schnell und ohne Einsatz von Rechnern zu brauchbaren Ergebnissen führt. Des Weiteren ist sie im Gegensatz zur Näherungsformel in [SCH75b] handlicher in ihrem Gebrauch.

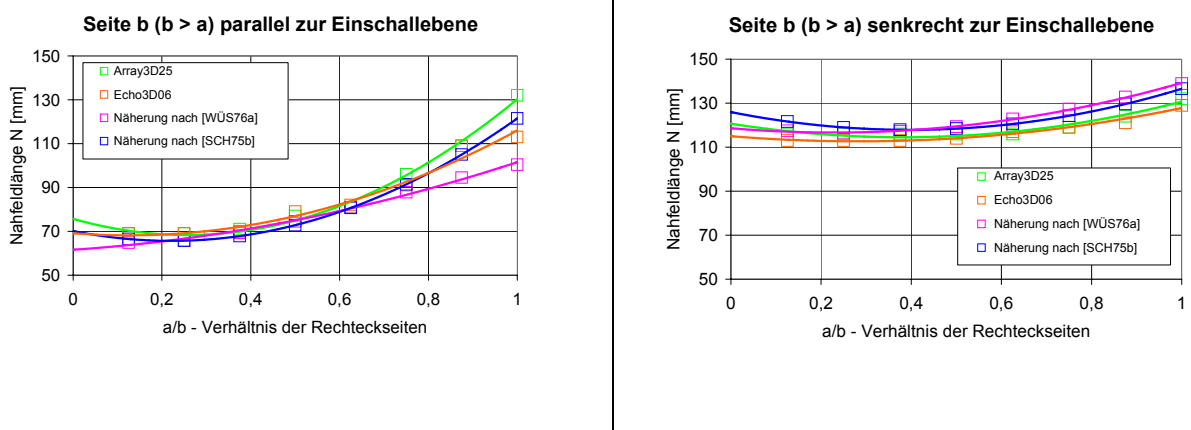


Abb. 6.22 Vergleich der Nahfeldlängen aus Modellrechnungen und Näherungsformeln bei Longitudinalwellen für die Einschallung von 45° in Stahl

Die Messwerte für die Anordnung der Schwingerelemente senkrecht zur Einschallebene konnten nicht mit dem Rückwandecho in Relation gesetzt werden, da durch die vom Testkörper bedingte Überlagerung mehrerer Echos von benachbarten Kreisscheibenreflektoren eine höhere Echoamplitude am anvisierten KSR resultierte (siehe Abb. 6.13), was zu großen Abweichungen führen muss.

Abb. 6.23 zeigt die Abweichung Δ in Abhängigkeit vom a/b -Seitenverhältnis des rechteckigen Schwingers. Die Herleitung von Δ befindet sich im Kapitel 5.5, Formel (25) bis (27). Δ beschreibt die Abweichung der Echoamplituden einer Flachbodenbohrung mit einem Durchmesser von 3 mm zu der einer querstehenden Zylinderbohrung mit einem Durchmesser von 4 mm, welche nach Formel (19) und unter Berücksichtigung der Korrekturen nach den Formeln (25) und (26) die gleichen Echoamplituden haben müssten.

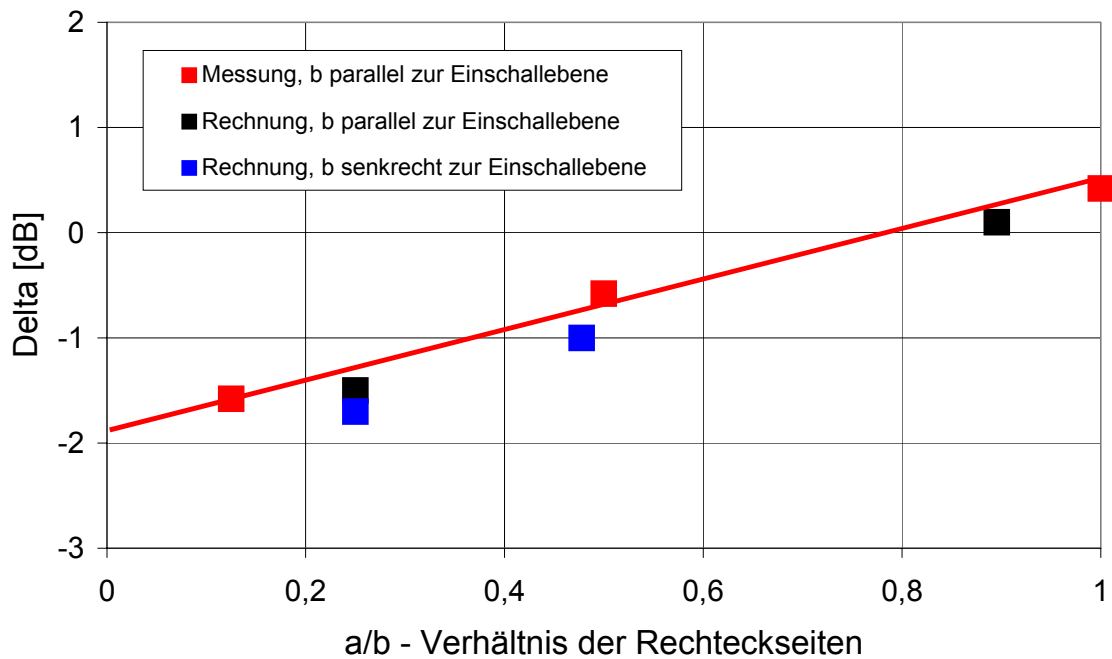


Abb. 6.23 Abweichung Delta der Echoamplitude einer Flachbodenbohrung mit einem Durchmesser von 3 mm zu der einer amplitudenäquivalenten querstehenden Zylinderbohrung mit einem Durchmesser von 4 mm

Die durch die Umrechnungsformel (19) modifizierten Messwerte stimmen gut mit den Modellrechnungen überein. Die Abweichung Delta nimmt mit kleiner werdenden a/b -Verhältnissen zu. Dabei spielt es anscheinend keine Rolle, ob sich die längere Seite b in der Einschallebene befindet oder senkrecht dazu, siehe blaue Punkte. Die Abweichung liegt bei $a/b = 0,3$ bis 1 in einem Bereich von ca. 2 dB. Da 2 dB als Grenze der Reproduzierbarkeit von Messwerten angenommen wird, ist die Umrechnungsformel (19) im Kapitel 4.1 dieser Arbeit, nach DIN-EN 583-2, vermutlich bis zu einem a/b -Verhältnis von 0,3 ohne Einschränkung anwendbar. Folglich sind querliegende Zylinderbohrungen für Rechteckschwinger mit Seitenverhältnissen von $a/b \geq 0,3$ auch in diesen Fällen gut geeignete Referenzreflektoren zur Kalibrierung des AVG-Diagramms.

7 Schlussfolgerungen und Ausblick

7.1 Konsequenzen aus der Charakterisierung der Prüfköpfe

Aus den Ergebnissen der Richtcharakteristiken geht hervor, dass das BAM-Linear-Array sowie die Einschwinger-Prüfköpfe den Anforderungen für die Echoamplitudenbewertung an dem gegebenen Testkörper genügen. Das BAM-Linear-Array ist für die Simulation von rechteckigen Einschwingern geeignet. Die Änderungen des Schallbündels bei Einschallung unter 45° im Vergleich zur Senkrechteinschallung sind aufgezeigt und können bei der Auswertung der Echoamplitudenbewertung berücksichtigt werden.

7.2 Konsequenzen aus der Echoamplitudenbewertung von Kreisscheibenreflektoren

Aus den Ergebnissen der Echoamplitudenbewertung bei Einschallung unter 45° in Stahl in Kontakttechnik können folgende Schlussfolgerungen abgeleitet werden:

Die in der BAM entwickelten Rechenmodelle eignen sich grundsätzlich gut, um Echoamplituden-Abstands-Diagramme (AVG-Diagramme) für die hier untersuchten Prüfsituationen zu erstellen, wie der Vergleich mit den Messergebnissen zeigt. Das Modell lässt eine Verallgemeinerung für andere Einschallwinkel zu, für die im Allgemeinen keine weiteren Messungen mehr notwendig sind.

Der für die experimentelle Überprüfung von Echoamplituden-Abstands-Diagrammen verwendete Testkörper ist für extreme Rechteckmembranen nur bedingt geeignet. Um die Überlagerung mehrerer Echos zu vermeiden, wäre ein Testkörper notwendig, der die Trennung mehrerer Bohrungsanzeigen z.B. durch unterschiedliche Laufzeiten der Kreisscheibenreflektor-Echos zulässt. Dieses könnte bei gleicher Geometrie des Testkörpers durch unterschiedlich tiefe Flachbodenbohrungen erreicht werden.

7.3 Konsequenzen aus der Echoamplitudenbewertung von Referenzreflektoren

Prinzipiell kann mit Winkelprüfköpfen, deren rechteckförmige Schwinger extreme Seitenverhältnisse aufweisen, die Empfindlichkeitsjustierung nach DIN-EN 583-2 mit Hilfe eines AVG-Diagramms vorgenommen werden. Dabei sind jedoch folgende Einschränkungen zu berücksichtigen.

- 1.) Die Beziehung der Echoanzeige eines Kreisscheibenreflektors zu der einer Rückwand ist, da die Nahfeldlänge nur unscharf definiert ist, mit Abweichungen von der Standardsituation bei kreisförmigen bzw. quadratischen Schwingermembranen behaftet. Die Abweichung kann bis zu 4 dB betragen. Bei der Normierung des Abstands mit der Nahfeldlänge kann die in [WÜS76a] vorgeschlagene Näherungsformel verwendet werden.
- 2.) Die Lage einer Zylinderbohrung relativ zu den AVG-Kurven von Kreisscheibenreflektoren kann nach der Formel (19), Kapitel 4.1, aus DIN-EN 583-2 festgelegt werden. Die Messungen haben gezeigt, dass jedoch mit Abweichungen bis zu 3 dB zu rechnen ist, je schmaler die Rechteckschwinger werden.
- 3.) In einem Bereich zwischen $a/b = 0,3$ bis 1 kann man noch mit normalen Bedingungen rechnen.

Die gute Übereinstimmung von Messungen und Modellrechnung legen es nahe, für Sonderfälle AVG-Diagramme zu berechnen, unter Einschluss der relativen Lage von Kurven für Querbohrungen, um die in den Punkten 1 bis 3 genannten Abweichungen zu umgehen.

Rechteckige Schwinger mit extremen Seitenabmessungen, wie z.B. $(6 \cdot 25)$ mm² werden häufig in Sende-Empfangs-Prüfköpfen verwendet. Für Sende-Empfangs-Prüfköpfe gelten auch bei extremen Rechteckmembranen immer Sonderregelungen für AVG-Diagramme, siehe beispielsweise Prüfkopf-Datenblätter der Firma Krautkrämer, die durch Messung oder Modellierung anzugeben sind [WÜS91]. Die Ergebnisse dieser Arbeit können zur Berechnung von AVG-artigen Diagrammen für die Empfindlichkeitseinstellung auch bei diesen Prüfköpfen behilflich sein, da die hier verwendeten Modelle für Rechteckschwinger auch unter den besonderen Bedingungen der örtlichen Trennung von Sende- und Empfangsfunktion bei Sende-Empfangs-Prüfköpfen geeignet sind. Jedoch ist dabei die besondere Geometrie, die für die Bündelkreuzung und das dadurch entstehende Empfindlichkeitsfeld verantwortlich ist, zu berücksichtigen.

Die vorgestellten Ergebnisse bleiben daher zunächst auf Einschwinger-Prüfköpfe begrenzt. Zwar konnte der Einfluss der Rechteckgeometrie des Schwingers bei Winkelprüfköpfen experimentell lediglich für einen Winkel von 45° an Testblöcken überprüft werden. Jedoch kann man aus der guten Übereinstimmung zwischen Modellrechnung und Experiment ableiten, dass die Ergebnisse auch auf andere Winkel übertragen werden können. Insbesondere kann man davon ausgehen, dass AVG-Diagramme für derartige Fälle aufgrund der verfügbaren Modelle berechnet werden können.

8 Quellenverzeichnis

- [BAM99] BAM, Fachgruppe VIII.4, Abschlussbericht: *Entwicklung, Anpassung und Anwendung einer mechanisierten, bildgebenden Hochfrequenz-Ultraschallprüftechnik zur quantitativen Untersuchung der Schmelzdefektpopulation und Werkstoffdiskontinuitäten im Größenbereich > 50 µm mit Ultraschall an Werkstoffproben und bauteilähnlichen Geometrien*, Förderkennzeichen 20T9504A, Februar 1999
- [BOE99] Boehm, R.: *Darstellung des Entwicklungsstandes des schnellen, halbanalytischen Modells (FSAM) für die US-Prüfung anhand von Beispielen*, Vortrag 36 für DGZfP Jahrestagung in Celle
- [CRE96] Cremer, L., Heckl, M.: *Körperschall – Physikalische Grundlagen und technische Anwendungen*, Springer Verlag Berlin, 2. neu bearbeitete Auflage 1996
- [DGZ97] Deutsche Gesellschaft für zerstörungsfreie Prüfung e.V. (DGZfP): *UT2.1, Ultraschallprüfung, Aufbaukurs Stufe 2*, Unterlagen für den Unterricht, Ausgabe 1997
- [DIN00a] DIN-EN 1330-4: *Zerstörungsfreie Prüfung – Terminologie – Teil 4: Begriffe der Ultraschallprüfung*, Ausg. März 2000
- [DIN00b] DIN-EN 12223: *Ultraschallprüfung – Beschreibung des Kalibrierkörpers Nr.1*, Ausg. 2000
- [DIN01] DIN-EN 583-2: *Ultraschallprüfung Teil 2: Empfindlichkeits- und Entfernungsjustierung*, Ausg. April 2001
- [DIN90] DIN 25450: *Ultraschallprüfsysteme für die manuelle Prüfung*, Ausg. September 1990
- [EN00] EN 12668-2: *Zerstörungsfreie Prüfung – Charakterisierung und Verifizierung der Ultraschall-Prüfausrüstung – Teil 2: Prüfköpfe, Schluss-Entwurf*, Ausg. Nov. 2000
- [ERH82] Erhard, A.: *Untersuchungen zur Ausbreitung von Longitudinalwellen an Oberflächen bei der Materialprüfung mit Ultraschall*, Dissertation, TU-Berlin 1982

-
- [GOO96] Goodman, J. W.: *Introduction to Fourier Optics*, The McGraw-Hill Companies Inc., New York u.a., 2nd ed. 1996
- [KIN00] Kinsler, L. E., Frey, A. R., Coppers, A. B., Sanders, J. V.: *Fundamentals of Acoustics*, John Wiley & Sons Inc. New York, 4th ed. 2000
- [KRA86] Krautkrämer, J. und H.: *Werkstoffprüfung mit Ultraschall*, Springer Verlag Berlin, 5. völlig überarbeitete Auflage 1986
- [KUT83] Kutzner, J.: *Grundlagen der Ultraschallphysik*, B. G. Teubner Verlag, Stuttgart 1983
- [LAN87] Langenberg, K. J.: *Physikalische Elastodynamik statt Punktquellensynthese*, Interner Bericht des Fachgebiets Theoretische Elektrotechnik d. Universität GH Kassel, 1987
- [MIL54] Miller, G. F., Pursey, H.: *The field and radiation impedance of mechanical radiators on the free surface of semi-infinite isotropic solid*, Proc. Roy. Soc. London, A233, 1954, S. 521-542
- [SCH74] Schlengermann, U.: *Bemerkungen über die Nahfeldlängen-Bestimmung bei Ultraschall Kolbenstrahlern verschiedener Form*, Materialprüfung 16 Nr. 5, Mai 1974, Seiten 129-131
- [SCH75a] Schlengermann, U.: *Bestimmung von Reflektorgrößen mit rechteckigen Ultraschallschwingern ($b/a = 0,5$)*, Zeitschrift für Werkstofftechnik, Journal of Materials Technology, 6. Jahrgang, Heft 5, Mai 1975, Seiten 145-150
- [SCH75b] Schlengermann, U.: *Zur Systematik der Entfernungsabhängigkeit des Druckes im Schallfeld von rechteckigen Ultraschallwandlern*, Deutsche Gesellschaft für Akustik (DAGA), VDI-Verlag, 1975, Seiten 441-444
- [SCH77] Schlengermann, U.: *Beurteilung effektiver Schallfelddaten aus dem Entfernungsgesetz des Schalldrucks*, Materialprüfung 19 Nr. 2, Feb. 1977, Seiten 53-58
- [TSC02] Tschardtke, D.: *Fehlerdiagnose in der Ultraschallprüfung durch iterative Modellierung*, Dissertation, TU-Berlin 2002

-
- [WAZ80] Wazau: *Messen der Richtcharakteristik von Ultraschallprüfköpfen, Dokumentation der US-Echodynamik – Technische Beschreibung und Bedienungsanleitung*, Bedienungsanleitung, Fa.: Dr. Ing. Georg Wazau Messen + Prüfen, Berlin, 1980
- [WÜS74] Wüstenberg, H.: *Untersuchungen zum Schallfeld von Winkelprüfköpfen für die Materialprüfung mit Ultraschall*, Dissertation, BAM-Berichte Nr.27, Berlin, August 1974 (S.22ff)
- [WÜS76a] Wüstenberg, H., Schulz, E., Möhrle, W., Kutzner, J.: *Zur Auswahl der Membranformen bei Winkelprüfköpfen für die Ultraschallprüfung*, Materialprüfung 18 Nr. 7, Juli 1976, Seiten 223-230
- [WÜS76b] Wüstenberg, H., Kutzner, J., Engl, G.: *Dependence of Echo Amplitude on Defect Orientation in Ultrasonic Examinations*, Vol. 3H4, 8th world conference on non destructive testing, Cannes France, 1976
- [WÜS90] Wüstenberg, H., Walte, F.: *Die Echohöhe und Echodynamik in der Ultraschallprüfung und ihre Berechnung mit vereinfachten Modellen*, Konferenz-Einzelbericht der DGZfP: Vorträge der Seminare, Modelle und Theorie für die Ultraschallprüfung, 1990/ 1991
- [WÜS91] Wüstenberg, H., Möhrle W.: *Erfahrungen mit theoretischen Modellen für Schallfeld- und Impulsverhalten beim Bau von Sonderprüfköpfen für die Ultraschallprüfung*, Konferenzbericht, DGZfP Dach-Jahrestagung, Luzern 1991
- [WÜS03] Wüstenberg, H., Schenk, G.: *Entwicklung und Trends bei der Anwendung von steuerbaren Schallfeldern in der ZfP mit Ultraschall*, Berichtsband 83-CD, DGZfP-Jahrestagung 2003,
<http://www.ndt.net/article/dgzfp03/papers/v56/v56.htm>

9 Formelzeichen

A	Abstand
D	Durchmesser der Apertur sowie Durchmesser des kreisförmigen Schwingers
D_B	Durchmesser des Schallbündels
D_S	Durchmesser des Schwingers
D_{KSR}	Durchmesser des Kreisscheibenreflektors
D_R	Durchmesser des Reflektors
D_{ZYL}	Durchmesser des Zylinders
G	Größe des Fehlers
H	Echoamplitude bzw. Echohöhe
H_0	Echoamplitude der Rückwand bei sehr kleinen Abständen dieser zum Prüfkopf
H_{RW}	Echoamplitude bzw. Echohöhe einer Rückwand
ΔH_u	Maße der Echohöhendifferenz zwischen einem Bezugsreflektor und einer Inhomogenität
$H(\theta)$	Faktor der Richtungsabhängigkeit des Schalldrucks (Richtcharakteristik)
$K(\alpha)$	Korrekturfaktor
N	Nahfeldlänge
N_S	Nahfeldlänge des Senders
$P(r)$	Schalldruck auf der Bündelachse
R	Radius der Richtcharakteristik
S	Fläche
S_E	Fläche des Empfängers

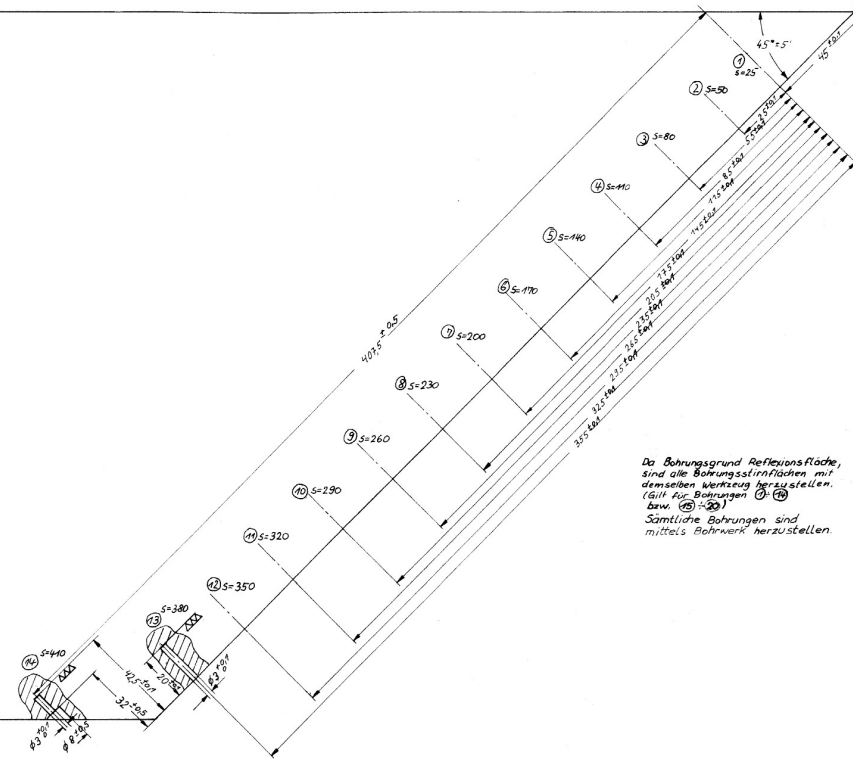
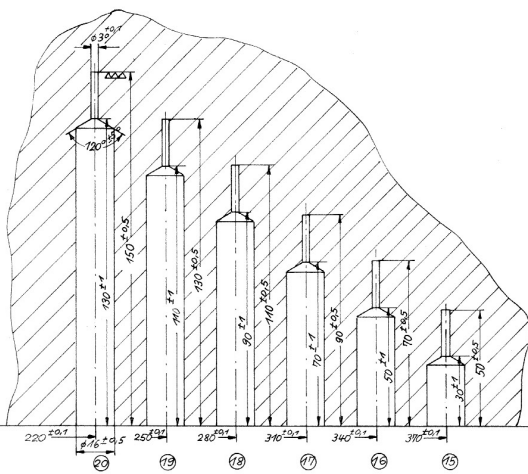
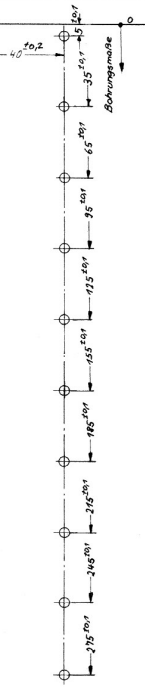
S_R	Fläche des Reflektors
S_S	Fläche des Senders
V	Verstärkung
$V_{5 \rightarrow 3}$	Verstärkungsdifferenz der Echoamplituden eines Kreisscheibenreflektors von 5 mm zu einem von 3 mm
$V_{FBB\ 3mm}$	Verstärkung eines Echosignals einer Flachbodenbohrung von 3mm bei definierter Bildschirmhöhe
V_u	Anzeigenverstärkung
V_r	Registrierverstärkung
$V_{ZYL\ 4mm}$	Verstärkung eines Echosignals einer querstehenden Zylinderbohrung von 4mm bei definierter Bildschirmhöhe
ΔV	Verstärkungsdifferenz
Z	Korrekturfaktor
a	Radius des kreisförmigen Schwingers sowie Länge der Rechteckseite ($a < b$)
a', a_{eff}	effektive Länge der Rechteckseite a
a_{KSR}	Radius des Kreisscheibenreflektors
b	Länge der Rechteckseite ($a < b$)
b', b_{eff}	effektive Länge der Rechteckseite b
c	Schallgeschwindigkeit
$c_{L,Tk}$	Schallgeschwindigkeit der Longitudinalwellen im Testkörper
$c_{T,Tk}$	Schallgeschwindigkeit der Transversalwellen im Testkörper
$c_{L,Plexi}$	Schallgeschwindigkeit der Longitudinalwellen in Plexiglas
f	Frequenz

f'	Mittenfrequenz
k	Wellenzahl
l_R	Länge des Reflektors
$p(r,\theta,t)$	komplexer Schalldruck
$p_E(r,\theta,t)$	komplexer Schalldruck am Empfänger
p	effektiver Schalldruck
p_{ref}	Referenzschalldruck
r	Abstand eines Punktes im Halbraum zum Schwingermittelpunkt
r'	Abstand eines Punktes im Halbraum zu einem Flächenelement
r_S'	Abstand eines Flächenelementes des Senders zu einem des Reflektors
r_E'	Abstand eines Flächenelementes des Reflektors zu einem des Empfängers
s	Schallweg
s_u	Schallweg der bewerteten Anzeige
t	Zeit
v_0	Amplitude bei $t = 0$
Δ	Abweichung
α	Einschallwinkel
β	Einfallswinkel und Keilwinkel
λ	Wellenlänge
θ	Divergenzwinkel
ρ	Schallschwächungskoeffizient
$\rho_{L,Tk}$	Schallschwächungskoeffizient des Testkörpers bei Longitudinalwellen

$\rho_{T,TK}$	Schallschwächungskoeffizient des Testkörpers bei Transversalwellen
τ	Laufzeit
ω	Kreisfrequenz

10 Anhang

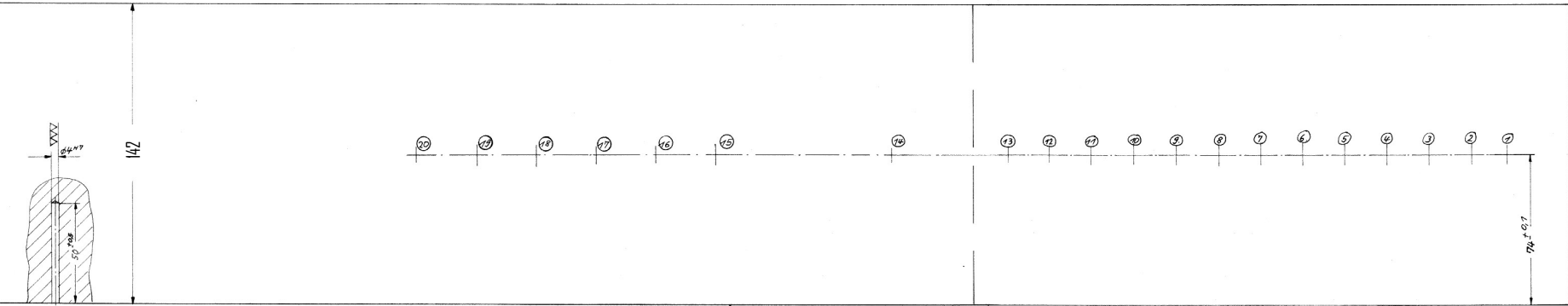
800 ± 0,5



Da Bohrungsgrund Reflexionsfläche, sind alle Bohrungsstirnflächen mit demselben Werkzeug herzustellen. (Gültig für Bohrungen 1-12) bzw. (13) ± 20' Sämtliche Bohrungen sind mittels Bohrwerk herzustellen

Bohrungsmaße

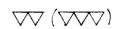
220 ± 0,1, 250 ± 0,1, 280 ± 0,1, 310 ± 0,1, 340 ± 0,1, 370 ± 0,1, 400 ± 0,1, 430 ± 0,1, 460 ± 0,1, 490 ± 0,1, 520 ± 0,1, 550 ± 0,1



Bohrungen senkrecht zur Oberfläche.

Grundfläche

Winkligkeit aller Seitenflächen zur Grundfläche 90° ± 5'



Objekt	Arbeits-Nr.	Tag	Name	Hersteller	Stück	Freigegeben	Werkstoff
				Berth 2.2.20.1/66		DM 7168 mittel	1:1
				Grüßler			
				BAM Berlin			
				Testkörper aus Stahl S2-3			
				Labor 6.24			
				45° Keilwinkel			
				f. Erdynamikmeßplatz			
							M2-01