

Dipl.-Ing. Frank Mielentz

**Einsatzpotenzial von laufzeitgesteuerten
Ultraschall-Gruppenstrahlern
an Betonbauteilen**

Die vorliegende Arbeit entstand an der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM).

Impressum

**Einsatzpotenzial von laufzeitgesteuerten
Ultraschall-Gruppenstrahlern an Betonbauteilen**

2007

Herausgeber:
Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)
Unter den Eichen 87
12205 Berlin
Telefon: +49 30 8104-0
Telefax: +49 30 8112029
E-Mail: info@bam.de
Internet: www.bam.de

Copyright © 2007 by Bundesanstalt für
Materialforschung und -prüfung (BAM)

Layout: BAM-Arbeitsgruppe Z.64

ISSN 1613-4249
ISBN 978-3-9811655-3-1

Einsatzpotenzial von laufzeitgesteuerten Ultraschall-Gruppenstrahlern an Betonbauteilen

vorgelegt von
Diplom-Ingenieur Frank Mielentz
aus Berlin

von der Fakultät IV - Elektrotechnik und Informatik
der Technischen Universität Berlin
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften
- Dr.-Ing. -

genehmigte Dissertation

Promotionsausschuss:

Vorsitzender:	Prof. Dr.-Ing. G. Mönich
Gutachter:	Prof. Dr.-Ing. R. Orglmeister
Gutachter:	Prof. Dr.-Ing. H. Wüstenberg
Gutachter:	Prof. Dr.-Ing. G. Mook

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 8. November 2006

Berlin 2006

D 83

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Angestellter in der Fachgruppe „Zerstörungsfreie Schadensdiagnose und Umweltmessverfahren“ der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM). Die wissenschaftliche Betreuung der Arbeit übernahm Herr Professor Dr.-Ing. H. Wüstenberg, ehemaliger Leiter der Fachgruppe „Zerstörungsfreie Prüfung; akustische und elektrische Verfahren“ der BAM. Ihm bin ich für seine Anregungen und intensiven sowie hilfreichen Diskussionen zu besonderem Dank verpflichtet.

Herrn Professor Dr.-Ing. R. Orglmeister, Leiter des Fachgebietes „Elektronik und medizinische Signalverarbeitung“ der TU Berlin danke ich für die Betreuung der Arbeit und die vielen konstruktiven Hinweise. Danken möchte ich auch Herrn Professor Dr.-Ing. G. Mook von der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, dass er sich freundlicherweise zur Übernahme der Begutachtung bereit erklärt hat.

Bei Herrn Dr. rer. nat. H. Wiggenhauser, dem Leiter der Fachgruppe und bei Herrn Dr. rer. nat. M. Krause, Leiter der Arbeitsgruppe „Bauwerksdiagnostik mit akustischen Verfahren“ der BAM bedanke ich mich, dass sie die Anfertigung der vorliegenden Arbeit im Rahmen des DFG-Forschungsvorhabens „Zerstörungsfreie Strukturbestimmung von Betonbauteilen mit akustischen und elektromagnetischen Echo-Verfahren“ förderten.

Besonderer Dank gebührt Herrn Dipl.-Phys. R. Boehm für die zahlreichen fruchtbaren Diskussionen über die Schallfeldberechnung mit der Punktquellensynthese und Herrn Dipl.-Ing. G. Schenk für die Unterstützung bei der Hardware-Entwicklung des Gruppenstrahlers (Fachgruppe „Zerstörungsfreie Prüfung; akustische und elektrische Verfahren“ der BAM).

Herrn Dr.-Ing. K. Mayer und Herrn Dr.-Ing. R. Marklein von der Universität Kassel, Fachgebiet „Theoretische Elektrotechnik“ danke ich für die Modellrechnungen der Schallfeldausbreitung mit dem EFIT-Algorithmus.

Schließlich danke ich im besonderen Maße meiner Lebensgefährtin Gaby Merzbach für die große Hilfe bei der Durchsicht und Korrektur der Niederschrift sowie meinen Eltern, die durch ihre Unterstützung mein Studium und damit auch diese Arbeit erst möglich gemacht haben.

Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis der Formelzeichen und Abkürzungen.....	9
1 Einleitung und Motivation.....	13
2 Einfluss der Betonzusammensetzung auf die Ultraschallausbreitung	18
3 Konzepte für den Einsatz der Ultraschallprüfung an Betonbauteilen	21
4 Laufzeitgesteuerte Gruppenstrahlertechnik für den Niederfrequenzbereich.....	31
4.1 Gesteuerte Fokussierung.....	31
4.2 Prüfköpfe für die Gruppenstrahlertechnik.....	34
4.3 Verzögerungszeiten der Schwingerelemente.....	38
4.4 Sendetechnik für den Gruppenstrahler	41
4.5 Optimierung des Prüfkopfaufbaus mit theoretischen Modellen	46
4.5.1 Schallfelder von Gruppenstrahlern im Fernfeld	48
4.5.2 Punktquellensynthese	52
4.5.2.1 Akustisches Anregungssignal und Schallfeldprofil.....	59
4.5.2.2 Reihenanzordnung der Prüfköpfe.....	61
4.5.2.3 Versetzte Anordnung der Prüfköpfe.....	68
4.5.3 Elastodynamische Finite Integrationstechnik (EFIT).....	74
4.5.4 Fazit der Modellrechnungen	77
5 Überprüfung der Modellrechnungen durch praktische Messungen	78
5.1 Orientierende Messung.....	78
5.2 Messtechnik eines Laservibrometers	81
5.2.1 Messprinzip	82
5.2.2 Messgenauigkeit des Messsystems	83
5.3 Visualisierung der Schallausbreitung	88
5.4 Gruppenstrahler-Schallfeldprofile.....	98
5.4.1 Modellierung.....	98
5.4.2 Messung der Schallfeldprofile	101
5.4.2.1 Betontestkörper mit 8 mm Größtkorn.....	102
5.4.2.2 Betontestkörper mit 16 mm Größtkorn.....	104
5.4.3 Bemerkungen zu den Messungen der Schallfeldprofile.....	106
5.5 Amplitudenquerverteilung des Schallbündels	109
6 Praktisches Beispiel einer Hüllrohrortung im Beton.....	111
7 Diskussion der Ergebnisse	118

8 Zusammenfassung	120
9 Anhang	122
9.1 Wellenarten	122
9.2 Ebene Wellen an Grenzflächen	125
9.3 Ultraschall-Niederfrequenz-Prüfköpfe	126
9.4 Schallfelder von Prüfköpfen	134
9.5 Fokussierte Schallfelder	139
9.6 Schalldruckverlauf auf der Gruppenstrahlerachse	145
9.7 Punktrichtwirkungen	147
10 Literatur	149

Verzeichnis der Formelzeichen und Abkürzungen

a	Abstand der Schwingerelemente
A	Amplitude, Pegel in dB
b	Elementbreite
B	Bandbreite
c_L, c_T	Schallgeschwindigkeit (Longitudinal- bzw. Transversalwellen)
C	Kombinationen
d	Prüfkopfdurchmesser
d_P	Plattendicke, Schwingerdicke
D	Durchlässigkeitsfaktor
E	Elastizitätsmodul
f	Frequenz
Δf	Abstand der Spektrallinien
f_{gu}	untere Grenzfrequenz
f_{go}	obere Grenzfrequenz
f_{ak}	akustischer Fokus
f_{geom}	geometrischer Fokus, Punktfokus
f_0	Prüfkopf-Grundresonanz, Eigenfrequenz
f_m	Mittelfrequenz
F	Kraft
G	Schubmodul
$H[x(t)]$	Hilbert-Transformation
i	Anzahl, Index
j	imaginäre Einheit
J	Schalleistungsdichte (Intensität)
$J_1(x)$	Besselfunktion 1. Gattung 1. Ordnung
K	Fokussierungsgrad
k	Wellenzahl, Anzahl, Index
m, n	Anzahl, Index
$\binom{n}{k}$	Binominalkoeffizient
N	Nahfeldlänge

p	Schalldruck
P	Schalleistung
q	Querverschiebung
R	Reflexionsfaktor
$R(\alpha), R(\varphi)$	Punktrichtwirkung, Richtcharakteristik
s	Abstand von der Prüfkopfachse
$s(t)$	Zeitsignal
S	Nutzsignal
$\underline{S}(f)$	Fourier-Transformierte
t_v	Verzögerungszeit
T	Periodendauer
T_i	Impulsdauer
U_{th}	Schwellenspannung
v	Schallschnelle
$x(t)$	reelle Funktion
z	Tiefe, Prüfkopfabstand
Z	Schallwellenwiderstand
$\Gamma(x)$	Gammafunktion
$\sum_{i=1}^n$	Summe, Laufindex i von 1 bis n
$\iint_A dA$	Flächenintegral
$\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial^2}{\partial x^2}$	Bildung der ersten bzw. zweiten partiellen Ableitung
$grad$	Gradient eines skalaren Feldes
div	Divergenz eines Vektorfeldes
rot	Rotation eines Vektorfeldes
$\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$	Laplace-Operator
\underline{z}	komplexe Zahl
\bar{a}, \bar{b}	Vektor
$\alpha, \beta, \gamma, \phi$	Winkel

δ	Phasendifferenz
ϑ	Schwenkwinkel
λ	Wellenlänge; Lamésche Konstante
μ	Lamésche Konstante
ξ	Teilchenauslenkung
ρ	Dichte
σ	Störsignal, Poissonsche Konstante
τ	Zeitkonstante
φ	Phasenwinkel
ω	Kreisfrequenz

1 Einleitung und Motivation

Der Massenwerkstoff Beton ist in den letzten Jahren zu einem Hightech-Werkstoff für den Einsatz an immer anspruchsvolleren und höher belasteten Konstruktionen weiterentwickelt worden. Aus Gründen der Sicherheit und Wirtschaftlichkeit werden zunehmend zerstörungsfreie Prüfverfahren eingesetzt, um zum Teil schon bei der Erstellung neuer Bauwerke die Qualität der Bauausführung sicherzustellen. Beispielsweise hat das Bundesministerium für Verkehr, Raum und Wohnen 2001 eine Vorschrift erlassen, neue Tunnelinnenschalen vor der Bauabnahme zerstörungsfrei zu prüfen [10], [25].

Für Prüfungen an Industrie- und Immobilienbauten, an Ingenieurbauwerken der Infrastruktur, wie z. B. Brücken, Straßen und feste Fahrbahnen für Hochgeschwindigkeitsstrecken der Eisenbahn werden Verfahren benötigt, mit denen sich der Bauwerkszustand zerstörungsfrei erfassen lässt. Bedarf besteht insbesondere an Prüfverfahren, mit denen die innere Struktur von Betonbauteilen, sowohl bei bestehenden Bauwerken als auch bei der Bauausführung untersucht werden kann [10], [25].

Bei den Inspektionen kommen zurzeit fast ausnahmslos visuelle Methoden zum Einsatz, mit dem Nachteil, dass die Schäden meist ein fortgeschrittenes Stadium erreicht haben, bevor sie, von außen sichtbar, entdeckt werden können. Wünschenswert sind zerstörungsfreie Prüfverfahren, mit denen im Rahmen der Inspektionen auch von außen nicht sichtbare Fehler am Bauwerk festgestellt werden können, bevor diese zu schwerwiegenden Bauwerksschäden führen [25].

Die Ultraschallprüfung gehört heute zu den klassischen zerstörungsfreien Prüfverfahren, die auch im Bauwesen angewendet werden. Allerdings sind die weit entwickelten Verfahren und die Gerätetechnik für die zerstörungsfreie Prüfung von metallischen Werkstoffen mit dem Frequenzbereich von in der Regel 1 MHz bis 10 MHz nicht ohne erhebliche Modifikationen auf Betonbauteile zu übertragen [10], [11], [12]. Beton ist ein Gemenge aus mineralischen Stoffen, üblicherweise mit Gesteinskörnern bis zu 32 mm Durchmesser. Um den Widerstand von Festbeton im Außenbereich gegenüber Frost-Tau-Wechseln zu erhöhen, werden häufig Luftporen durch Zusatzmittel bei der Herstellung im Beton erzeugt [7], [66]. Dieses Gefüge führt bei der Ultraschallprüfung eines Betonbauteils mit der Impuls-Echo-Methode zu starken

Streuungen und damit sowohl zur Schwächung des Ultraschalls im Werkstoff als auch zu Störanzeigen am Bildschirm eines Ultraschallgerätes.

Die Quellen von Störanzeigen für die Impuls-Echo-Methode können sowohl im Volumen als auch im Oberflächenbereich des Bauteils liegen. Im Bauteilvolumen führen Longitudinal- und Transversalwellen zu Streuungen an Korngrenzen, dagegen sind die Störanzeigen aus der Oberfläche in erster Linie durch Oberflächen- oder Rayleighwellen und deren Wechselwirkungen mit Oberflächenstrukturen wie Welligkeit, Rauigkeit und Kornstruktur bedingt. Durch eine Verkleinerung der Prüffrequenz lassen sich die Streueinflüsse vermindern, was zu den im Bauwesen üblichen Prüffrequenzen von 20 kHz bis 200 kHz mit Wellenlängen zwischen 20 mm und 200 mm führt. Gegenüber der zerstörungsfreien Prüfung von metallischen Werkstoffen mit Wellenlängen üblicherweise zwischen 0,6 mm und 6 mm hat dies bei der Betonprüfung eine wesentlich schlechtere Auflösung zur Folge [48].

Diese Probleme haben dazu geführt, dass die Ultraschallprüfung im Bauwesen bis in die frühen 90er Jahre kaum über die üblichen Laufzeit- bzw. Schallgeschwindigkeitsmessungen zur Überprüfung der allgemeinen Betonqualität hinauskam. Wegen des geringen Ortungsvermögens der Prüfgeräte war eine individuelle Fehlersuche, z. B. der Nachweis von Rissen, nicht möglich. Während man für eine einfache Laufzeitmessung zwischen zwei Orten mit quasi punktförmigen Schallquellen und Empfängern, die kaum eine Richtwirkung haben, arbeiten kann, benötigt man für ein Impuls-Echo-Verfahren mit verbesserter Ortung gerichtete Schallsender und -empfänger. Wichtige Prüfaufgaben für ein derartiges Impuls-Echo-Verfahren wären die Untersuchung der Bauteilgeometrie bei einseitiger Zugänglichkeit, die Ortung und Lagebestimmung von Einbauteilen, die Untersuchung von mehrschichtigen Systemen, die Detektion von Verdichtungsmängeln, die Rissdetektion und -charakterisierung und bei Spannbeton-Bauwerken das Erkennen ungenügender Verpressung von Spannkämen.

Um nun trotz der Einschränkungen die Impuls-Echo-Prüfung auch an Betonbauteilen anzuwenden, verfolgt man unterschiedliche Strategien. Ein Ansatz, die Störanzeigen bei einer Impuls-Echo-Prüfung zu verkleinern, besteht darin, das untersuchte Volumen im Beton sowohl in Richtung der Schallbündelachse als auch senkrecht zu ihr einzugrenzen. Hierzu kann man an mehreren Stellen eingreifen.

Eine gangbarer Weg zur Verringerung der streuungsbedingten Störanzeigen ist, die Interferenzmöglichkeit (die sog. "Interferenzlänge") durch kurze Ultraschallimpulse zu

beschränken. Sind die Impulse sehr kurz, können sie nach Reflexionen an Störstellen in unterschiedlichen Entfernungen nicht mehr positiv miteinander interferieren.

Die zweite Möglichkeit ergibt sich durch gebündelte Schallfelder mit kleinerem Öffnungswinkel, die nur begrenzte Volumenbereiche erfassen und dadurch mögliche Störechos aus anderen Bereichen unterdrücken [16], [67].

Da der Öffnungswinkel eines Ultraschallprüfkopfes vom Verhältnis der Wellenlänge zum Durchmesser abhängt, muss man im Interesse eines möglichst kleinen Bündeldurchmessers versuchen, den Prüfkopfdurchmesser zu vergrößern. Im Ultraschall-Niederfrequenzbereich werden zurzeit hauptsächlich Prüfköpfe mit direktem Kontakt zum Prüfobjekt verwendet, bei denen die Ultraschallwellen senkrecht zur Prüfkörperoberfläche in den Prüfling eindringen (0° Einschallwinkel). Solche Prüfköpfe werden in der Werkstoffprüfung als Normal- oder Senkrechtprüfköpfe bezeichnet. Je nach Oberflächenbeschaffenheit des Festbetons kann aber der Aufwand für das Ankopeln größerer Prüfköpfe auf der Betonoberfläche sehr unterschiedlich sein. Je größer der Prüfkopfdurchmesser ist, desto schwieriger wird es, eine gleichmäßige und reproduzierbare Ankopplung des Prüfkopfes zu erreichen. Die Ankopplung und Handhabung beschränken daher die Durchmesser der Einzelprüfköpfe auf 50 mm bis 100 mm. Bei Verwendung üblicher Niederfrequenz-Prüfköpfe mit einem Durchmesser unter 60 mm zur Untersuchung von Betonbauteilen liegt das Verhältnis des Schwingerdurchmessers zur Wellenlänge nahe bei eins. Dies führt zu einer Abstrahlcharakteristik mit nur schwach ausgeprägter Richtwirkung bei den Longitudinalwellen und zudem zur ausgeprägten Abstrahlung von Transversal- und Rayleighwellen. Bei der Ultraschallprüfung insbesondere im Impuls-Echo-Betrieb kommt es aus all diesen Gründen zu Störanzeigen aus unbekannter Richtung, die die Ortung von Einzelfehlern im Echoverfahren kaum zulassen. Daher wendete man früher, als noch keine weiterentwickelten Prüfverfahren, -Geräte sowie Auswertetechniken für das Bauwesen verfügbar waren, die Ultraschallprüfung an Betonbauteilen i. d. R. nur mit zwei Prüfköpfen in Impulsdurchschallung an.

Da man also aus praktischen Gründen auf kleine Prüfkopfgrößen beschränkt ist, muss man versuchen, größere effektive Durchmesser für schmale Schallbündel im Betonbauteil auf andere Weise zu realisieren.

Dazu kann man einen bestimmten Bereich der Prüfobjekt-Oberfläche – die Apertur – mit einem Prüfkopf abtasten und die Signale der einzelnen Positionen speichern oder mehrere gleichzeitig angekoppelte einzelne Prüfköpfe zu einer Strahlergruppe kom-

binieren. Die Signale von den Prüfkopfpositionen in der Apertur oder die Signale der Einzelprüfköpfe können direkt oder nach geeigneten Algorithmen (z. B. nach dem sog. SAFT-Verfahren, Synthetic Apertur Focusing Technique) überlagert werden. Allein schon bei der direkten Addition kommt es durch Beugungseffekte (d. h. durch die natürliche Nahfeldeinschnürung des Schallbündels) zu einer gewissen Fokussierung des Schallfeldes. Damit verbunden sind eine Erhöhung des Schalldruckes im Fokusbereich und ein besseres seitliches Auflösungsvermögen.

Zwischen beiden Extremen der Apertur-Vergrößerung, der sequentiellen Abtastung einer Apertur mit einem Einzelprüfkopf oder der Ankopplung einer die Apertur abdeckenden Strahlergruppe bestehend aus mehreren Einzelprüfköpfen, gibt es diverse Zwischenstufen, die je nach Anwendungssituation hinsichtlich der Zeit und dem Geräteaufwand optimiert werden können. Während sich in der Ultraschallprüfung an metallischen Werkstoffen seit ca. 1985 und in der Medizin schon seit 1968 [69] unter der Bezeichnung „Phased Array“ eine laufzeitgesteuerte Gruppenstrahlertechnik mit speziellen Gruppenstrahler-Prüfköpfen und einer besonderen Gerätetechnik durchgesetzt hat, was der oben erwähnten Strahlergruppe im Wesentlichen entsprechen würde, ist der Vorteil einer ähnlichen, reinen Gruppenstrahlertechnik im Bauwesen nicht so klar. Entsprechend zögerlich kommt auch die Entwicklung geeigneter Gruppenstrahlergeräte voran [1], [44]. Die Schallfeldbeeinflussung durch zeitlich gesteuerte Anregung einzelner Schwingerelemente einer Strahlergruppe erscheint sinnvoll, erfordert aber einen erheblichen gerätetechnischen Aufwand. So kann man z. B. durch zunehmende zeitlich verzögerte Anregung der einzelnen Schwingerelemente einer Strahlergruppe das Schallbündel von der Normaleinschallung ablenken. Durch eine gekrümmte Verteilung der Verzögerungszeiten zwischen den einzelnen Elementen kann man auf unterschiedliche Tiefen fokussieren. Dabei wird die Krümmung eines fokussierenden Prüfkopfes in eine äquivalente Verzögerungszeitfunktion umgerechnet, die man bei der Anregung der Schwingerelemente berücksichtigt. Letztendlich sind all diese Schallfeldsteuerungsansätze in ihrer prüftechnischen Konsequenz auch per Software (SAFT) mit Abtastsystemen realisierbar. Daher muss in der Praxis vor dem Hintergrund des für die Ankopplung einer Strahlergruppe an einer bestimmten Position immer erforderlichen erheblichen Zeitaufwandes entschieden werden, ob im Einzelfall die in einer elektronischen Steuerung mit digitaler Messdatenverarbeitung gegebenen Möglichkeiten nur auf die Anwendung von SAFT beschränkt werden sollen. Die Möglichkeiten können auch soweit ausgenutzt werden, dass der von einer

Position aus erfasste Volumenbereich sowohl durch Fokussierung auf unterschiedliche Tiefenbereiche als auch durch Bündelschwenk vorgegeben wird. Dies kann die Prüfleistung pro Ankopplung einer Strahlergruppe deutlich erhöhen und eine Zeiterparnis ergeben.

Allen Ansätzen zur Aperturvergrößerung ist aber eine Grundsatzfrage gemein, die mit den Ausbreitungsbedingungen des Ultraschalls im Beton zusammenhängt. Ist die Ausprägung der von den Einzelprüfköpfen ausgehenden Wellenfronten im Beton auch bei größeren Schalllaufwegen noch so deutlich, dass damit eine auf Interferenz beruhende Schallfeldsteuerung z. B. durch entsprechende Anregungszeitverzögerung zwischen den Einzelprüfköpfen einer Strahlergruppe möglich ist? Da diese Frage nur durch den Bau und die Anwendung einer realen Strahlergruppe entsprechend dem Gruppenstrahlerkonzept zu klären ist, hat sich die vorliegende Arbeit auf die Untersuchung der physikalischen und technischen Grundlagen einer Gruppenstrahlertechnik an Beton konzentriert.

Über den praktischen Einsatz von laufzeitgesteuerten Gruppenstrahlern zur Untersuchung von Bauteilstrukturen aus Beton mit praxisüblichen Abmessungen und Betonrezepturen gibt es noch keine Erfahrungen. Ziel der Arbeit ist es, die physikalisch-technischen Randbedingungen für den Einsatz von laufzeitgesteuerten Ultraschall-Gruppenstrahlern an Betonbauteilen zu untersuchen. Es wird einerseits der grundsätzlichen Frage nachgegangen, ob die Steuerung von Schallfeldern im Werkstoff Beton möglich ist und andererseits welche Voraussetzungen zum erfolgreichen Einsatz beachtet werden müssen.

Dazu werden unterschiedliche Konzepte der Ultraschallprüfung an Betonbauteilen vorgestellt und bewertet. Speziell werden die verschiedenen Varianten der Aperturtechniken aufgezeigt und die unterschiedlichen Ausführungsstufen von der synthetischen Apertur bis hin zum laufzeitgesteuerten Gruppenstrahler unter Berücksichtigung der Praxistauglichkeit bei Anwendung im Bauwesen untersucht. Die Umsetzung der verschiedenen Ausführungen erfordert einen unterschiedlich hohen Aufwand an Gerätetechnik, der für den praktischen Einsatz optimiert werden kann. In der vorliegenden Arbeit münden die Untersuchungen in die Entwicklung eines laufzeitgesteuerten Gruppenstrahlers, dessen eigentliche Aufgabe es war, die theoretischen Ergebnisse vor allem zur Schallfeldausbildung experimentell zu verifizieren. Dass das entwickelte Gerät daneben auch durchaus Praxistauglichkeit aufweist, haben die im Zuge dieser Arbeit durchgeführten Messungen gezeigt.

2 Einfluss der Betonzusammensetzung auf die Ultraschallausbreitung

Beton ist durch seine gute Formbarkeit bei der Verarbeitung und seine hohe Witterungs- und Frostbeständigkeit vielfältig als Baustoff einsetzbar. Nachfolgend wird auf die Zusammensetzung und Herstellung von Beton eingegangen, um deren besonderen Einfluss auf die Ultraschallausbreitung zu erläutern.

Bei der Herstellung werden Zement als hydraulisches Bindemittel sowie Wasser und Gesteinskörner unterschiedlicher Größen gemischt. Zusätzlich können durch Beimengung von Betonzusatzmitteln die Eigenschaften des Frisch- oder Festbetons, wie z. B. die Verarbeitbarkeit oder der Luftgehalt verändert werden. Nach Vermischung der Bestandteile erhärtet der Beton durch Hydratation (chemische Reaktion des Zements mit Wasser). Die Eigenschaften der Gesteinskörner, wie z. B. Kornform, Eigenfestigkeit und Frostbeständigkeit, haben großen Einfluss auf die Betongüte. Mit einem Siebsatz kann die Kornzusammensetzung beurteilt und durch sog. Sieblinien dargestellt werden. Optimale Kornmischungen erreichen eine hohe Raumauffüllung der Gesteinskörner und damit eine für die geforderte Betonfestigkeit möglichst geringe Bindemittelmenge. **Abb. 1** zeigt ein Beispiel einer Sieblinie mit einem 16 mm Größtkorn. Die Sieblinie und damit das Größtkorn hat direkten Einfluss auf die Ultraschallausbreitung, insbesondere auf die Stärke der Streuung der Ultraschallwellen an den Gesteinskörnern. Die Wahl des Größtkorns ist abhängig von der eingesetzten Förderung und Verarbeitung des Betons, von den Bauteilabmessungen und beim bewehrten Beton vom Bewehrungsabstand [7], [32], [66].

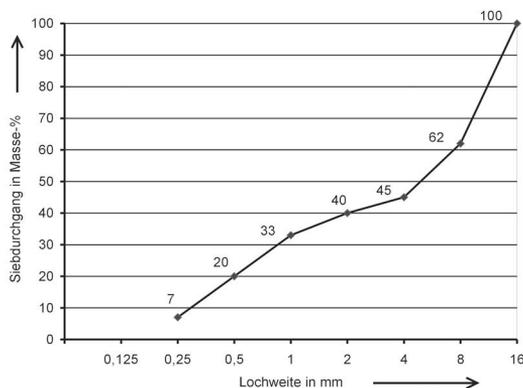


Abb. 1: Beispiel einer Sieblinie eines Korngemisches mit einem Größtkorn von 16 mm nach [66].

Fast ausschließlich wird bewehrter Beton, sog. Stahlbeton oder Spannbeton eingesetzt, weil Beton ohne Bewehrung eine geringe Zugfestigkeit aufweist. Als Verbundwerkstoff kann Beton Druckspannungen aufnehmen, dagegen werden Zugspannungen vom Stahl aufgenommen. Insbesondere engliegende Bewehrung hat beträchtlichen Einfluss auf die Schallausbreitung. Da an der Grenzfläche zwischen Beton und Stahl große Unterschiede des akustischen Wellenwiderstandes vorliegen, wird ein Großteil der Energie reflektiert bzw. gestreut (s. Anhang 9.2).

Der Frischbeton enthält luftgefüllte Hohlräume, die durch Verdichtung so weit wie möglich entfernt werden müssen, weil ansonsten die angestrebten Eigenschaften wie z. B. hohe Festigkeit und Wasserundurchlässigkeit nicht erreicht werden. Trotz intensiver Verdichtung lässt sich ein Rest an Luftporen nicht beseitigen. Dieser Luftgehalt führt ebenfalls wegen des Sprunges der akustischen Widerstände an der Grenzschicht zu Streuungen der Ultraschallwellen. Theoretische Untersuchungen mit EFIT zeigten, dass die Longitudinalwellengeschwindigkeit mit steigendem Luftporengehalt immer kleiner wird, während das Rauschen zunimmt [18].

Die wichtigsten Messgrößen einer Ultraschallprüfung sind die Impulslaufzeit und die Ultraschallsignalamplitude. Der Abfall der Signalamplitude wird durch Reflexionsverluste, geometrische Ausbreitungsverluste und die Schallschwächung im Werkstoff hervorgerufen.

Unter Reflexionsverlusten versteht man die Verminderung der angezeigten Ultraschallamplitude durch die Reflexion der Ultraschallwellen an Grenzflächen zwischen zwei Stoffen. Geometrische Ausbreitungsverluste sind bedingt durch die Divergenz realer Prüfköpfe. Mit zunehmendem Abstand vom abstrahlenden Prüfkopf weitet sich das Schallbündel auf und der Schalldruck nimmt im Fernfeld umgekehrt proportional zur Entfernung ab. Ursachen für die Schallschwächung im Werkstoff sind Absorption und Streuung der Schallenergie. Absorption ist die direkte Umsetzung von Ultraschallenergie in Wärme und nimmt in der Regel proportional mit der Frequenz zu. Streuung beruht auf Unterschieden der Dichte oder der Schallgeschwindigkeit an Korngrenzen oder Einschlüssen [23]. Untersuchungen zur frequenzabhängigen Schallschwächung an einem 500 mm dicken Betontestkörper mit einem Größtkorn von 8 mm ergab beispielsweise eine normierte Ultraschallamplitude von $29,77 \cdot 10^{-3}$ ($\approx -30,5$ dB) für eine Prüffrequenz von 100 kHz. Bei einer Prüffrequenz von 200 kHz betrug die Amplitude bei derselben Betondicke auf Grund der frequenzabhängigen Schallschwächung $886 \cdot 10^{-6}$ ($\approx -61,0$ dB) [50].

Schallschwächung durch Streuung kann im Gegensatz zur Absorption nicht durch eine höhere Sendespannung oder Verstärkung ausgeglichen werden, weil dadurch außer den gewünschten Fehleranzeigen im Ultraschall-A-Bild wiederum auch die durch die Streuung (Kornrauschen) verursachten Störanzeigen größer werden. Durch eine Verminderung der Messfrequenz lassen sich die Streueinflüsse verkleinern, was aber auf Kosten der Auflösung geht.

Oberflächen- oder Rayleigh-Wellen sind elliptisch polarisiert und haben eine Eindringtiefe in den Werkstoff, die in der Größenordnung einer Wellenlänge liegt. Die Geschwindigkeit ist etwas kleiner als die der Transversalwellen [23]. Ein starker Oberflächenwellenanteil macht sich bei einer Messung oft störend bemerkbar, weil er an den vielen Oberflächenstörungen – Poren, Riefen etc. – gestreut wird und zum Prüfkopf zurückkehrt und dabei möglicherweise ein Fehlerecho überdecken kann. Dies gilt auch für die Messung mit einem einzelnen Normalprüfkopf, dessen Oberflächenwellen zu Streuungen an Korngrenzen führen, die sich mit dem Empfangssignal überlagern. Dies führt dazu, dass bei der Messung an einem Betonbauteil mit einem gängigen Ultraschallprüfkopf in einem einzelnen Ultraschall A-Bild oft keine deutlichen Signalreflexionen erkennbar sind. Die Auswertung der klassischen Impuls-Echo-Prüfung ist daher erheblich erschwert, was zu speziellen Verfahrensmodifikationen für Ultraschallprüfungen im Bauwesen geführt hat.

3 Konzepte für den Einsatz der Ultraschallprüfung an Betonbauteilen

Für die Prüfung von Betonbauteilen gibt es zurzeit relativ wenige geeignete kommerzielle Ultraschallgeräte. Wegen des Betongefüges ist der Einsatz von ausgereifter Gerätetechnik aus anderen Bereichen der zerstörungsfreien Prüfung nicht möglich. Die Forderung nach niedrigen Prüffrequenzen hat zu speziellen Prüfkopfentwicklungen und damit verbunden zu Entwicklungen von geeigneten Ultraschallsendern und Empfangsverstärkern geführt. Aber auch der Einsatz eines gut funktionierenden Ultraschall-Niederfrequenz-Prüfgerätes an Betonbauteilen ist wegen des inhomogenen Gefüges ohne ein geeignetes Auswerteverfahren nur eingeschränkt erfolgreich.

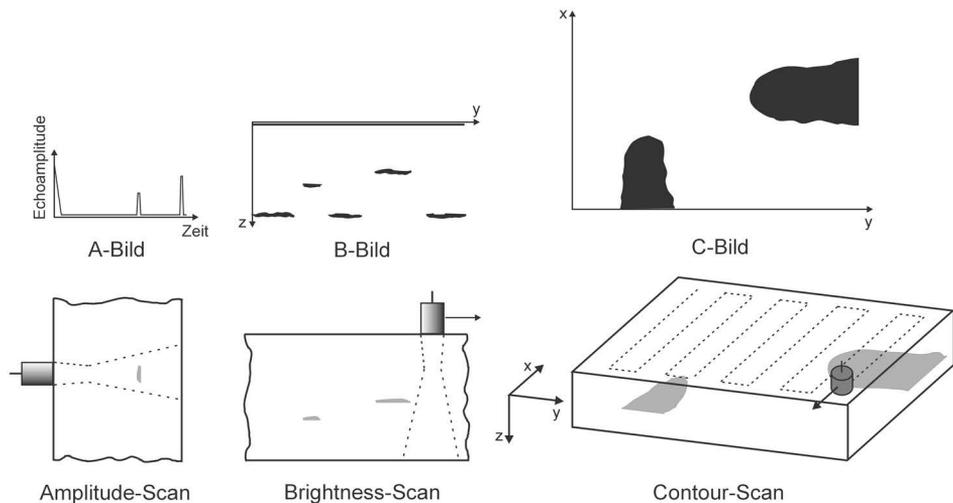


Abb. 2: Abtastverfahren und Bilddarstellungen nach [23].

Das Ergebnis einer einzelnen Ultraschallmessung mit einem Prüfkopf im Impuls-Echo-Verfahren ist ein Zeitsignal mit Echo-Impulsen, das sog. A-Bild, deren Amplitude dem Schalldruck proportional ist (s. **Abb. 2**). Bei Prüfgeräten werden oft die Zeitsignale vor der Bildschirmdarstellung gleichgerichtet und gefiltert bzw. wird rechnerisch die Einhüllende des Signals gebildet. Bei einer Prüfung an Beton wird manchmal nur durch Verschieben der Prüfköpfe die Bestimmung eines Fehler- oder Rückwandechos möglich, weil beim Verschieben das Rückwandecho konstant bleibt,

sich aber die Störechos durch Kornrauschen zeitlich und in ihrer Amplitude ändern. Um dies zu nutzen und dadurch die Aussagesicherheit bei Strukturuntersuchungen von Betonbauteilen zu verbessern, tastet man mit einem Sende-Empfangs-Prüfkopf die Oberfläche des Prüflings entlang einer Linie oder innerhalb einer Fläche ab. Die Darstellung erfolgt durch Aneinanderreihung der einzelnen A-Bilder zum sog. B-Bild (Brightness), bei dem die y-Achse der Prüfkopfverschiebung entspricht und die z-Achse die Laufzeit bzw. umgerechnet die Reflektortiefe angibt. Bei einer zweidimensionalen Abtastung des Bauteils können aus den A-Bildern sog. C-Bilder (Contour), das sind Aufsichtsbilder in Schnitten parallel zur Oberfläche, abgeleitet und dargestellt werden. Diese Bildarstellungsmethoden nutzen lediglich die Kontextinformation in einer Zusammenschau vieler A-Bilder zur besseren Interpretation des Prüfergebnisses, sie verbessern aber nicht das Signal/Rausch-Verhältnis.

Im Folgenden werden Wege zur Reduktion der Störsignale bei der niederfrequenten Ultraschallprüfung aufgezeigt, wobei insbesondere auf den Beitrag vergrößerter Aperturen z. B. unter Einsatz von laufzeitgesteuerten Gruppenstrahlern bei der Prüfung von Betonbauteilen eingegangen wird. Die laufzeitgesteuerte Gruppenstrahlertechnik ist für Anwendungen im Bauwesen ein neuartiges Konzept und wird im Kapitel 4 ausführlicher dargestellt.

Um Störsignale, die durch Kornrauschen verursacht werden, zu minimieren, verfolgt man unterschiedliche Strategien. Eine Möglichkeit zur Verbesserung des Signal-Rausch-Abstandes besteht in der Beschränkung der Interferenzlänge der Ultraschallimpulse durch breitbandige Prüfköpfe mit kurzen Impulsen. Eine weitere Möglichkeit ist die Begrenzung des untersuchten Volumenbereiches durch schärfere Bündelung oder Fokussierung des Schallfeldes (s. **Abb. 3**); eine Maßnahme, die auch für die Ortung beim Nachweis von Einzelfehlern erforderlich ist.

Eine höhere Bündelung oder Fokussierung des Schallfeldes im Bauteil kann durch verschiedene Messverfahren erreicht werden. Die unterschiedlichen Ausführungen, die sich erheblich im Aufwand an Gerätetechnik unterscheiden, werden nachfolgend diskutiert.

Um trotz des durch Ankoppelschwierigkeiten begrenzten Durchmessers eines einzelnen Prüfkopfes ein besseres Abstrahlungsverhalten zu erzielen, wird die Apertur real oder synthetisch vergrößert.

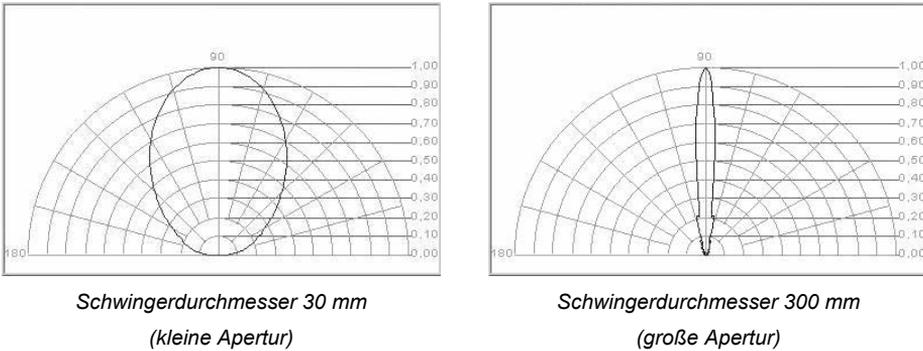


Abb. 3: Berechnung der Richtcharakteristiken für Prüfköpfe mit unterschiedlichen Schwingerdurchmessern im Fernfeld bei harmonischer Anregung (Longitudinalwellen). Der Prüfkopf mit dem größeren Schwingerdurchmesser (große Apertur) hat ein für die Ultraschallprüfung besseres Abstrahlungsverhalten (scharf gebündelte Schallstrahlen im Fernfeld).

Für die Dickenbestimmung von Betonbauteilen mit einseitiger Zugänglichkeit wurde die synthetische Aperturvergrößerung entsprechend dem SAFT-Prinzip (Synthetic Aperture Focussing Technique) schon oft erfolgreich angewendet. Dabei muss man ein, zwei oder mehrere Prüfköpfe in einzelnen Positionen mühevoll von Hand ankopeln. Für eine ausreichend genaue Dickenmessung sind je nach Betonbauteil erfahrungsgemäß 40 bis 100 unterschiedliche Prüfkopfpositionen notwendig, was bei rauen Bauteiloberflächen sehr zeitaufwendig ist.

Abb. 4 zeigt das Verfahren schematisch, bei dem eine Apertur manuell mit einem oder zwei Prüfköpfen abgetastet wird. In der Abbildung deuten die Pfeile unter den Prüfköpfen an, ob der Prüfkopf als Sender oder Empfänger oder gleichzeitig als Sender und Empfänger arbeitet. Eine durchbrochene Linie eines Pfeils oder eines Prüfkopfes soll eine sequentielle Arbeitsweise andeuten.

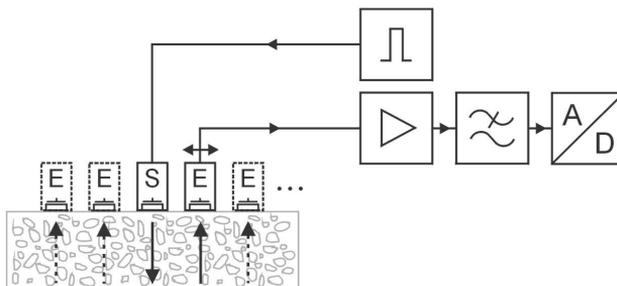


Abb. 4: Blockschaltbild einer Ultraschall-Messapparatur für Impuls-Echo-Messungen nach dem Prinzip der synthetischen Apertur. Die Pfeile deuten die sequentielle Arbeitsweise an. Die Position des Empfangsprüfkopfes wird verändert, während die Sendeposition im Bild fest bleibt.

Für die Messdatenaufnahme nach Abb. 4 bedeutet dies, dass ein feststehender Ultraschall-Prüfkopf als Sender arbeitet und ein zweiter Prüfkopf sequentiell in verschiedene Positionen auf der Bauteiloberfläche angekoppelt wird, in der jeweils die Ultraschallsignale empfangen werden. Die Signale stehen, nachdem sie verstärkt und digitalisiert wurden, zur weiteren Verarbeitung zur Verfügung. Im einfachsten Fall werden die Messsignale aufsummiert. Aufwendigere Möglichkeiten sehen vor, die Messsignale lauffzeitkorrigiert zu überlagern oder eine Rekonstruktionsrechnung nach dem SAFT-Verfahren durchzuführen [26], [51]. Für die Rekonstruktionsrechnung des SAFT-Verfahrens werden die HF-A-Bilder mit den Daten der zugehörigen Prüfkopfposition benötigt. Der Prüfkörper wird rechnerisch in kleine würfelförmige Elemente, sog. Voxel, unterteilt, die bei der Rekonstruktion im Rechner nacheinander als mögliche Streuer betrachtet werden. Dazu werden für jedes Voxel die dazugehörigen A-Bilder der verschiedenen Sende- und Empfangspositionen amplituden- und phasenrichtig zugeordnet und überlagert. Für die Positionen tatsächlicher Reflektororte überlagern sich die einzelnen Echoamplituden konstruktiv und man erhält im Vergleich zu Orten ohne Reflektoren große Amplitudenwerte. Durch das Aufsummieren der Signale ergibt sich auch eine Zeitbereichsmittelung, die das Signal-Rauschverhältnis verbessert; das Schallfeld wird rechnerisch auf bestimmte Bereiche im Prüfkörper fokussiert. Mit dem SAFT-Verfahren werden im Prinzip rechnerisch große Prüfköpfe mit fokussierender Linse nachgebildet [43]. Wird ein größerer Messbereich abgetastet, können aus dem A-Bild-Datensatz Schnittbilder, B- und C-Bilder erzeugt werden. Dies gilt sowohl für die Rohdaten als auch für die Daten der SAFT-Rekonstruktion.

Eine Messung nach dem Prinzip der synthetischen Apertur kann bereits mit einem einfachen kommerziellen Ultraschallgerät erfolgen, das die Möglichkeit bietet, die einzelnen Messdaten digitalisiert zu speichern. Die Messdatenverarbeitung kann dann nachträglich auf einem Rechner durchgeführt werden.

Eine Sonderstellung nehmen sog. Punktkontakt-Biegeschwinger-Prüfköpfe mit Nadeln an den Biegeschwingerenden ein [17], die ohne zusätzliches Koppelmittel direkt auf die Messfläche gepresst werden. Ausführungen gibt es sowohl für Longitudinalwellen als auch für Transversalwellen [58]. Prüfkopffarrays, bestehend aus solchen Punktkontaktprüfköpfen, eignen sich wegen des koppelmittelfreien Einsatzes besonders gut für eine automatisierte Messung. Die Nadeln sind mit Keramikspitzen ausgerüstet, um die Abnutzung zu vermindern. Für großflächige zerstörungsfreie

Untersuchungen von Spannbetonbrücken wurden flexible Scannersysteme für den Einsatz von akustischen und elektromagnetischen Messverfahren entwickelt. Bei zahlreichen Praxiseinsätzen mit Scannersystemen haben sich diese robusten Prüfkopf-Arrays bewährt.

Um das zeitaufwendige Umsetzen der Prüfköpfe zu vermeiden, wurde für Strukturuntersuchungen von Betonbauteilen eine Messapparatur entwickelt, der das Prinzip der Strahlergruppe zu Grunde liegt. Bei der Apparatur ist zusätzlich zur üblichen Ultraschallgerätetechnik ein Messstellenumschalter mit in die Messkette integriert worden, an dem ein Prüfkopfarray, bestehend aus zehn Ultraschallprüfköpfen, angeschlossen ist [36].

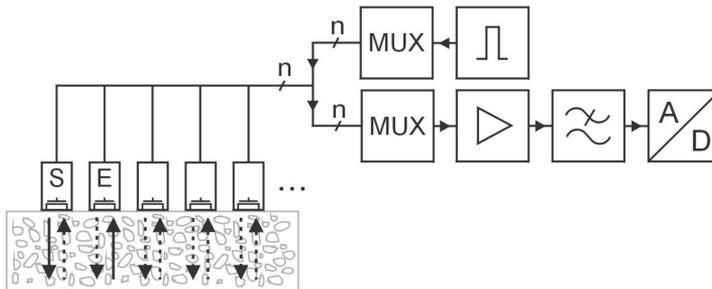


Abb. 5: Blockschaltbild einer Ultraschall-Messapparatur für Impuls-Echo-Messungen nach dem Prinzip der Strahlergruppe.

Abb. 5 zeigt das Blockschaltbild des Messverfahrens, bei dem eine Strahlergruppe bereits vor der Messung simultan angekoppelt wird. Über zwei Multiplexer werden die Ultraschall-Sendestufe und der Empfangskanal jeweils auf einen Prüfkopf durchgeschaltet. Während der automatischen Messdatenaufnahme arbeitet jeder Prüfkopf sequentiell als Sender und als Empfänger. Die Möglichkeiten der Verarbeitung unterscheiden sich nicht von denen, die bei einer Messung nach dem Prinzip der durch Abtastung realisierten synthetischen Apertur angewendet werden. Die Messsignale der verschiedenen Sender-Empfänger-Kombinationen können zur weiteren Verarbeitung aufsummiert, laufzeitkorrigiert überlagert oder einer SAFT-Rekonstruktionsrechnung zugeführt werden [68], [43].

Der Vorteil der Strahlergruppe gegenüber der durch Abtastung erzeugten synthetischen Apertur besteht darin, dass die Prüfköpfe vor der Messung nur einmal auf der Oberfläche des Bauteils angekoppelt werden müssen. Zeitaufwendiges Umsetzen

der Prüfköpfe entfällt. Allerdings ist der gerätetechnische Aufwand größer, denn je nach gewünschter Aperturgröße steigt die notwendige Anzahl der Prüfköpfe.

Für ein Array, bestehend aus n Prüfköpfen, erhält man die Anzahl der möglichen Sender-Empfänger-Kombinationen C (mit $k = 2$, ohne Wiederholung) zu [6]

$$C_n^{(k)} = \binom{n}{k} = \frac{n!}{(n-k)! k!} \quad \text{mit } 0 \leq k \leq n . \quad \text{Gl. 1}$$

Für beispielsweise zehn Prüfköpfe in einem Array erhält man bei dem Verfahren der Strahlergruppe nach Gl. 1 durch eine Messung 45 unterschiedliche Ultraschallsignale.

Für die Untersuchung von Spannkänen und Rissen in Betonbauteilen hat sich die Aperturvergrößerung und Rekonstruktion nach dem SAFT-Verfahren bewährt, mit dem man bei einer ein- oder zweidimensionalen Abtastung des Messbereiches eine zwei- oder dreidimensionale Darstellung des Bauteils erhält [22]. Dieses relativ aufwendige Verfahren setzt voraus, dass die abzubildenden Körper im Werkstoff ungerichtet streuen. Bedeutsame Fehler, wie z. B. Risse, sind meist stark gerichtet reflektierend bzw. streuend. Deren Abbildung und Größeneinschätzung verlangt dann zusätzliche Informationen aus anderen Quellen. Bei diesem Prinzip kann der Empfangsprüfkopf auch durch ein Laservibrometer ersetzt werden. Dabei tastet der Laserstrahl, gesteuert durch einen Spiegelscanner, automatisch die Messfläche ab.

Bei allen aperturvergrößernden Verfahren mit abtastenden oder im Array fest angeordneten Einzelementen oder Prüfköpfen sollten die Einzelprüfköpfe zur Abtastung einer Prüfkörperoberfläche möglichst einen großen Divergenzwinkel haben. Der Sendeprüfkopf sendet in einem weiten Winkelbereich in den Prüfkörper hinein und mögliche Fehler reflektieren daraufhin in allen Abtastpositionen ein Echosignal zum Empfangsprüfkopf (ungerichtete Streuung).

Bei den Messverfahren nach Abb. 4 und Abb. 5 ging es hauptsächlich um die Erzeugung großer Aperturen, wodurch die Abstrahlcharakteristik verbessert und eine örtliche Mittelung der Empfangssignale erreicht wird. Der Hardware-Aufwand ist relativ gering, aber oft wird trotz der großen Aperturen eine Messung erst durch den Einsatz aufwendiger Messdatenverarbeitung aussagekräftig. Zurzeit sind in der Praxis diese Messverfahren gebräuchlich und werden durch neuartige Prüfköpfe und Auswertetechniken weiterentwickelt.

Als Alternative zu den beschriebenen Verfahren, bei denen nach der Messdatenaufnahme die Signale erst mehr oder weniger aufwendig weiterverarbeitet werden müssen, bietet sich die Umsetzung des Gruppenstrahlerkonzeptes für die Untersuchung von Betonbauteilen an. Die Ideen der Gruppenstrahler stammen aus den Bereichen der Ultraschalldiagnostik in der Medizin und den Verfahren der Ultraschallprüfung an metallischen Werkstoffen, die aber entsprechend den Anforderungen im Bauwesen adaptiert werden müssen.

Im Gegensatz zum SAFT-Verfahren kann mit laufzeitgesteuerten Gruppenstrahlern eine Fokussierung oder ein Bündelschwenken schon während der Messung im Sendebetrieb und je nach Ausstattung des elektronischen Teils einer Gruppenstrahler-Ausrüstung auch im Empfangsbetrieb eingestellt und in ihren Auswirkungen unmittelbar beobachtet werden. Der Sendebetrieb gestattet es zudem, mit einer Strahlergruppe die erzeugten Schallfelder auch real zu messen, ein Umstand, der bei Beton für die Klärung von Grundsatzfragen zum Einsatz der Gruppenstrahlertechnik und darüber hinaus für alle Apertur-Vergrößerungs-Verfahren sehr bedeutsam ist, wie in den Kapiteln 5.3, 5.4 und 5.5 gezeigt wird.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird das Prinzip der laufzeitgesteuerten Gruppenstrahler und dessen praktische Anwendung in der Niederfrequenz-Ultraschallprüfung an Baustoffen erprobt.

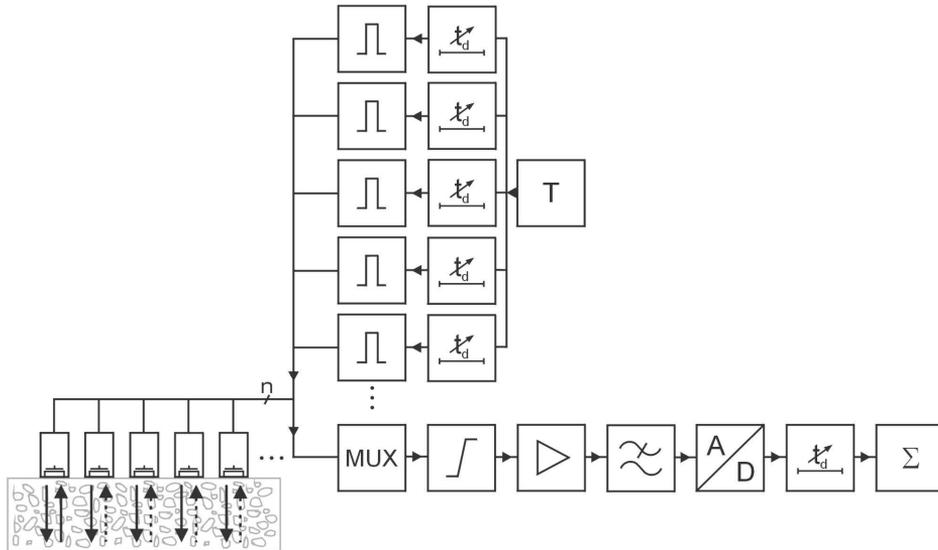


Abb. 6: Blockschaltbild eines zeitlich gesteuerten Ultraschall-Gruppenstrahlers mit digitaler Verzögerung und einem Empfangskanal.

Abb. 6 zeigt eine Weiterentwicklung des Verfahrens mit einer Strahlergruppe, bei dem die Form der abgestrahlten Wellenfronten während der Messung beeinflusst werden kann. Dazu ist für jeden Prüfkopf der Strahlergruppe eine Sendestufe notwendig, die Sendepulse nach voreingestellten Verzögerungszeiten aussendet. Da die Beeinflussung des Schallfeldes durch die Belegung der Sendepulse mit Verzögerungszeiten, denen die Laufzeiten im Werkstoff zu Grunde liegen, erfolgt, spricht man bei diesem Gerätekonzept von laufzeitgesteuerten Gruppenstrahlern.

Durch Vorgabe unterschiedlicher Verzögerungsfunktionen kann z. B. das gesendete Schallbündel auf verschiedene Bereiche im Bauteil fokussiert werden. Der Empfangskanal ist nur einmal vorhanden und wird während einer Messung sequentiell auf die einzelnen Prüfköpfe der Strahlergruppe durchgeschaltet. Da die Messsignale digitalisiert gespeichert werden, können sie im Rechner mit derselben Verzögerungsfunktion wie beim Senden belegt werden. Dies erfolgt durch programmgesteuerte zeitliche Verschiebung der amplituden- und zeitdiskreten Signale. Dabei ist die minimale Verzögerungszeit t_{vmin} durch die Abtastfrequenz des AD-Umsetzers vorgegeben.

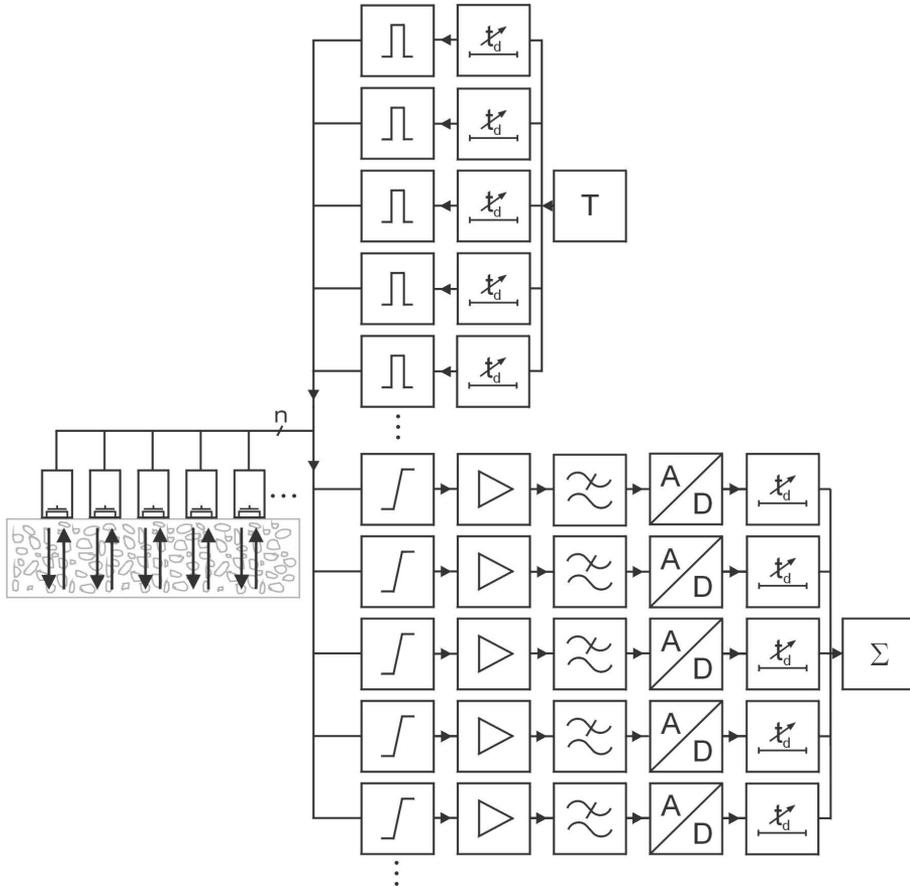


Abb. 7: Blockschaltbild eines zeitlich gesteuerten Ultraschall-Gruppenstrahlers mit digitaler Verzögerung und mehreren Empfangskanälen.

Abb. 7 zeigt die allgemeine Struktur eines laufzeitgesteuerten Gruppenstrahlers mit parallelen digitalen Send- und Empfangskanälen. Für Werkstoffe, die von den Ankopplungsbedingungen her eine hohe Prüfgeschwindigkeit zulassen, können die Empfangskanäle mit digitalen Signalprozessoren für eine schnelle Ablaufsteuerung und Signalverarbeitung ausgerüstet sein. Außer dem rein digitalen Konzept sind in der zerstörungsfreien Prüfung auch analoge Zeitverzögerungen der Signale mit Hilfe von angezapften Verzögerungsleitungen oder hybride Lösungen vertreten [69]. Erkennbar an dem Blockschaltbild, das nur eine mögliche Ausführung beschreibt, ist der erheblich größere elektronische Aufwand des Gerätekonzeptes.

Die Gruppenstrahlertechnik könnte bei den genannten Prüfaufgaben die zurzeit angewendeten Prüfverfahren ergänzen und in einigen Fällen durch einfache schnelle Anwendbarkeit verbessern.

Die Arbeitsweise eines laufzeitgesteuerten Gruppenstrahlers und eine praxisgerechte Umsetzung dieses Konzeptes für das Bauwesen werden im Kapitel 4 ausführlich erläutert.

4 Laufzeitgesteuerte Gruppenstrahlertechnik für den Niederfrequenzbereich

Im Bauwesen werden bereits erfolgreich Abtastverfahren auf Grundlage der synthetischen Apertur eingesetzt. Zu Bilddarstellungen des Prüfobjektinneren für die verbesserte Fehlerinterpretation kommt man mit dieser Technik nur mit großem mechanischen Aufwand (Einsatz eines Scan-Systems) und mit nachträglicher Rekonstruktionsrechnung.

Mit laufzeitgesteuerten Gruppenstrahlern können während der Prüfung die Schallfelder gesteuert und auf bestimmte Bereiche im Prüfkörper geschwenkt und/oder fokussiert werden. Damit ist eine schnelle automatische Prüfung ohne großen mechanischen Aufwand möglich und als Ergebnis sind Bilddarstellungen erreichbar, die mit den Ergebnissen des zeitaufwendigeren SAFT-Verfahrens vergleichbar sind. Damit verbunden sind ein verbesserter Fehlernachweis, eine genauere Fehlergrößenabschätzung und eine verbesserte Fehlerinterpretation gegenüber einer Messung ohne Laufzeitsteuerung der Array-Elemente wie bei der Strahlergruppe nach Abb. 5.

In der medizinischen Ultraschall Diagnostik [56] und bei der zerstörungsfreien Prüfung an metallischen Werkstoffen ist die Gruppenstrahlertechnik bereits weit entwickelt [12], [48].

Um die Randbedingungen für den Einsatz von laufzeitgesteuerten Gruppenstrahlern an Betonbauteilen zu untersuchen, wurde eine Niederfrequenz-Gruppenstrahler-Sendeeinheit aufgebaut. Die Entwicklung dieses Aufbaus orientierte sich an praktischen Gesichtspunkten, so dass für die experimentellen Untersuchungen vor allem zur Überprüfung der erzeugten Schallfelder ein Gerät zur Verfügung stand, wie es am ehesten auch für Einsätze in der Praxis Verwendung finden kann.

4.1 Gesteuerte Fokussierung

Von den prinzipiellen Steuerungsmöglichkeiten der Gruppenstrahlertechnik ist die Fokussierung im Beton wegen der damit möglichen Verbesserung des Signal-Störabstandes interessant und wird daher im Folgenden näher betrachtet.

Da die Fokussierung nur innerhalb der Nahfeldlänge eines Prüfkopf- oder Apertur-Schallfeldes [23]

$$N \approx \frac{d^2}{4 \lambda} \quad \text{Gl. 2}$$

möglich ist und die einsetzbare Wellenlänge λ bei Beton nach unten durch Gefügestreuungen bei ca. 30 mm begrenzt ist, müssen zur Fokussierung sehr große Schwingerdurchmesser verwendet werden, die in der Praxis nur durch künstliche Aperturen realisiert werden können. Die Erfassung von Fehlern in unterschiedlichen Tiefen würde zudem Prüfköpfe mit unterschiedlichen Krümmungsradien voraussetzen, durch deren sequentielle Anwendung die Prüfzeit erheblich ansteigen würde.

Im Gegensatz dazu ist ein laufzeitgesteuerter Gruppenstrahler universell für unterschiedliche Prüfprobleme einsetzbar. Das Schallfeld kann programmgesteuert dem Prüfproblem von Fall zu Fall angepasst werden.

Es ist anzumerken, dass die im Anhang 9.5 dargestellten Begriffe, Definitionen und Formeln zu fokussierenden Prüfköpfen an sich nur für sphärisch gekrümmte, kreisförmige Schwinger gelten. Bei den praktischen Ausführungen von linearen Gruppenstrahlern mit eher rechteckförmiger Anregungsfläche weicht die natürliche Fokussierung im Nahfeld von der eines kreisförmigen Schwingers ab, so dass die Definition des Fokussierungsgrades nur näherungsweise anwendbar ist. Der Bereich, in dem eine Fokussierung möglich ist, muss i. d. R. im einzelnen durch theoretische Modellierung genauer berechnet werden.

Der heute für die Schallfeldsteuerung allgemein verwendete Ansatz sieht eine Unterteilung der abstrahlenden und empfangenden Fläche eines Prüfkopfes in viele voneinander getrennte kleine Schwingerelemente vor, die elektronisch mit bestimmten Verzögerungszeitverteilungen angeregt bzw. beim Empfang entsprechend verzögert werden. Dieses Konzept wird als laufzeitgesteuerte Gruppenstrahlertechnik bezeichnet.

Die englische Bezeichnung „Phased-Array“ für die Gruppenstrahlertechnik hat ihren Ursprung in der Radartechnik, wo die Richtcharakteristik von Antennen durch Phasenverschiebungen von Impulsen mit großer Kohärenzlänge beeinflusst wird. In der Ultraschallprüfung muss in der Regel für die Schallfeldsteuerung wegen der geringen Kohärenzlänge der verwendeten Impulse die Laufzeit der Impulse indirekt durch

Verzögerungen beim Senden bzw. Empfangen verändert werden. Man sollte im Ultraschallbereich deshalb besser von laufzeitgesteuerten Gruppenstrahlern als von Phased-Arrays sprechen [69].

Bereits 1954 wurde von Bradfield (UK) das Konzept eines Gruppenstrahlers mit mechanisch geschalteten Verzögerungselementen vorgestellt. Die ersten deutschen Gruppenstrahlergeräte wurden Ende der 70er Jahre im IZFP in Saarbrücken von Höller, Neumann, Schmitz und Gebhart und in der BAM von Schenk, Montag und Wüstenberg entwickelt. Die Gruppenstrahlertechnik war früher hochspezialisierten Anwendern vorbehalten, während heute, durch den Einsatz moderner Gerätetechnik, eine schnelle Verbreitung in der industriellen Anwendung stattfindet [69].

Ein Gruppenstrahler-Prüfkopf besteht aus einer ein- oder zweidimensionalen Anordnung von Schwingerelementen, die als Sender und/oder Empfänger von Ultraschallwellen dienen. Bei eindimensional unterteilten Linienarrays kann man eine zweidimensionale Schallfeldsteuerung realisieren. Bei zweidimensional unterteilten Flächenarrays wird die dreidimensionale Steuerung möglich. Können die einzelnen Schwingerelemente mit Sendeimpulsen unterschiedlicher Verzögerungszeiten belegt werden, ergeben sich drei verschiedene Möglichkeiten der Beeinflussung des abgestrahlten Schallfeldes (s. **Abb. 8**):

- Bündelverschiebung (Realtime-Scanner): Von einem Array werden nacheinander nur zusammenhängende Schwingergruppen mit Sendeimpulsen beaufschlagt und so das Schallbündel im Prüfkörper verschoben.
- Bündelschwenk: Durch eine lineare Verzögerung der Anregung der einzelnen Schwingerelemente wird die Abstrahlrichtung des Gruppenstrahler-Prüfkopfes geändert.
- Bündelfokussierung: Durch eine gekrümmte Verteilung der Sendeimpuls-Verzögerungszeiten der Schwingerelemente kann das Schallbündel auf bestimmte Tiefenbereiche fokussiert werden.

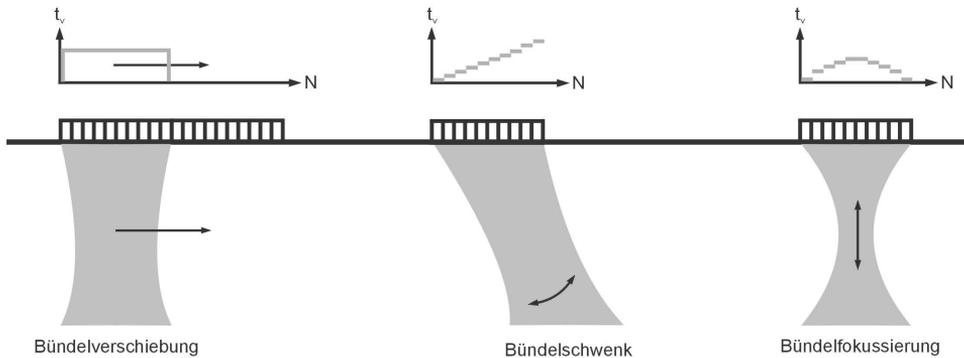


Abb. 8: Möglichkeiten der Schallfeldsteuerung mit zeitlich gesteuerten Gruppenstrahlern (schematisch).

Diese Möglichkeiten der Schallfeldsteuerung können auch kombiniert werden, um so z. B. eine Fokussierung unter einem bestimmten Winkel zu erzielen. Oft kommen die Gruppenstrahler-Prüfköpfe bei metallischen Werkstoffen in Verbindung mit Prüfkopfkeilen als Vorlaufstrecken zum Einsatz.

4.2 Prüfköpfe für die Gruppenstrahlertechnik

Die zurzeit üblichste Form eines Gruppenstrahler-Prüfkopfes ist die in einer Richtung geteilte Piezokeramik. Mit einem derartigen linearen Array, das aus schmalen nebeneinanderliegenden Streifen besteht, ist eine zweidimensionale Schallfeldsteuerung möglich [11]. Die Wahl der Größe der einzelnen Schwingerelemente ist u. a. von der verwendeten Messfrequenz und dem gewünschten maximalen Schwenkwinkel abhängig. In der medizinischen Diagnostik wird die Elementbreite b oft nach folgendem Kriterium festgelegt [69]

$$b_{Med} = \frac{\lambda_{Mess}}{2}, \quad Gl. 3$$

dass sich aus der Forderung nach einer optimalen Gitterkeulenunterdrückung für Ablenkwinkel $\leq 90^\circ$ ergibt.

Bedingt durch die Wellenlängen in der zerstörungsfreien Prüfung würde das $\lambda/2$ -Kriterium zu Elementen mit einem Breite/Dicke-Verhältnis nahe eins führen, mit der Gefahr von Quermoden. Die Folgen wären ein stark reduzierter Wirkungsgrad und

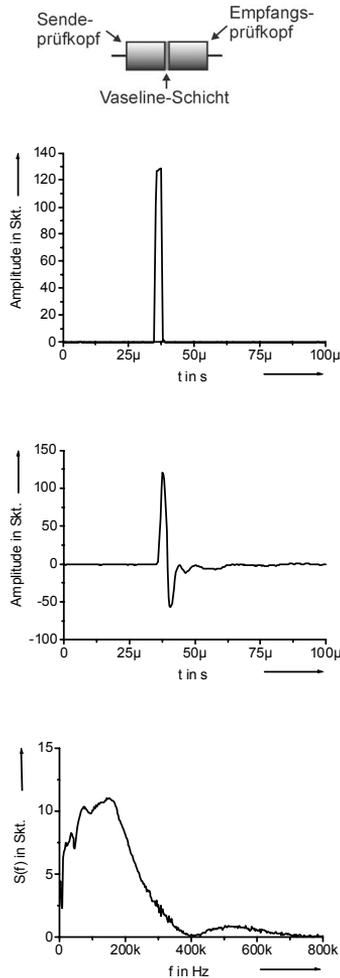
starkes Übersprechen (weitere Hinweise in [69]). Dies führt zur Wahl von größeren Elementbreiten

$$b_{ZIP} = (0,8 \dots 1,2) \lambda_{Mess} \quad . \quad Gl. 4$$

Die mögliche Elementbreite ist nach oben hin begrenzt, da die Richtwirkung eines einzelnen Elementes mit zunehmender Breite größer wird. Dies schränkt die Fähigkeit einer Strahlergruppe ein, große Schwenkwinkel zu erzeugen, weil sich durch die schärfer werdende Richtwirkung die Impulse der einzelnen Elemente nicht mehr überlagern können.

Diese Überlegungen zeigen, dass in der zerstörungsfreien Prüfung einfache Rezepturen bei der Planung und Konstruktion eines Gruppenstrahler-Prüfkopfes für die Festlegung der optimalen Konstruktionsdaten versagen und diese daher über eine Modellierung der erzeugten Schall- bzw. Empfindlichkeitsfelder in meist iterativen Schritten zu ermitteln sind.

In der vorliegenden Arbeit wird eine Strahlergruppe aus zehn kommerziell erhältlichen Ultraschall-Niederfrequenz-Prüfköpfen in Array-Anordnung als Gruppenstrahler-Prüfkopf eingesetzt. Dadurch ist die Elementgröße und -form für den Prüfkopfaufbau durch den Hersteller bereits vorgegeben. Lediglich die zweidimensionale Anordnung der Prüfköpfe in einem Array kann im vorliegenden Fall beeinflusst werden. Die eingesetzten Einzelprüfköpfe haben nach Herstellerangaben einen Schwingerdurchmesser von $d = 34 \text{ mm}$ und eine Mittenfrequenz von $f_m = 200 \text{ kHz}$. Die Prüfköpfe sind stark bedämpft und haben eine relative Bandbreite B_{rel} von 120 %.



Messanordnung

Sendepuls
($T_i = 2,5 \mu\text{s}$)

Empfangssignal

Spektrum

Abb. 9: Messanordnung, Sende- und Empfangssignal bei direkt gekoppelten Prüfköpfen (G0,2GC, Fa. Krautkrämer) und das Spektrum des Empfangssignals.

Im Folgenden wird anhand von drei Messungen unter Verwendung dieser Prüfköpfe der Einfluss des durchschallten Mediums auf das Spektrum des Empfangssignals dargestellt. Die Messungen dienen der Ermittlung der bei den Modellrechnungen einzusetzenden Arbeitsfrequenz der Prüfköpfe. Das Spektrum des Empfangssignals bei Anregung durch einen Rechteckimpuls zeigt **Abb. 9**. Für die Messung wurden der Sende- und Empfangsprüfkopf direkt über eine dünne Vaseline-Schicht gekoppelt. Im vorliegenden Fall ergibt sich eine Empfangssignal-Mittenfrequenz, die niedriger liegt als die Prüfkopfmittenfrequenz.

Nachfolgend wurde das Empfangssignal einer Durchschallungsmessung eines 175 mm dicken Betontestkörpers mit einem Größtkorn von 32 mm aufgenommen. Deutlich erkennt man in **Abb. 10**, wie sich die Mittenfrequenz zu niedrigen Frequenzen hin verschiebt. Anhand dieses Beispiels wird der Einfluss des Übertragungsverhaltens des Betons auf die Ultraschallsignale besonders deutlich.

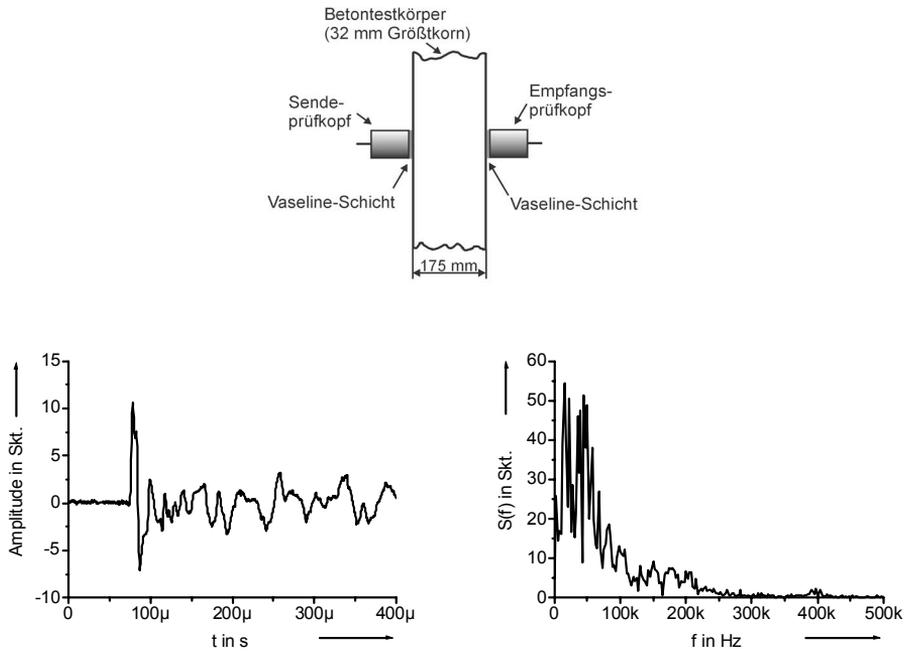


Abb. 10: Messanordnung, Durchschallungssignal und Spektrum (Betontestkörper $d = 175$ mm, 32 mm Größtkorn). Gemessen wurde mit zwei Ultraschallprüfköpfen (G0,2GC, Fa. Krautkrämer).

Die **Abb. 11** zeigt ein typisches Ultraschall-Durchschallungssignal des Betontestkörpers zur Bestimmung des Gruppenstrahler-Schallfeldprofils und das zugehörige Spektrum. Als Empfänger wurde ein Laservibrometer verwendet. Die obere Grenzfrequenz liegt deutlich höher als in **Abb. 10**. Die Bandbreite des Laservibrometers beträgt 0,5 Hz bis 250 kHz bei der eingestellten Empfindlichkeit von 5 mm/s/V [47].

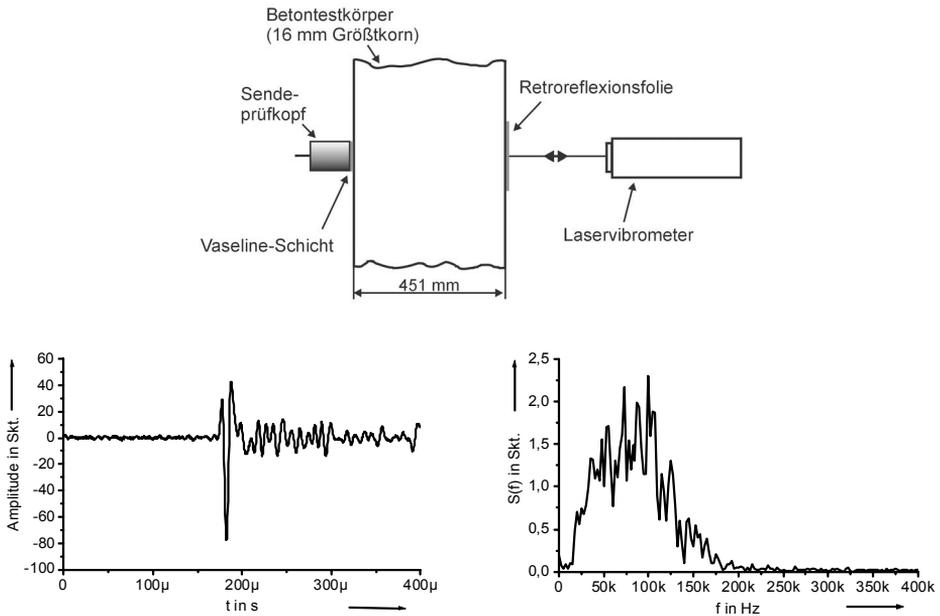


Abb. 11: Messanordnung, Durchschallungssignal und Spektrum (Betontestkörper $d = 451$ mm, 16 mm Größtkorn). Das Empfangssignal wurde mit einem Laservibrometer aufgenommen.

Die im Kapitel 4.5 durchgeführten Modellierungen wurden daher mit einer typischen Mittenfrequenz von 100 kHz durchgeführt.

4.3 Verzögerungszeiten der Schwingeremente

Beim verwendeten Konzept der Schallfeldbeeinflussung werden verschiedene Schwingeremente mit unterschiedlichen Sendeimpuls-Verzögerungszeiten belegt. Nachfolgend wird eine Abschätzung über die minimale und maximale Verzögerungszeit der Sendeimpulse für die Ansteuerung der einzelnen Schwingeremente zueinander gegeben [69]. Die Verzögerungszeiten sind vom gewünschten Schwenkwinkel ϑ , von der Apertur des Arrays und von der Schallgeschwindigkeit c_{MO} bzw. der Wellenlänge λ_{MO} im Messobjekt abhängig. Der Abstand der Mittelpunkte zwischen zwei Schwingerementen ist mit a bezeichnet (s. **Abb. 12**). Die Betrachtungen beziehen sich auf die Wellenfront im Fernfeld.

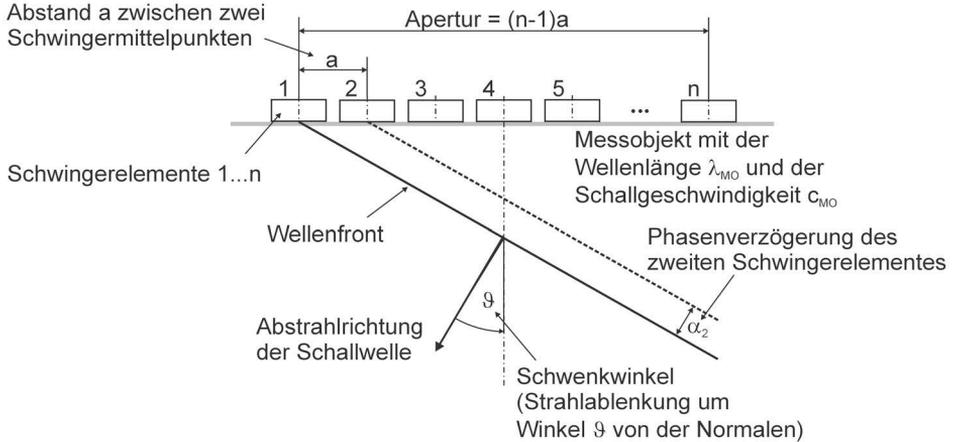


Abb. 12: Schwenk der Abstrahlrichtung beim zeitlich gesteuerten Gruppenstrahler (schematisch).

Werden die einzelnen Quellen der Strahlergruppe mit einer linear veränderlichen Phasenverzögerung α_n angeregt, dreht sich die Wellenfront um den Schwenkwinkel ϑ . Für einen vorgegebenen Schwenkwinkel berechnet sich die zugehörige Phasenverzögerung der n -ten Quelle mit dem Abstand a zur benachbarten Quelle zu [64]

$$\alpha_n = 2\pi(n-1) \frac{a}{\lambda_{MO}} \sin \vartheta . \tag{Gl. 5}$$

Für einen gewünschten maximalen Schwenkwinkel ϑ_{max} und einer Apertur von $(n-1)a$ ergibt sich die maximale Verzögerungszeit t_{vmax} zu

$$t_{vmax} = \frac{(n-1)a}{c_{MO}} \sin \vartheta_{max} . \tag{Gl. 6}$$

Bei einem maximalen Schwenkwinkel ϑ_{max} erhält man für einen vorgegebenen kleinsten Winkelschritt $\Delta\vartheta$ die minimale Verzögerungszeitänderung Δt_{vmin}

$$\Delta t_{vmin} = \frac{a}{c_{MO}} (\sin \vartheta_{max} - \sin(\vartheta_{max} - \Delta\vartheta)) \tag{Gl. 7}$$

$$\Delta t_{vmin} \approx \frac{a}{c_{MO}} \Delta\vartheta \cos \vartheta_{max} .$$

Eine andere, eher technisch orientierte Faustformel setzt eine Quantelung der Phasenverschiebung von 8 % der Wellenlänge im Messobjekt für eine minimale Zeitverzögerung an [69]

$$\Delta t_{vmin} \approx \frac{0,08}{f_{Mess}} . \quad \text{Gl. 8}$$

Für die Anwendung der Gruppenstrahlertechnik an Bauteilen aus Stahl sind Verzögerungszeiten von $\Delta t_{vmin} = 5 \text{ ns}$ bis $\Delta t_{vmax} = 10 \text{ }\mu\text{s}$ bei einer Prüffrequenz von 10 MHz üblich.

Nachfolgend wird eine Abschätzung der Größenordnung der Verzögerungszeiten für die Betonprüfung gegeben.

Für einen maximalen Schwenkwinkel von z. B. $\vartheta_{max} = 45^\circ$ und einer Apertur von 8λ erhält man für die Verzögerungszeiten $\Delta t_{vmax} \approx 56 \text{ }\mu\text{s}$ und $\Delta t_{vmin} \approx 800 \text{ ns}$ bei einer Prüffrequenz von $f = 100 \text{ kHz}$ und einer Longitudinalwellengeschwindigkeit von $c_L = 4000 \text{ m/s}$. Die langen Verzögerungszeiten liegen in einer Größenordnung, in der bereits kommerziell erhältliche Rechner-Steckbaugruppen, sog. Counter-Timer-Boards, zur digitalen Zeitverzögerung der Sendeimpulse eingesetzt werden können. Mit der **Abb. 13** soll der Einfluss der Diskretisierung der Verzögerungszeiten auf die Steuerbarkeit der Abstrahlcharakteristik demonstriert werden. Die Abbildung zeigt die Modellierung der Schallfeldprofile eines Gruppenstrahlers für die minimalen Verzögerungszeiten von $\Delta t_{vmin} = 100 \text{ ns}$ und $\Delta t_{vmin} = 500 \text{ ns}$.

Der Gruppenstrahler besteht aus zehn einzelnen Niederfrequenz-Prüfköpfen. Das Schallbündel wurde auf einen Punkt im Probekörper fokussiert und geschwenkt. Die Anregung ist in beiden Fällen harmonisch. Durch die gröbere zeitliche Stufung der Verzögerungszeiten mit Quantisierungsschritten von 500 ns kommt es bei der Steuerung zu einer etwas geringeren maximalen Amplitude. Die Nebenmaxima bilden sich bei unterschiedlichen Zeit-Quantisierungsschritten etwas anders aus. Bei der geringeren Quantisierungsschrittweite kommt es teilweise zu „Verschmierungen“ der Schallfeldprofile. Die Steuerbarkeit ist aber deutlich auch bei der geringeren Zeitauflösung von $\Delta t_{vmin} = 500 \text{ ns}$ gegeben.

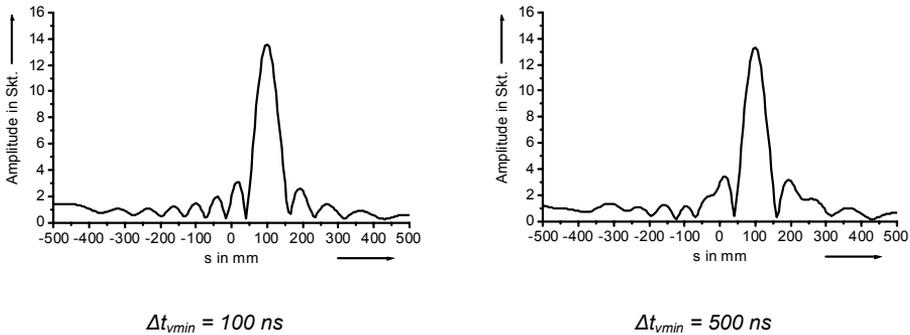


Abb. 13: Einfluss der Diskretisierung der Verzögerungszeiten auf die Abstrahlcharakteristik eines zeitlich gesteuerten Gruppenstrahlers bestehend aus zehn NF-Prüfköpfen (Durchmesser eines Prüfkopfes $d = 34 \text{ mm}$, harmonische Anregung, Frequenz $f = 100 \text{ kHz}$, Modellierung).

4.4 Sendetechnik für den Gruppenstrahler

Die Ultraschall-Sendestufe hat die Aufgabe, den piezoelektrischen Wandler (Schwinger) des Prüfkopfes so zu Schwingungen anzuregen, dass dieser Ultraschallimpulse mit möglichst großer Amplitude und kurzer Pulsdauer abstrahlt. Für den Impulsbetrieb der Ultraschallgeräte kann die Ultraschall-Sendestufe den piezoelektrischen Wandler in unterschiedlicher Weise zu mehr oder weniger kurzen Schwingungsimpulsen anregen. Die Wiederholfrequenz für die Anregung der eingesetzten Niederfrequenz-Prüfköpfe ist wegen der Prüfkopferwärmung auf eine Maximalfrequenz von ca. 30 Hz begrenzt. Nach elektrischer Anregung der Piezowandler durch Nadel-, Rechteck- oder Schwingungsimpuls schwingen diese dann in ihrer mechanischen Eigenfrequenz aus. Die Eigenfrequenz und damit die Prüffrequenz wird i. d. R. durch die Schwingerdicke (Plattendicke) und gegebenenfalls benutzte Anpassungsschichten bestimmt [70].

Die Prüfkopffrequenz ist abhängig von der Plattendicke d_p (s. **Abb. 14**) und der Schallgeschwindigkeit c des Wandlermaterials. Die Eigenfrequenz f_0 einer Wandlerplatte in Dickenresonanz berechnet sich zu [23]

$$f_0 = \frac{c}{2 d_p} . \tag{Gl. 9}$$

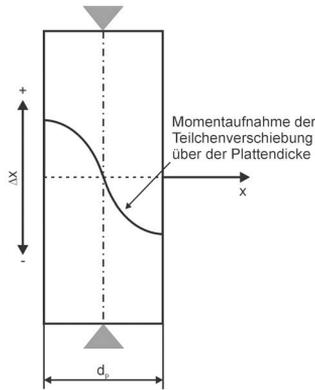


Abb. 14: Grundschwingung einer am Rand gehaltenen Platte der Dicke d_p nach [23].

Für die Übertragung von kurzen Impulsen müssen die Prüfköpfe eine genügende Bandbreite aufweisen. Dies kann durch eine große Dämpfung erreicht werden, allerdings auf Kosten der Amplitude. Für eine tiefe Eigenfrequenz von z. B. $f_0 = 100$ kHz, eine in der zerstörungsfreien Prüfung im Bauwesen übliche Messfrequenz, weisen die Wandlerplatten erhebliche Dicken (z. B. 25 mm bei Bariumtitanat als Piezowerkstoff) auf, was in der Regel zu hohen Anregungsspannungen führt [70]. Die **Abb. 15** zeigt eine Prüfkopfausführung, bei der zwei piezoelektrische Elemente mechanisch in Reihe und elektrisch parallelgeschaltet sind [62].

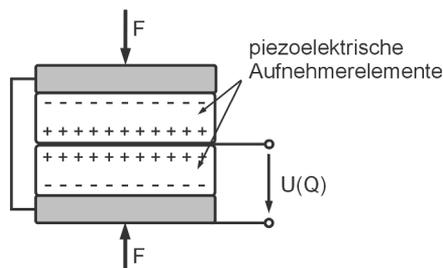


Abb. 15: Elektrische Parallelschaltung von piezoelektrischen Elementen zur Erhöhung der Ladungsausbeute nach [62].

Um die elektrische Belastung eines Senders durch den angeschlossenen Prüfkopf bei Grundresonanz zu untersuchen, kann die Prüfkopfersatzschaltung vereinfacht

durch eine Halterungskapazität mit einem parallelgeschalteten ohmschen Widerstand dargestellt werden (siehe Anhang 9.3).

Im einfachsten Fall finden für die Prüfkopfانregung Nadelimpulse Verwendung, die durch eine Kondensatorentladung erzeugt werden (s. **Abb. 16**). Die Impulse zeichnen sich durch eine kurze Anstiegszeit und einen langsamen Abfall der Spannung aus. Der exponentielle zeitliche Verlauf des Spannungsabfalls kann durch zusätzliche parallel zum Prüfkopf geschaltete Dämpfungswiderstände beeinflusst werden. Das Frequenzspektrum des Nadelimpulses enthält immer auch die gewünschte Prüffrequenz des benutzten Prüfkopfes, leider wird aber die Impulsenergie auf einen großen, weitgehend ungenutzten Spektralbereich verteilt [9], [37]. Dieser Nachteil kann durch Sender mit Rechteckimpulsen vermindert werden.

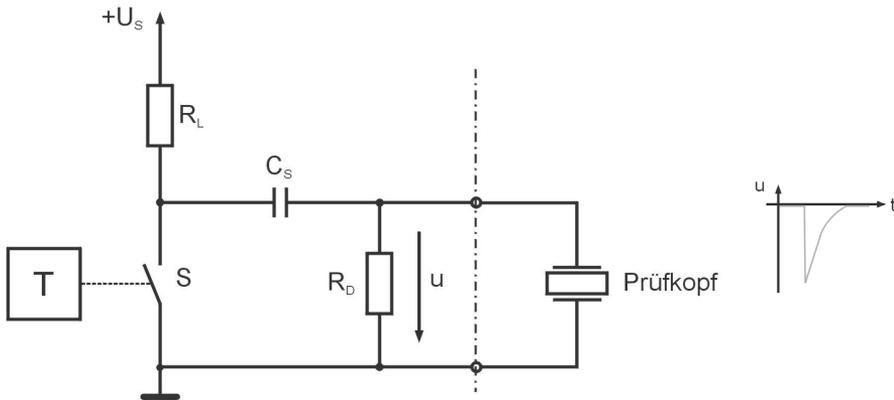


Abb. 16: Blockschaltung eines Ultraschall-Nadelimpulssenders und Impulsform (schematisch ohne Prüfkopf).

Bei Verwendung eines Rechteckimpulses mit variabler Impulsdauer ist der Schaltungsaufwand der Sendestufe etwas größer als beim Nadelimpulssender (s. **Abb. 17**). Wird die Impulsdauer für den verwendeten Prüfkopf optimiert, erhält man größere Ultraschallamplituden als beim Nadelimpulssender. Bei zu kurzer Impulsdauer schwingt der Wandler nicht mit seiner Maximalamplitude; ist die Impulsdauer zu lang, wird die Schwingung verzerrt [37], [24].

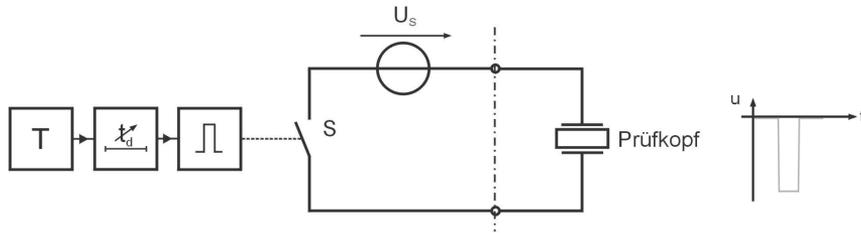


Abb. 17: Blockschaltung eines Ultraschall-Rechtecksenders und Impulsform (schematisch ohne Prüfkopf).

Ein guter Wert für die Rechteck-Impulsdauer T_i liegt bei [49]

$$T_i = (0,8 \dots 1) \frac{1}{2 f_m} . \quad \text{Gl. 10}$$

Für Impulse mit modulierter Sinusschwingung werden sog. CS-Sender (controlled signals) benötigt (s. **Abb. 18**). Sie erfordern den größten Schaltungsaufwand. Für diese Technik werden mechanisch besonders hoch bedämpfte Prüfköpfe benutzt, die durch beliebig wählbare Signalverläufe mit unterschiedlichen Frequenzen zu erzwungenen Schwingungen angeregt werden. Dies ermöglicht eine optimale Anpassung des Sendesignals an den Prüfkopf und an das Prüfproblem [70], [37], [9].

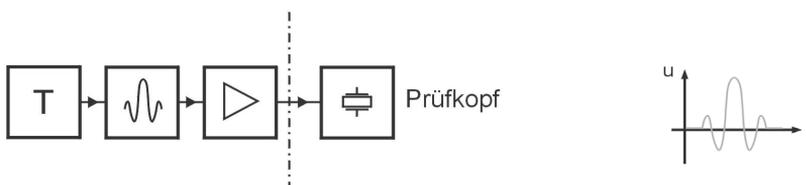


Abb. 18: Blockschaltung eines Ultraschall-CS-Senders und Impulsform (schematisch ohne Prüfkopf).

Bei einem Gruppenstrahler wird für jedes Schwingerelement ein Sender benötigt. Der Einsatz von CS-Sendern wäre mit einem hohen Aufwand verbunden, so dass im vorliegenden Fall Rechtecksender eingesetzt wurden. Mit einer optimal an das Piezoelement angepassten Impulsdauer erzielt man fast die gleichen Ergebnisse wie mit einem CS-Sender [69].

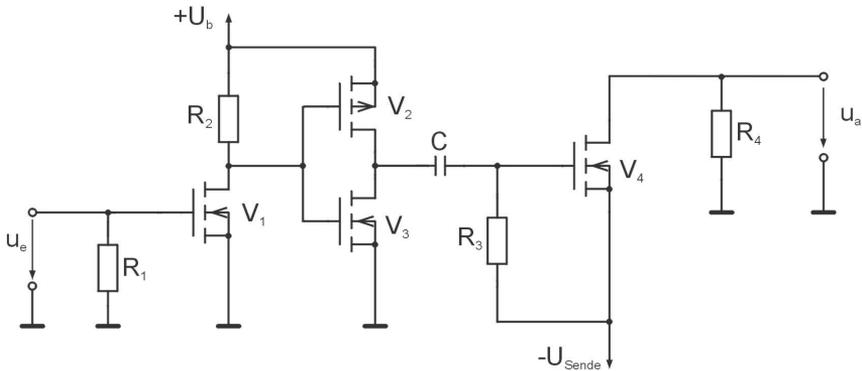


Abb. 19: Prinzipschaltung einer Ultraschall-Sendeendstufe für Rechteckimpulse.

Die **Abb. 19** zeigt die Prinzipschaltung einer bewährten Endstufe eines Rechtecksenders, wie sie auch für Niederfrequenz-Ultraschallprüfköpfe geeignet ist [61], [49]. Die Schaltung ist aus drei Stufen aufgebaut. Die Eingangsstufe dient der Anpassung an die Ansteuerschaltung, die im vorliegenden Fall durch den Ausgang eines schnellen Optokopplers mit Digitallogikausgang gebildet wird (in der Abbildung nicht dargestellt). Der Optokoppler trennt das Potenzial zwischen dem Timerausgang im Steuerrechner und der Sendeendstufe, die über ein Steuerkabel verbunden sind. Der FET V_1 im Eingang der Sendeendstufe hat eine geringe Schwellenspannung U_{th} , so dass die Ansteuerung der Stufe auch mit TTL-Logikpegel erfolgen kann. Die Umladezeiten der parasitären Kapazitäten (unter Berücksichtigung des Miller-Effektes) des Leistungs-MOSFET haben wesentlichen Einfluss auf die Schaltzeiten [60], [63]. Aus diesem Grund besteht die zweite Stufe der Schaltung aus einem CMOS-Inverter (V_2 und V_3) zur niederohmigen Ansteuerung des Leistungs-MOSFETS V_4 . Dadurch wird ein schnelles Umladen der Kapazitäten erreicht. Die zweite und dritte Stufe ist über einen Kondensator gekoppelt, was eine nahezu beliebige Pegelverschiebung ermöglicht. Die Dimensionierung des RC-Gliedes hängt von der gewünschten Breite des Sendepulses ab. Solange die Zeitkonstante τ sehr viel größer als die Impulsdauer T_i ist, wird der Impuls nahezu formgetreu, abzüglich der Gleichspannungskomponente, übertragen. Wird der Impuls zu lang, machen sich die endliche untere Grenzfrequenz und die damit verbundenen Phasendrehungen bemerkbar. Die dritte Stufe besteht aus dem Leistungs-MOSFET V_4 , an dessen Ausgang der Ultraschall-Prüfkopf angeschlossen wird.

Abb. 20 zeigt den Zeitverlauf des resultierenden Sendeimpulses (Kanal 2) bei angeschlossenem Prüfkopf. Der Triggerimpuls des Timers (Kanal 1) hat eine Impulsdauer von $T_i = 2,5 \mu\text{s}$.

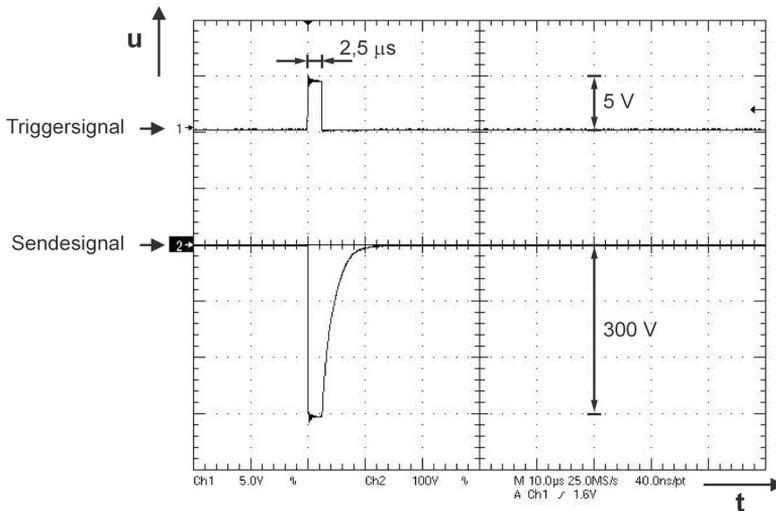


Abb. 20: Trigger- und Sendeimpuls mit angeschlossenem Prüfkopf (Kanal 1: Triggersignal, Timerausgang; Kanal 2: Sendeimpuls).

4.5 Optimierung des Prüfkopfaufbaus mit theoretischen Modellen

Um den Einfluss der Schwingerform und -größe auf das Schallfeld theoretisch zu untersuchen, gibt es unterschiedliche Modellansätze.

Zeitlich gesteuerte Gruppenstrahler für die zerstörungsfreie Prüfung von Metallen arbeiten oft im Fernfeld, wo eine Fokussierung nicht möglich ist. Die Hauptaufgabe der Gruppenstrahler beschränkt sich dann auf das elektronische Schwenken des Schallbündels anstelle einer mechanischen Abtastung. Im Fernfeld treten typische Effekte, wie Gitterkeulen (Nebenkeulen) oder Verbreiterung des Schallbündels beim Schwenken auf, die sich analytisch oft mit einer einfachen Fernfeldnäherung modellieren lassen. Mit Hilfe einfach handhabbarer Formeln können so Einflüsse wie die der Apertur, der Lücken zwischen den Schwingerelementen und der Breite der Elemente auf die Richtcharakteristik erfasst werden.

Die benötigten Aperturgrößen von mindestens 5 bis 6 Wellenlängen bedingen, dass bei einem Gruppenstrahlerarray für die Betonprüfung der genutzte Entfernungsbereich

reich meist im Nahfeld liegt. Im Nahfeld gibt es für gewünschte Schallfeldformen von Lineararrays zwar empirisch begründete Näherungsformeln, aber wegen des speziellen Array-Aufbaus aus kreisförmigen Elementen und der elastischen Eigenschaften von Festkörpern muss im Einzelfall die Schallfeldgeometrie durch numerische Modellierung überprüft werden.

Daher wird in der vorliegenden Arbeit nach einer vereinfachenden Fernfeld-Betrachtung die Anordnung der einzelnen Prüfköpfe im Gruppenstrahlerarray für homogene und isotrope Materialien im Nahfeld mit Hilfe der Punktquellensynthese optimiert [8], [29]. Die Prüfkopfanordnung hat direkten Einfluss auf die Schallfeldgeometrie, so dass durch eine geeignete Prüfkopfpositionierung beispielsweise störende Gitterkeulen im Schallfeld gedämpft werden können. Außerdem lassen sich die unterschiedlichen Richtcharakteristiken bzw. Schallfeldprofile mit der Punktquellensynthese berechnen, die sich durch das Schwenken und Fokussieren des Schallbündels ergeben. Für diese Modellierungen wurde ein Programm entwickelt, das die Aufteilung des Gruppenstrahlers in einzelne Elemente beliebiger zweidimensionaler Anordnung zulässt. Als Basis dienen bewährte Modelle aus der Gruppenstrahlertechnik für metallische Werkstoffe [2], [3], [4].

Für die Bewegungsgleichung eines Masseelementes in einem isotropen elastischen Medium können Lösungen mit Hilfe von Potenzialen konstruiert werden (s. Anhang 9.1). Für die Modellierung von Prüfkopfschallfeldern kann oft die skalare Wellenbeschreibung verwendet werden, die durch ergänzende Punktrichtwirkungen den Vektorcharakter von Schallfeldgrößen in elastischen Medien berücksichtigt (elastodynamische Näherung für die Wellenausbreitung in festen Medien, [28], [30]). Die Basis der Punktquellensynthese ist das Rayleigh-Integral, das als mathematische Umsetzung der Überlagerung von Schallfeldern aus elementaren Kugelwellen angesehen werden kann (Huygensches Prinzip) [8], [70]

$$\underline{p} = \frac{j \omega \rho}{2\pi} \iint_A \frac{v(A)}{r} e^{-jkr} dA \quad \text{Gl. 11}$$

$$\text{mit } k = \frac{2\pi}{\lambda}, \quad \omega = 2\pi f .$$

Der Schalldruck p kann durch Integration über alle Flächenelemente dA eines Strahlers der Schnelle $v(A)$ berechnet werden. Der Abstand zwischen Aufpunkt und Flächenelement dA ist mit r und die Dichte mit ρ bezeichnet.

Zur Validierung der Punktquellensynthese und um die prinzipiellen Auswirkungen der Struktur des Betons (z. B. Gesteinskörnung und Luftporen) auf die Schallausbreitung bei Gruppenstrahler-Anregung zu untersuchen, wurden danach 2D-EFIT-Simulationsrechnungen durchgeführt. Bei dieser numerischen Finite-Elemente-Modellierung kann die Auswirkung der heterogenen Struktur des Betons theoretisch eingeschätzt werden.

4.5.1 Schallfelder von Gruppenstrahlern im Fernfeld

Um die Arbeitsweise und Eigenschaften eines Gruppenstrahlers zu erläutern, werden zunächst vereinfachte Randbedingungen, wie die der Schwinger-elemente als schmale Streifen in einem linearen Array und die Ausbreitung nur einer Wellenart im schubspannungsfreien Medium (Flüssigkeiten und Gase) bei harmonischer Anregung, angenommen. Anschließend können einige grundsätzliche Überlegungen analog der Betrachtungsweise eines optischen Beugungsgitters vorgenommen werden [7].

Ein Array soll aus n Schwinger-elementen (Elementbreite $b \rightarrow 0$) mit dem Schalldruck P_0 , die jeweils den Abstand a zueinander haben, bestehen. Die Elemente sollen gleichphasig und mit gleicher Amplitude angeregt werden. Der betrachtete Abstand sei groß gegen die Apertur $(n-1)a$ (Bereich der Fraunhofer Beugung).

Die Phasendifferenz δ zwischen zwei benachbarten Wellen in Abhängigkeit vom Winkel φ (**Abb. 21**) beträgt

$$\delta = 2\pi \frac{a}{\lambda} \sin \varphi . \quad \text{Gl. 12}$$

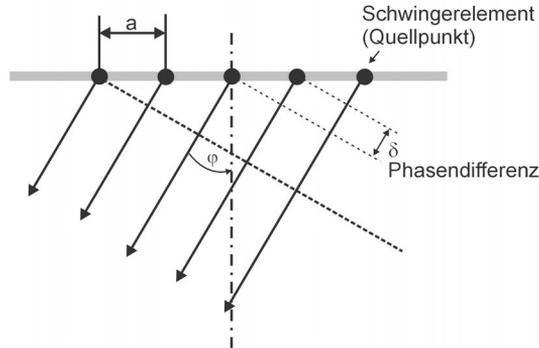


Abb. 21: Beugung am Gitter (schematisch).

Für den Gesamtschalldruck P_{ges} ergibt sich mit der sog. Gitterbeugungsfunktion

$$P_{ges} = P_0 \frac{\sin\left(n \frac{\delta}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\delta}{2}\right)} = P_0 \frac{\sin\left(\pi n \frac{a}{\lambda} \sin \varphi\right)}{\sin\left(\pi \frac{a}{\lambda} \sin \varphi\right)}. \quad \text{Gl. 13}$$

Da reale Schwingerelemente immer eine endliche Breite b haben, überlagert sich die Gitterbeugungsfunktion mit der Spaltbeugungsfunktion

$$P = P_0 \frac{\sin\left(\frac{\pi b}{\lambda} \sin \varphi\right)}{\frac{\pi b}{\lambda} \sin \varphi}. \quad \text{Gl. 14}$$

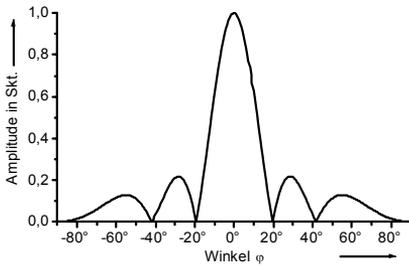
Diese führt mit der Wellenzahl k nach Normierung und der Berücksichtigung eines zusätzlichen Strahlableitungswinkels ϑ zur Gleichung der Fernfeld-Richtcharakteristik eines Gruppenstrahlers $R(\varphi)$ [35]. In der Gl. 15 ist mit n die Anzahl der angeregten Elemente, mit b die Elementbreite und mit a der Abstand der Schwingermitten bezeichnet

$$R(\varphi) = \frac{\sin\left(\frac{1}{2} k b \sin \varphi\right)}{\frac{1}{2} k b \sin \varphi} \frac{1}{n} \frac{\sin\left(n \frac{1}{2} k a (\sin \varphi - \sin \vartheta)\right)}{\sin\left(\frac{1}{2} k a (\sin \varphi - \sin \vartheta)\right)} \quad \text{Gl. 15}$$

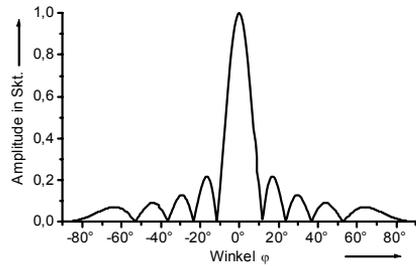
mit $k = 2\pi/\lambda$.

Nachfolgend wird anhand der Gl. 15 gezeigt, wie sich eine Änderung der einzelnen Parameter auf die Richtcharakteristik auswirkt [15], [35]. Die Breite der Schwingerelemente b und die Wellenlänge λ wurde entsprechend den üblichen Größenordnungen des Niederfrequenz-Ultraschalls angepasst.

Eine größere Anzahl von Schwingerelementen n verringert den Öffnungswinkel des Hauptschallbündels und verbessert damit die laterale Auflösung (s. **Abb. 22**).



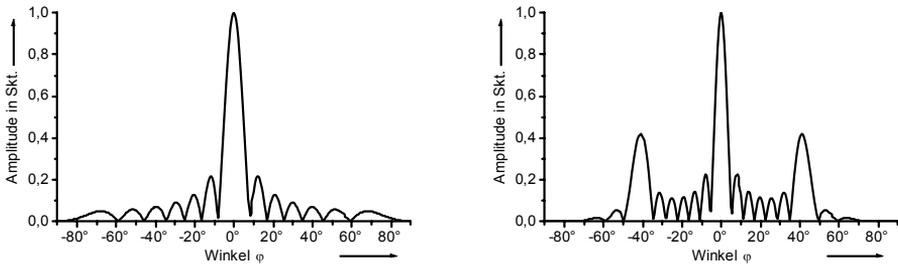
Anzahl der Schwingerelemente $n = 3$



Anzahl der Schwingerelemente $n = 5$

Abb. 22: Betrag der Richtcharakteristik für $a = 40 \text{ mm}$, $b = 40 \text{ mm}$ und $\lambda = 40 \text{ mm}$ als Funktion von Winkel φ .

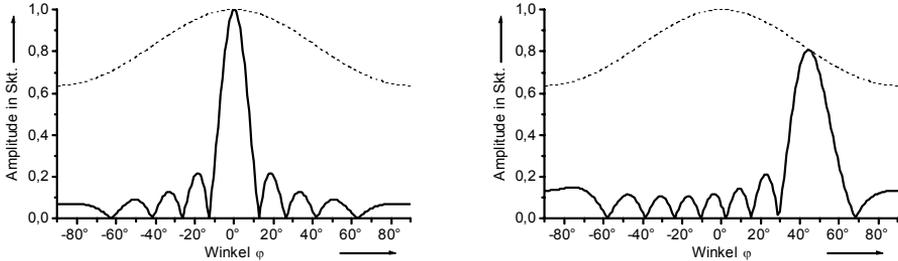
Abb. 23 zeigt, dass durch einen zunehmenden Elementabstand a die Stärke und die Anzahl von Gitterkeulen ansteigt.



Abstand der Schwingerelementmitten $a = 40 \text{ mm}$ Abstand der Schwingerelementmitten $a = 60 \text{ mm}$

Abb. 23: Betrag der Richtcharakteristik für $n = 7$, $b = 40 \text{ mm}$ und $\lambda = 40 \text{ mm}$ als Funktion von Winkel φ .

Beim Schwenken des Schallstrahls verbreitert sich das Schallbündel. Die gestrichelte Linie entspricht der Spaltbeugungsfunktion eines Einzelementes (s. **Abb. 24**).

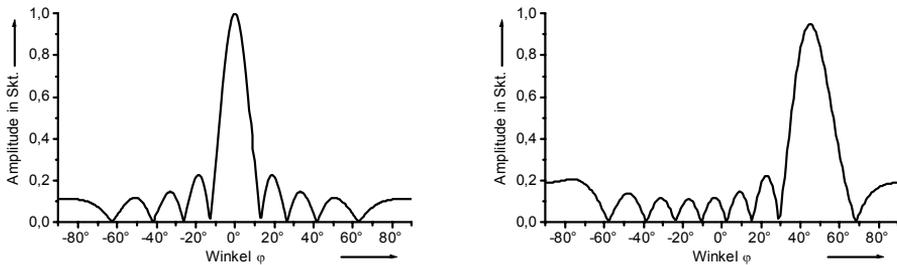


Schwenkwinkel $\vartheta = 0^\circ$

Schwenkwinkel $\vartheta = 45^\circ$

Abb. 24: Betrag der Richtcharakteristik für $n = 9$, $a = 20 \text{ mm}$, $b = 20 \text{ mm}$ und $\lambda = 40 \text{ mm}$ als Funktion von Winkel φ und die Spaltbeugungsfunktion eines Einzelementes (gestrichelt).

Damit bei großen Schwenkwinkeln die Empfindlichkeit nur wenig abfällt, sollte die Schwingerbreite $b < \lambda$ gewählt werden (s. **Abb. 25**).



Schwenkwinkel $\vartheta = 0^\circ$

Schwenkwinkel $\vartheta = 45^\circ$

Abb. 25: Betrag der Richtcharakteristik für $n = 9$, $a = 20$ mm, $b = 10$ mm und $\lambda = 40$ mm als Funktion von Winkel φ .

Für die Berechnungen wurden Linear-Arrays als Gruppenstrahler-Prüfköpfe vorausgesetzt. Die einfache analytische Modellierung nach [35] kann nur die grundlegenden Parameter erfassen, versagt aber z. B. bei der eingehenderen Untersuchung des Einflusses der Schwingerform. Um den Einfluss der Schwingeranordnung, -form und -größe sowie die sich dadurch ergebenden Prüfkopf-Zwischenräume im Nah- und Fernfeld theoretisch zu untersuchen, gibt es unterschiedliche numerische Modellansätze, auf die in den Kapiteln 4.5.2 und 4.5.3 eingegangen wird. In diesen Kapiteln wird überprüft, ob diese allgemeinen Ergebnisse auch auf andere Gruppenstrahlerformen übertragbar sind. Außerdem wird der Einfluss der elastischen Eigenschaften nichtschubspannungsfreier Medien (Festkörper) berücksichtigt [39], [40].

4.5.2 Punktquellensynthese

Zur Berechnung des Feldes eines ausgedehnten Wandlers wird dieser in einzelne Elementar- bzw. Punktquellen zerlegt. Als Punktquellensynthese bezeichnet man die Summation der Felder von allen Punktquellen einer strahlenden Fläche. Damit lassen sich beliebige Prüfkopfarrangements simulieren, wobei die Prüfköpfe auch unterschiedlich zeitliche Anregungen besitzen können, wie beim zeitlich gesteuerten Gruppenstrahler [29].

Die Berücksichtigung der elastischen Eigenschaften nichtschubspannungsfreier Medien (Festkörper) erfolgt bei dieser skalaren Schallfeldbeschreibung ersatzweise durch elastodynamische Punkttrichtwirkungen $R(\alpha)$.

Wenn innerhalb der Strahlerfläche die Schallschnelle konstant ist, errechnet sich der Schalldruck als Grenzübergang einer Doppelsumme zu (vergl. Gl. 11)

$$\underline{p}(\vec{r}) = \frac{j\omega\rho}{2\pi} v \lim_{N,M \rightarrow \infty} \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \frac{e^{-j\vec{k} \cdot (\vec{r} - \vec{a})}}{|\vec{r} - \vec{a}|} R(\alpha) \Delta x_n \Delta y_m . \quad \text{Gl. 16}$$

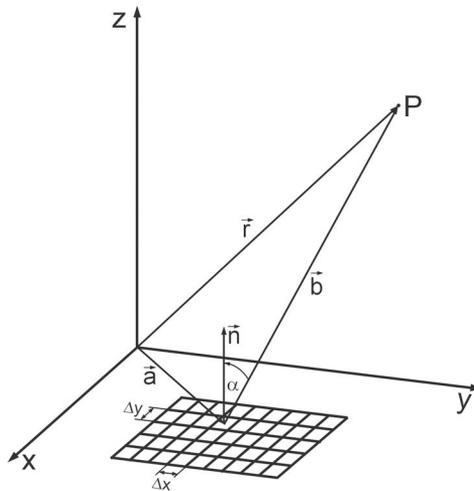


Abb. 26: Geometrie zur Schallfeldberechnung (Flächenelement des Strahlers $\Delta x \Delta y$, Abstand zwischen Quell- und Aufpunkt $|\vec{b}|$, Ortsvektoren des Quell- und Aufpunktes \vec{r}, \vec{a}).

Abb. 26 zeigt die Geometrie zur Schallfeldberechnung nach Gl. 16. Betrag $|\vec{r} - \vec{a}|$ ist der Abstand zwischen dem Quell- und dem Aufpunkt P. Bei der Berechnung repräsentiert der Mittelpunkt des Flächenelementes $\Delta x \Delta y$ den Quellpunkt einer Elementarwelle. Der Winkel α liegt zwischen \vec{b} und der Flächennormalen \vec{n} . Die Vektoren \vec{a} und \vec{r} sind die Ortsvektoren des Quell- und des Aufpunktes.

Die Punkttrichtwirkungen von punktförmigen Normal- und Tangentialspannungen an einer freien Halbraumoberfläche stellen die Richtungsabhängigkeit der Felder in einem nichtschubspannungsfreien Medium (Festkörper) dar (s. **Abb. 27**).

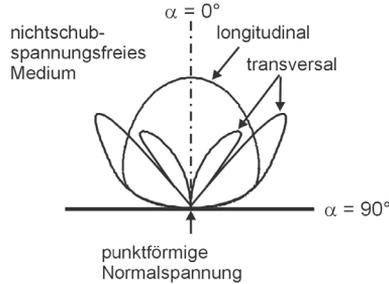


Abb. 27: Richtungsabhängigkeit der Felder einer punktförmigen Normalspannung in einem nichtschubspannungsfreien Medium (Richtcharakteristik eines sehr kleinen Strahlers in einem festen Körper) nach [23], [28] (schematisch).

Ein kleiner Normalprüfkopf ($d/\lambda < 1$) sendet sowohl einen Longitudinalwellenanteil als auch einen Transversalwellenanteil aus (und zusätzlich einen hier nicht beachteten Anteil von Oberflächenwellen). Die Gl. 17 und Gl. 18 und die Funktionen der **Abb. 28** beschreiben die Richtcharakteristiken der Longitudinal- und Transversalwellen ($R_{LN}(\alpha)$ und $R_{TN}(\alpha)$) bei einer punktförmigen Normalspannung [28], [34]. Die Symbole c_L und c_T in den nachfolgenden Gleichungen bezeichnen die Longitudinal- bzw. Transversalwellengeschwindigkeit

$$R_{LN}(\alpha) = - \frac{\left[\left(\frac{c_L}{c_T} \right)^2 - 2 \sin^2 \alpha \right] \cos \alpha}{\left[\left(\frac{c_L}{c_T} \right)^2 - 2 \sin^2 \alpha \right]^2 + 4 \sin^2 \alpha \cos \alpha \sqrt{\left(\frac{c_L}{c_T} \right)^2 - \sin^2 \alpha}} \quad \text{Gl. 17}$$

$$R_{TN}(\alpha) = - \frac{2 \sin \alpha \cos \alpha \sqrt{\left(\frac{c_T}{c_L} \right)^2 - \sin^2 \alpha}}{(1 - 2 \sin^2 \alpha)^2 + 4 \sin^2 \alpha \cos \alpha \sqrt{\left(\frac{c_T}{c_L} \right)^2 - \sin^2 \alpha}} \quad \text{Gl. 18}$$

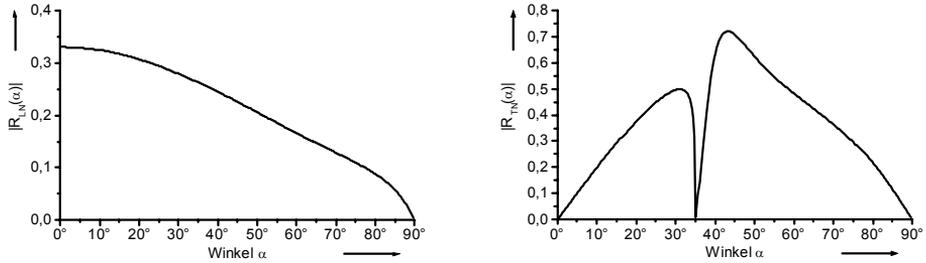
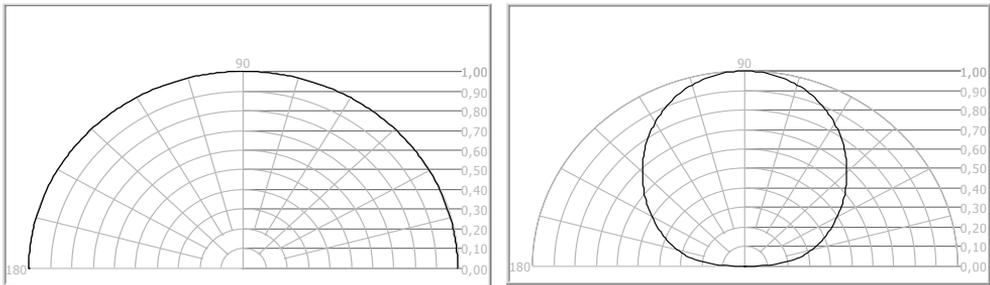


Abb. 28: Punktrichtwirkung bei einer punktförmigen Normalspannung für Beton ($c_L = 4000$ m/s, $c_T = 2300$ m/s).
 Links: Richtungsabhängigkeit der entstehenden Longitudinalwelle.
 Rechts: Richtungsabhängigkeit der entstehenden Transversalwelle.

Die Funktionen für eine punktförmige Tangentialspannung sind im Anhang 9.7 wiedergegeben.

Abb. 29 zeigt die Richtcharakteristik einer Punktquelle mit und ohne Punktrichtwirkung in Polarkoordinaten. Die Richtcharakteristik im nichtschubspannungsfreien Medium hängt sowohl von der Longitudinal- als auch von der Transversalwellengeschwindigkeit ab. Die Schallwellen breiten sich in Abb. 29 rechts im Gegensatz zum schubspannungsfreien Medium nicht kugelförmig aus.



Ohne Punktrichtwirkung, schubspannungsfreies Medium

Mit Punktrichtwirkung (Longitudinalwelle), nichtschubspannungsfreies Medium

Abb. 29: Richtcharakteristik einer Punktquelle (in Polarkoordinaten). Die Abstrahlrichtung senkrecht zur Oberfläche hat in den abgebildeten Richtcharakteristiken einen Winkel von 90° .

Um den Einfluss der akustischen Anregung in den Quellpunkten auf die Schallfelder in der Modellierung näher zu untersuchen, wurden unterschiedliche Ultraschall-Impulsformen für die Berechnung betrachtet.

Im Modell kann der Impulscharakter üblicher Ultraschallsendesignale berücksichtigt werden, indem die Berechnung mit einem Impulsspektrum durchgeführt wird. Für die Impulsanregung können sog. RCn(t) -Impulse verwendet werden. RC steht für raised cosine und n für die Anzahl der Schwingungen [30]

$$RCn(t) = \begin{cases} \left(1 + \cos \frac{\omega_m t}{n}\right) \cos \omega_m t & \text{für } -n \frac{\pi}{\omega_m} \leq t \leq n \frac{\pi}{\omega_m} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad \text{Gl. 19}$$

Diese Normimpulse werden oft für Simulationszwecke verwendet, weil sie den Impulsantworten von typischen Ultraschallprüfköpfen ähnlich sind. Durch die vorgegebene Schwingungszahl kann die Signalbandbreite beeinflusst und durch Variation der Mittenfrequenz das Maximum im Spektrum verschoben werden. Damit kann in der Berechnung das zur Modellierung verwendete Signal an die praktisch eingesetzte Prüfeinrichtung angepasst werden.

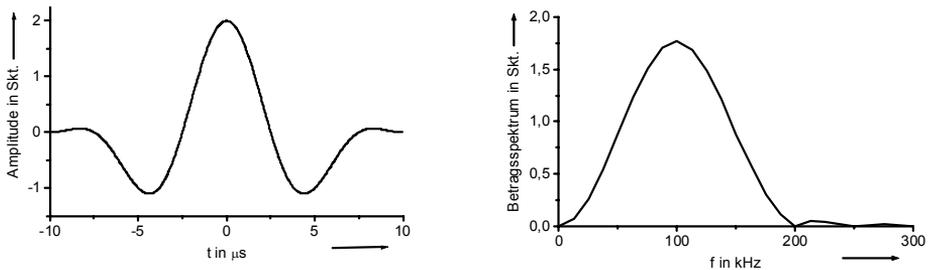


Abb. 30: RC2(t)-Impuls und Betragsspektrum.

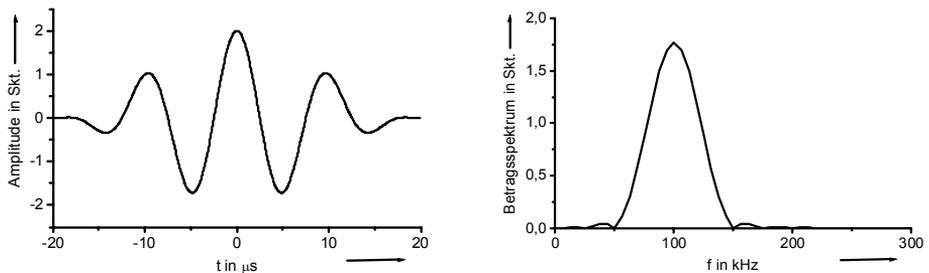


Abb. 31: RC4(t)-Impuls und Betragsspektrum.

Die **Abb. 30** und **Abb. 31** zeigen die Zeitverläufe und die Betragsspektren des RC2(t)- und des RC4(t)-Impulses. Als Mittenfrequenz wurde eine im Bauwesen übliche Prüffrequenz von $f_m = 100$ kHz vorgegeben. Deutlich erkennt man den längeren Impuls und die geringere Bandbreite des RC4(t)-Impulses.

Für die Modellierung wird der Impuls in den Frequenzbereich transformiert. Danach wird für jeden Quellpunkt das Spektrum des Sendesignals in jedem Aufpunkt berechnet und aufsummiert. Die einzelnen Spektralanteile des vom Sendepuls bewirkten Signals werden entsprechend der Rayleigh-Formel (Gl. 16) gewichtet, wobei auch die frequenzabhängige Dämpfung berücksichtigt werden kann. Der ausbreitungsbedingten zeitlichen Verschiebung entspricht im Frequenzbereich eine frequenzproportionale Phasendrehung des Phasenfaktors in Gl. 16. Geht man von einem gegebenen Fourierpaar $s(t)$ und $\underline{S}(f)$ aus, dann gilt bei einer Verzögerung des Zeitsignals $s(t)$ um t_0

$$s(t - t_0) \quad \longleftrightarrow \quad \underline{S}(f) e^{-j2\pi f t_0} . \quad \text{Gl. 20}$$

Nach der Berechnung erhält man die Zeitsignale für jeden Aufpunkt durch die inverse Fouriertransformation der aufsummierten Spektren.

Für die Darstellung der Schallfelder wurde für jeden Aufpunkt die Signalamplitude mit Hilfe der Einhüllenden des Zeitsignals bestimmt. Mit der Definition der Hilbert-Transformierten $H[x(t)]$ einer Zeitfunktion $x(t)$ als Imaginärteil eines analytischen Signals $\underline{z}(t)$ kann die Einhüllende $A(t)$ und die Phase $\varphi(t)$ des Signals berechnet werden [14] zu

$$H[x(t)] = \tilde{x}(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{x(u)}{\pi(t-u)} du \quad \text{Gl. 21}$$

mit u als reelle Hilfsvariable

$$\underline{z}(t) = x(t) + j\tilde{x}(t)$$

$$\underline{z}(t) = A(t) e^{j\varphi(t)}$$

$$A(t) = \sqrt{x^2(t) + \tilde{x}^2(t)} \quad \varphi(t) = \arctan \frac{\tilde{x}(t)}{x(t)} . \quad \text{Gl. 22}$$

Die Berechnung der Zeitsignale in jedem Aufpunkt auf einer vorgegebenen Fläche bietet auch die Möglichkeit, die Ausbreitung der Schallwellen darzustellen.

Für die Modellierung der Schallfelder von zeitlich gesteuerten Gruppenstrahlern muss zusätzlich die zeitliche Verzögerung der Prüfkopfanregung berücksichtigt werden. Dies wird durch eine weitere frequenzproportionale Phasendrehung erreicht. Im Anhang 9.4 werden die mit der Punktquellensynthese berechneten Schalldruckverläufe und Schallfelder eines typischen Ultraschallprüfkopfes für metallische Werkstoffe einem Niederfrequenz-Prüfkopf für die Anwendung im Bauwesen gegenübergestellt.

Nachfolgend wird eine Modellierungsstudie für den zeitlich gesteuerten Gruppenstrahler vorgestellt, bei der der Einfluss der Prüfkopfanordnung auf den Schwenk- und den Tiefenbereich der Fokussierung untersucht wird. Berechnungen der Schalldruckverläufe bei Fokussierung in verschiedenen Tiefen sind in Anhang 9.6 zusammengefasst.

In der vorliegenden Arbeit wurden die experimentellen Untersuchungen mit dem Gruppenstrahler an Betonbauteilen mit praxisüblichen Abmessungen und Formen durchgeführt. Dabei handelte es sich um quaderförmige Bauteile und Stufentestkörper mit parallelen Flächen, an denen in Durchschallung die Winkelabhängigkeit der Empfangssignale gemessen wurde. Entsprechend wird in den nachfolgenden Modellierungen zum besseren Vergleich mit den Experimenten die Berechnung für eine Aufpunktlinie in einem bestimmten Abstand parallel zur Strahlergruppe ausgeführt, d. h. für eine Linie, entlang derer die Empfangssignale auch gemessen werden können. Die Amplitude in Abhängigkeit vom Abstand von der akustischen Achse wird im Folgenden als Schallfeldprofil bezeichnet.

Für den Aufbau des Gruppenstrahler-Prüfkopfes standen zehn Normalprüfköpfe mit einem Schwingerdurchmesser von 34 mm zur Verfügung (siehe Kapitel 4.2). Der Gesamtdurchmesser eines Prüfkopfes inklusive des Gehäuses beträgt 45 mm.

Die **Abb. 32** zeigt eine mögliche Prüfkopfanordnung und die Lage der Prüfkopfachse und der Schwenk- bzw. Einschallebene. Mit s ist der Abstand eines Aufpunktes zur Prüfkopfachse bezeichnet, wenn die Aufpunktlinie in der Einschallebene und senkrecht zur Prüfkopfachse liegt. Der Abstand eines Punktes auf der Aufpunktlinie, die senkrecht zur Einschallebene und zur Prüfkopfachse verläuft, ist mit s' bezeichnet.

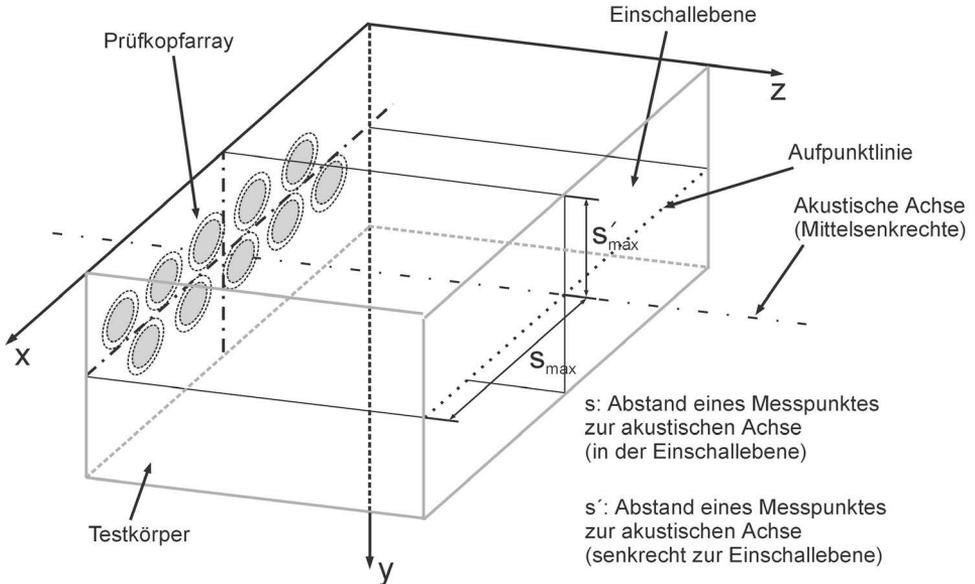


Abb. 32: Gruppenstrahler mit versetzter Prüfkopfanordnung und Lage der Prüfkopfachse und der Einschallebene.

4.5.2.1 Akustisches Anregungssignal und Schallfeldprofil

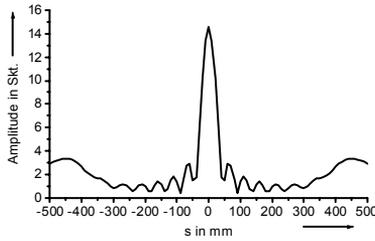
Im ersten Ansatz wurde eine Strahlergruppe durch Anordnung der Prüfköpfe entlang einer Linie aufgebaut. Durch die Gehäusewand der Prüfköpfe kommt es dabei allerdings zu Lücken zwischen den Wandler-elementen. In **Abb. 33** sind die Schallfeldprofile des Gruppenstrahlers bei unterschiedlich breitbandigen Anregungssignalen dargestellt.

Die vorgegebene akustische Anregung hat direkten Einfluss auf das Schallfeld und das Schallfeldprofil. Die Prüfköpfe waren für die Berechnung in einer Linie angeordnet und die Verzögerungszeiten entsprechend einer Punktfokussierung in 450 mm Tiefe vorgegeben. Die Mittenfrequenz betrug jeweils 100 kHz.

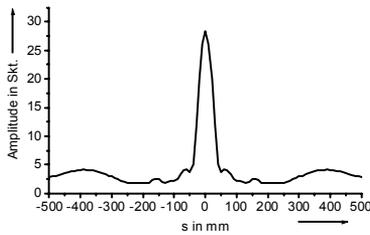
Abb. 33 zeigt, dass mit Impulsen großer Bandbreite B , d. h. kurzer Impulslänge, die Interferenzerscheinungen bzw. Gitterkeulen immer geringer werden.



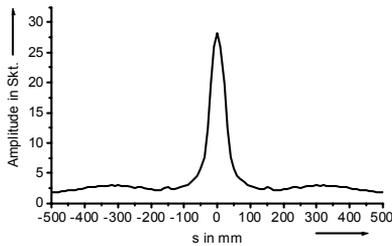
Prüfkopf-anordnung



harmonische Anregung
 $f = 100 \text{ kHz}$



Anregung mit Impulsspektrum
der Mittenfrequenz von
 $f_m = 100 \text{ kHz}$, $B_{rel} = 36\%$
(RC4(t)-Impuls nach Abb. 31)



Anregung mit Impulsspektrum
der Mittenfrequenz von
 $f_m = 100 \text{ kHz}$, $B_{rel} = 72\%$
(RC2(t)-Impuls nach Abb. 30)

Abb. 33: Modellierung des Einflusses der Bandbreite des Sendesignals auf das Schallfeldprofil. Die relative Bandbreite bezieht sich auf die Mittenfrequenz (Punktfokussierung auf $z = 450 \text{ mm}$, $s = 0 \text{ mm}$).

4.5.2.2 Reihenanzordnung der Prüfköpfe

Mit den folgenden Berechnungen wird überprüft, ob die Ergebnisse aus Kapitel 4.5.1, in dem Richtcharakteristiken in schubspannungsfreien Medien von Lineararrays untersucht wurden, auf Beispielanordnungen von kreisförmigen Prüfköpfen übertragbar sind.

Die Berechnung der Schallfelder und Schallfeldprofile erfolgte mit einem Impulsspektrum der Mittenfrequenz von $f_m = 100$ kHz ($f_{gu} = 70$ kHz, $f_{go} = 130$ kHz, $\Delta f = 3$ kHz). Für die Berechnung der Wellenausbreitung wurde als akustische Anregung ein RC2(t)-Impuls zu Grunde gelegt.

Um den Einfluss der Elementanzahl zu untersuchen, wurde die Berechnung mit sechs und mit zehn Prüfköpfen durchgeführt (s. **Abb. 34**). Wie beim Linienarray erkennt man, dass sich in dem Beispiel mit steigender Elementanzahl der Öffnungswinkel des Hauptschallbündels verringert und sich damit die laterale Auflösung verbessert.

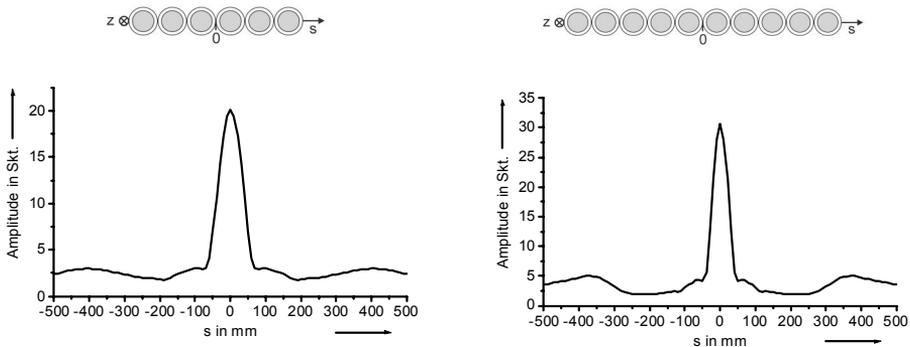


Abb. 34: Berechnung des Schallfeldprofils in Abhängigkeit der Elementanzahl (Elementdurchmesser $d = 34$ mm, Mittenfrequenz $f_m = 100$ kHz; Punktfokussierung auf $s = 0$ mm, $z = 450$ mm, links: Sechs Elemente, rechts: Zehn Elemente).

In Abb. 34 waren die Prüfköpfe so dicht wie möglich zusammengeschoben. Im Folgenden wird der Einfluss der Lücken zwischen den Elementen untersucht.

Abb. 35 zeigt das Schallfeldprofil für einen größeren Abstand der Prüfköpfe. Die Lücke zwischen zwei Schwingerelementen beträgt 9 mm. Deutlich erkennt man, dass die Amplituden der Gitterkeulen für $|s| > 200$ mm zunehmen.

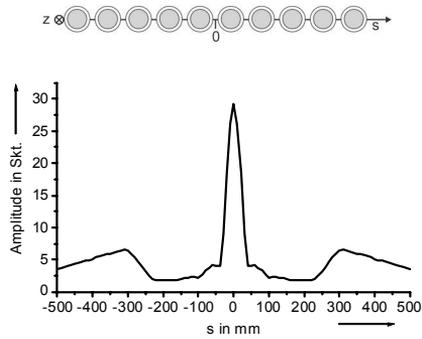


Abb. 35: Berechnung des Schallfeldprofils für einen Abstand von 9 mm zwischen den Elementen (Elementdurchmesser $d = 34$ mm, Mittenfrequenz $f_m = 100$ kHz, zehn Elemente, Punktfokussierung auf $s = 0$ mm, $z = 450$ mm).

Abb. 36 zeigt das Schallfeldprofil für eine Punktfokussierung bei $s = 200$ mm in 450 mm Tiefe. Die Prüfköpfe sind ohne Abstand zueinander in einer Reihe angeordnet. Durch das Schwenken des Schallbündels verbreitert sich die Hauptkeule etwas und die Amplitude wird im Vergleich zu Abb. 34 rechts geringer. Außerdem steigt die Amplitude der Gitterkeule an.

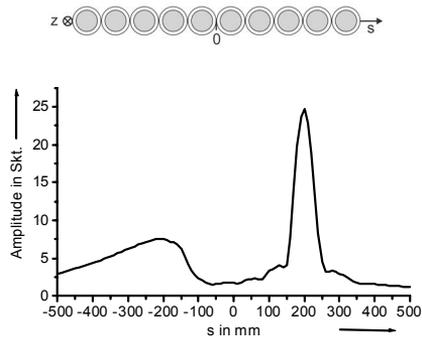


Abb. 36: Berechnung des Schallfeldprofils bei Anordnung der Prüfköpfe in einer Linie (Elementdurchmesser $d = 34$ mm, Mittenfrequenz $f_m = 100$ kHz, zehn Elemente, Abstand der Schwingermittelpunkte $a = 46$ mm, Punktfokussierung auf $s = 200$ mm, $z = 450$ mm).

In **Abb. 37** ist der Radius der Schwingerelemente auf 5 mm verkleinert worden. Die Position der Prüfkopfmitten bleibt unverändert. Der Amplitudenabfall der Hauptkeule ist etwas geringer als in Abb. 36.

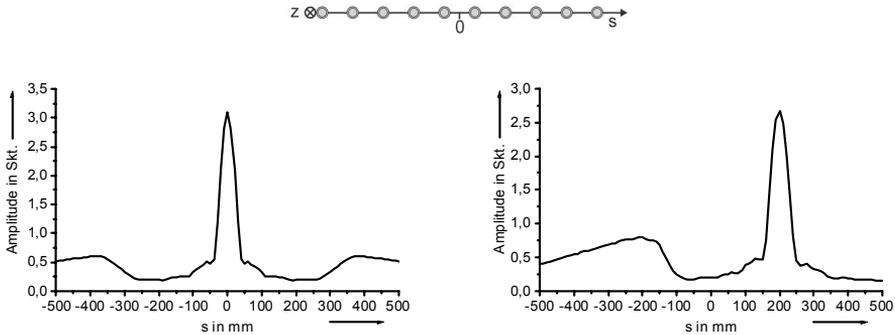


Abb. 37: Berechnung des Schallfeldprofils bei Anordnung der Prüfköpfe mit geringerem Durchmesser in einer Linie (Elementdurchmesser $d = 10$ mm, Mittenfrequenz $f_m = 100$ kHz, zehn Elemente, Abstand der Schwingermittelpunkte $a = 46$ mm, links: Punktfokussierung auf $s = 0$ mm, $z = 450$ mm, rechts: Punktfokussierung auf $s = 200$ mm, $z = 450$ mm).

Abb. 38 und **Abb. 39** zeigen die Simulationen der Longitudinalwellenausbreitung eines laufzeitgesteuerten Gruppenstrahlers bestehend aus zehn in einer Reihe angeordneten Niederfrequenz-Prüfköpfen in der Einschallebene. Die Prüfkopfpositionen sind in den Abbildungen schematisch über den Momentaufnahmen der Wellenausbreitung dargestellt. Die einzelnen Momentaufnahmen zeigen die Ausbreitung der Schallwellen im Werkstoff. Die Verzögerungszeiten der Prüfkopfsendesignale wurden so gewählt, dass sich in der Abb. 38 eine Punktfokussierung in der Tiefe $z = 450$ mm ergibt. Die mittleren Prüfköpfe haben die größte Verzögerungszeit der Sendesignale, dagegen werden die äußeren Prüfköpfe als erste angeregt. Deutlich ist eine Fokussierung der Wellenfront erkennbar.

In Abb. 39 wurde das Schallbündel zusätzlich geschwenkt. Dabei kommt es in der linken Hälfte der Momentaufnahmen zu ausgeprägten Interferenzerscheinungen.

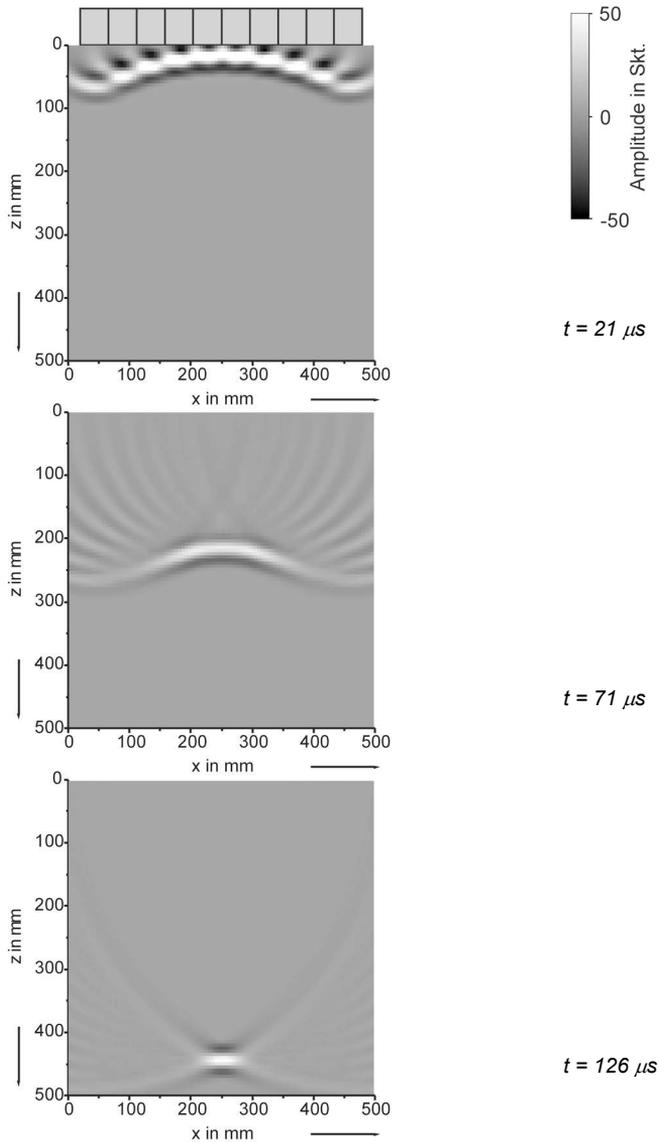


Abb. 38: Simulation der Wellenausbreitung eines laufzeitgesteuerten Gruppenstrahlers bestehend aus zehn in einer Reihe angeordneten Niederfrequenz-Prüfköpfen (Punktquellensynthese, $RC2(t)$ -Anregungsimpuls nach Abb. 30, Elementdurchmesser $d = 34 \text{ mm}$, Mittenfrequenz $f_m = 100 \text{ kHz}$, Punktfokussierung auf $x = 250 \text{ mm}$, $z = 450 \text{ mm}$).

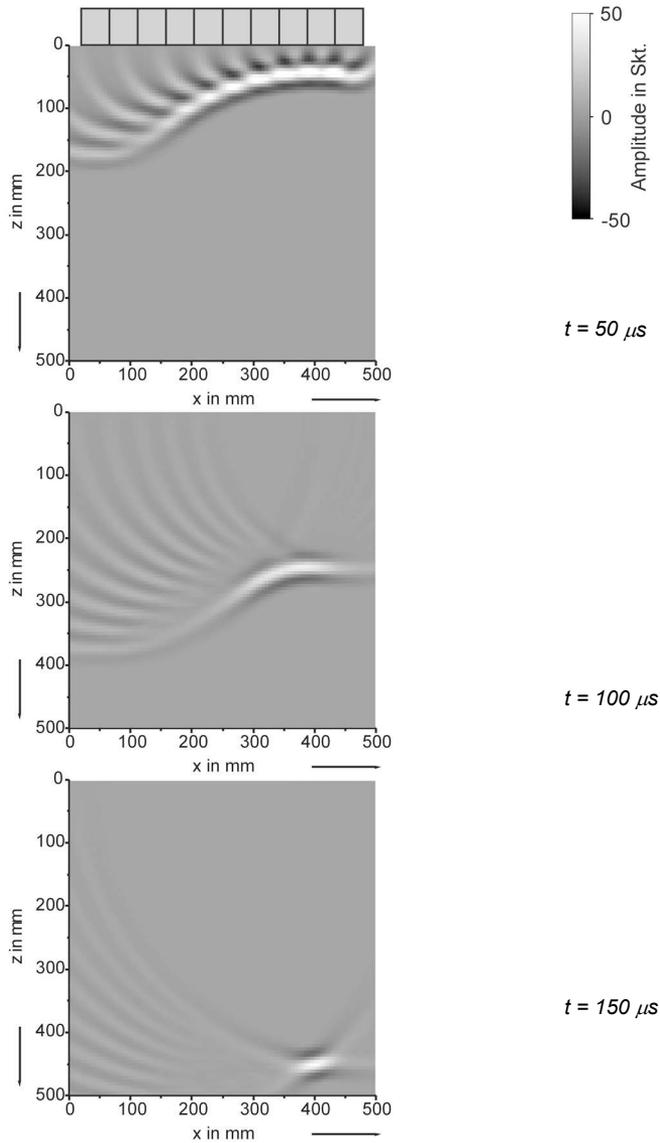


Abb. 39: Simulation der Wellenausbreitung eines laufzeitgesteuerten Gruppenstrahlers bestehend aus zehn in einer Reihe angeordneten Niederfrequenz-Prüfköpfen (Punktquellensynthese, $RC2(t)$ -Anregungsimpuls nach Abb. 30, Elementdurchmesser $d = 34 \text{ mm}$, Mittenfrequenz $f_m = 100 \text{ kHz}$, Punktfokussierung bei $x = 400 \text{ mm}$; $z = 450 \text{ mm}$).

In **Abb. 40**, **Abb. 41** und **Abb. 42** ist eine Übersicht der Schalldruckverläufe entlang der akustischen Achse der in Reihe angeordneten Prüfköpfe zusammengestellt. **Abb. 40** und **Abb. 41** zeigen links den unfokussierten und rechts den fokussierten Fall.

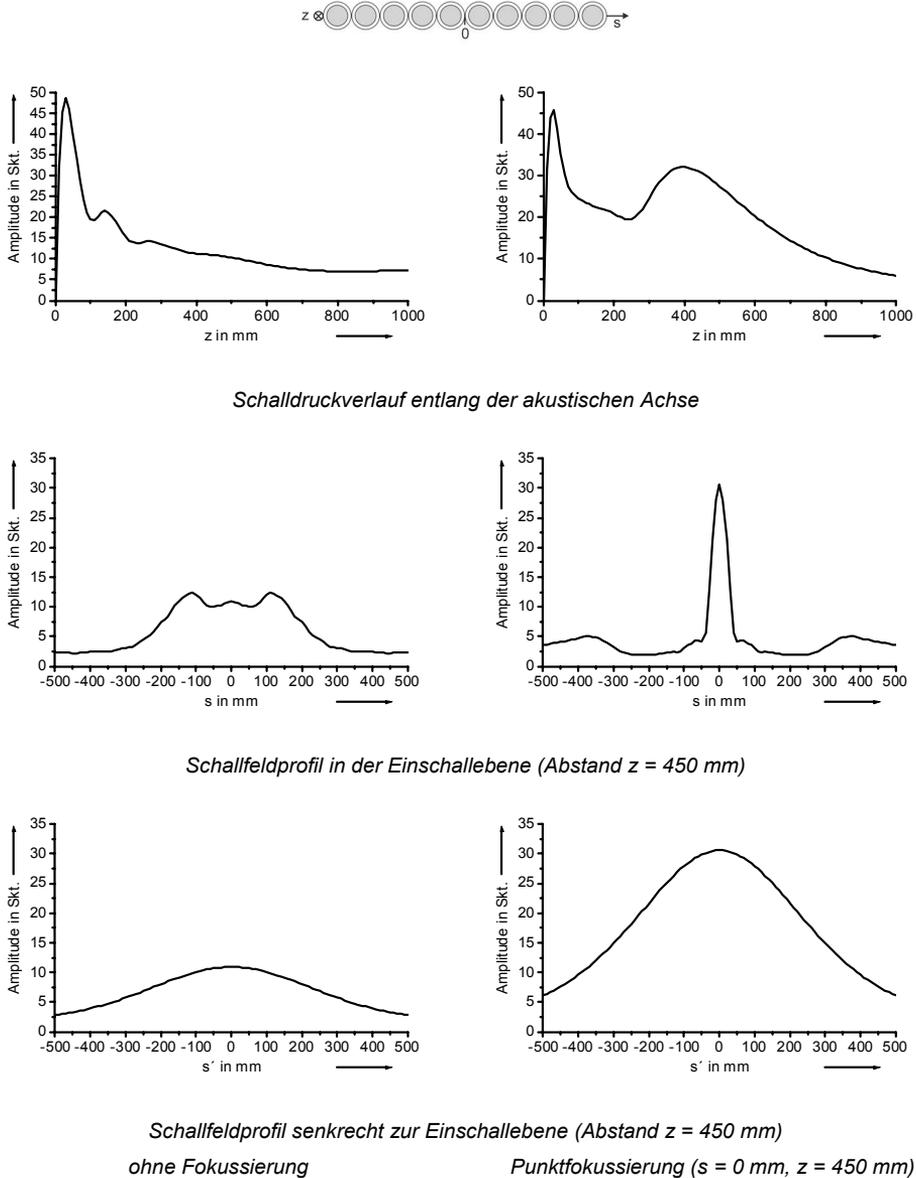


Abb. 40: Gegenüberstellung der berechneten Schalldruckverläufe mit und ohne Fokussierung bei Reihenanzordnung der Prüfköpfe (Elementdurchmesser $d = 34$ mm, Mittenfrequenz $f_m = 100$ kHz).

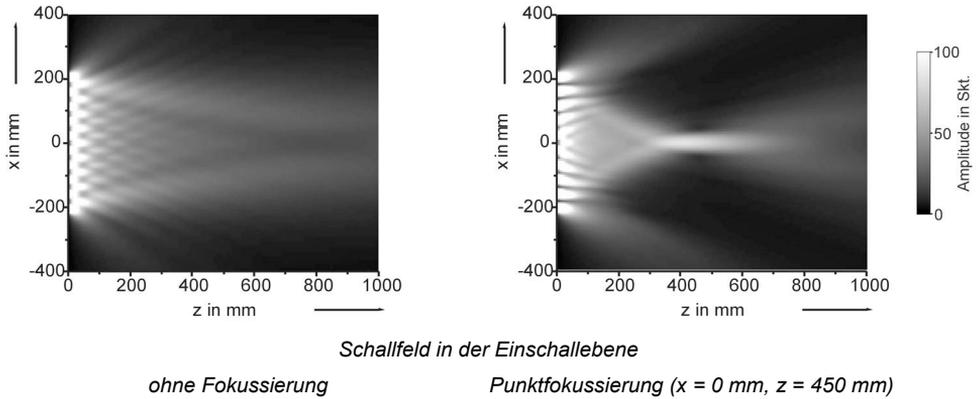


Abb. 41: Gegenüberstellung der berechneten Schallfelder mit und ohne Fokussierung bei Reihenanzordnung der Prüfköpfe (Elementdurchmesser $d = 34$ mm, Mittenfrequenz $f_m = 100$ kHz).

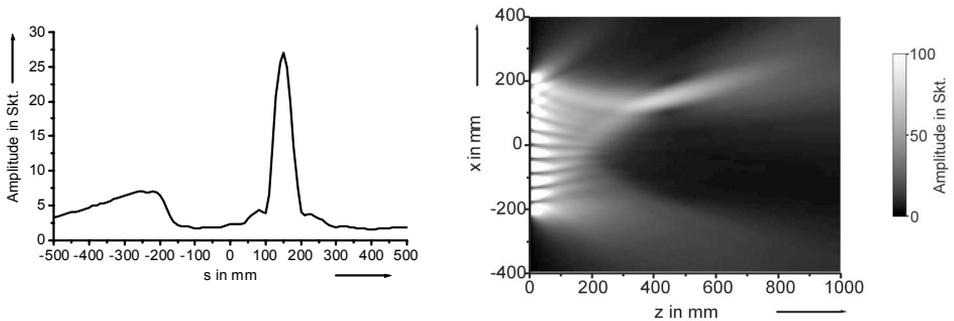


Abb. 42: Berechnetes Schallfeldprofil und Schallfeld des Gruppenstrahlers in der Einschallebene bei Reihenanzordnung der Prüfköpfe (Elementdurchmesser $d = 34$ mm, Mittenfrequenz $f_m = 100$ kHz, Punkt fokussierung auf $s = x = 150$ mm, $z = 450$ mm).

4.5.2.3 Versetzte Anordnung der Prüfköpfe

In einer weiteren Anordnung wurden die einzelnen Prüfköpfe entlang einer Zickzacklinie gruppiert. Ziel war es, durch die versetzte Anordnung der Prüfköpfe die Lücken zwischen den Wandlerelementen zu verkleinern, um dadurch störende Gitterkeulen zu unterdrücken. Für den Vergleich werden die Berechnungen mit demselben Fokuspunkt durchgeführt.

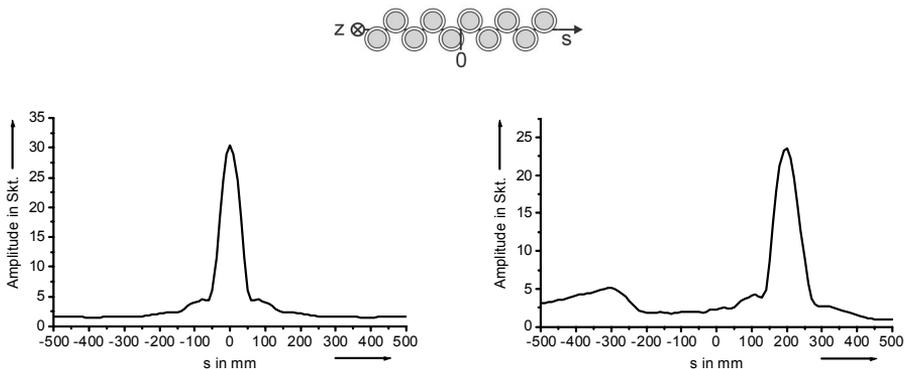


Abb. 43: Berechnete Schallfeldprofile bei versetzter Prüfkopfanzordnung (Elementdurchmesser $d = 34$ mm, Mittenfrequenz $f_m = 100$ kHz, links: Punktfokussierung auf $s = 0$ mm, $z = 450$ mm, rechts: Punktfokussierung auf $s = 200$ mm, $z = 450$ mm).

Deutlich erkennt man in **Abb. 43**, dass die Ausprägung der Gitterkeule entlang der Aufpunktlinie im Vergleich zum Schallfeldprofil der in Reihe angeordneten Prüfköpfe geringer ist (vergl. mit Abb. 36).

Abb. 44 und **Abb. 45** zeigen die Simulationen der Longitudinalwellenausbreitung eines laufzeitgesteuerten Gruppenstrahlers bestehend aus zehn versetzt angeordneten Niederfrequenz-Prüfköpfen in der Einschallebene (Punktfokussierung in der Tiefe $z = 450$ mm). Deutlich ist eine Fokussierung der Wellenfront erkennbar.

In Abb. 45 wurde das Schallbündel zusätzlich geschwenkt. Dabei sind die Interferenzerscheinungen in der Einschallebene weniger ausgeprägt als bei der Reihenanzordnung der Prüfköpfe (vergl. mit Abb. 39).

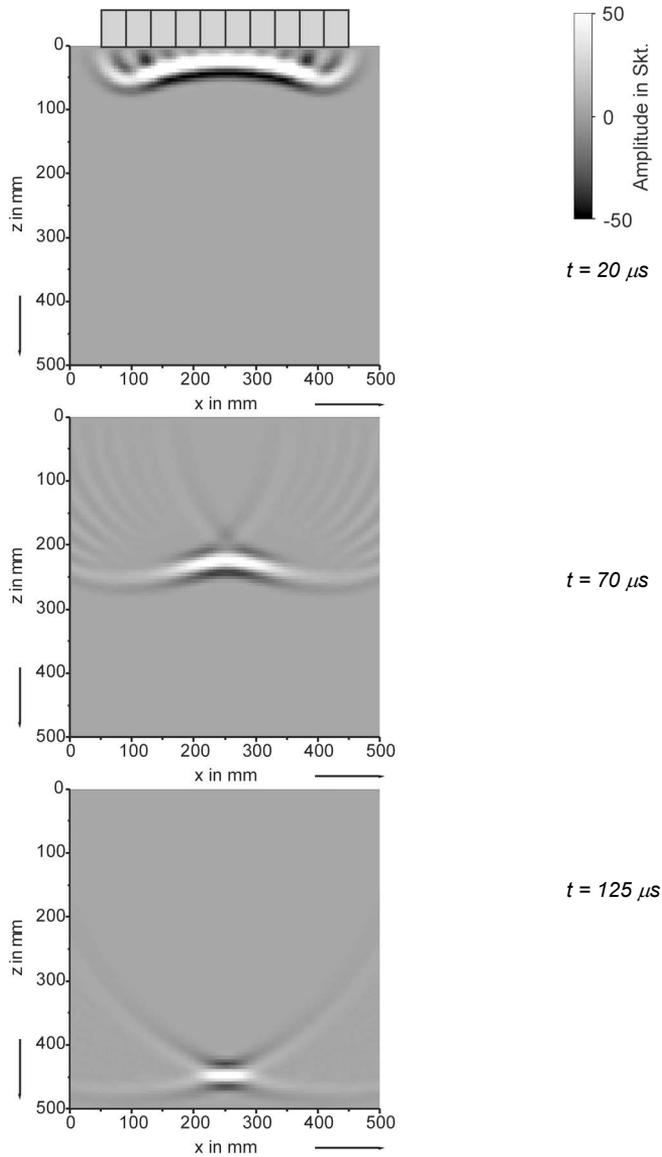


Abb. 44: Simulation der Wellenausbreitung eines laufzeitgesteuerten Gruppenstrahlers bestehend aus zehn versetzt angeordneten Niederfrequenz-Prüfköpfen (Punktquellensynthese, RC2(t)-Anregungsimpuls nach Abb. 30, Elementdurchmesser $d = 34 \text{ mm}$, Mittenfrequenz $f_m = 100 \text{ kHz}$, Punktfokussierung auf $x = 250 \text{ mm}$, $z = 450 \text{ mm}$).

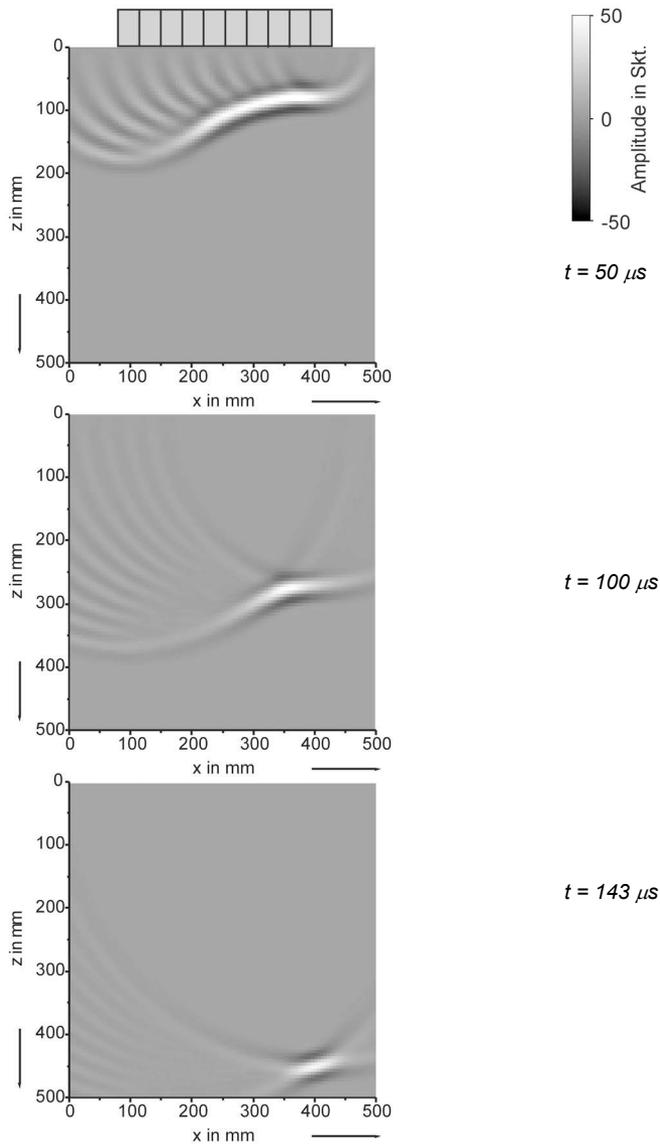
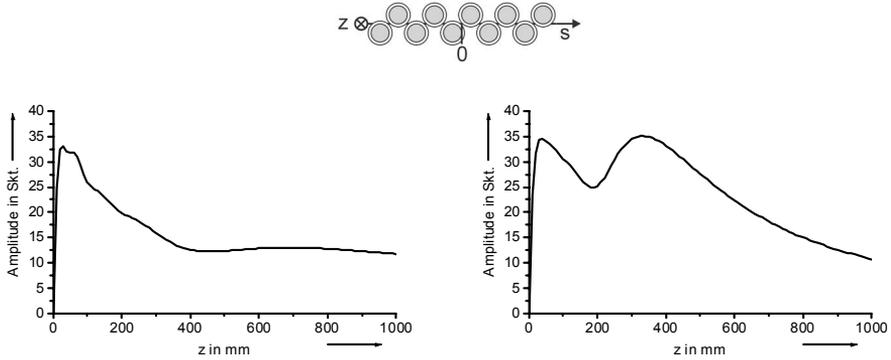
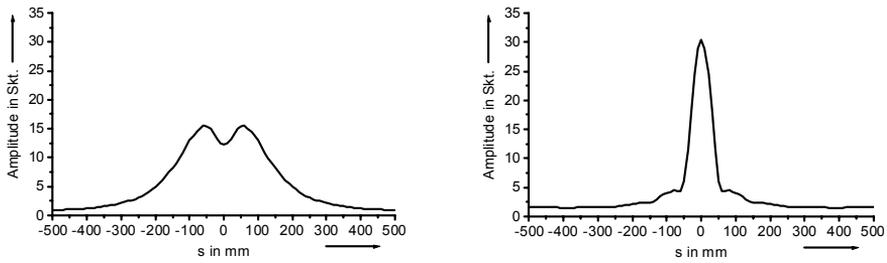


Abb. 45: Simulation der Wellenausbreitung eines laufzeitgesteuerten Gruppenstrahlers bestehend aus zehn versetzt angeordneten Niederfrequenz-Prüfköpfen (Punktquellensynthese, RC2(t)-Anregungsimpuls nach Abb. 30, Elementdurchmesser $d = 34 \text{ mm}$, Mittenfrequenz $f_m = 100 \text{ kHz}$, Punktfokussierung bei $x = 400 \text{ mm}$, $z = 450 \text{ mm}$).

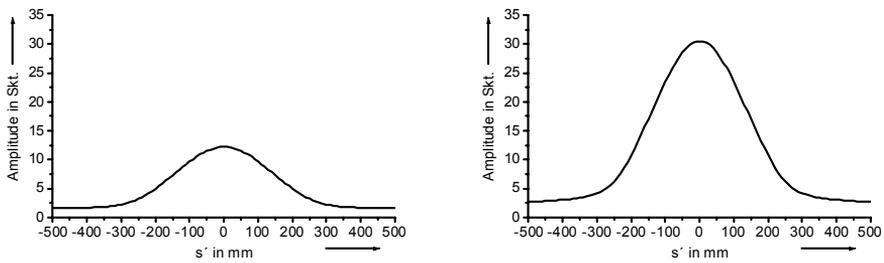
Zum Vergleich mit der Reihenanordnung zeigen die **Abb. 46**, **Abb. 47** und **Abb. 48** die gleiche Zusammenstellung (siehe Abb. 40, Abb. 41 und Abb. 42) der Schallfeldprofile für die versetzte Prüfkopfanordnung.



Schalldruckverlauf entlang der akustischen Achse



Schallfeldprofil in der Einschallebene (Abstand $z = 450$ mm)



Schallfeldprofil senkrecht zur Einschallebene (Abstand $z = 450$ mm)

ohne Fokussierung

Punktfokussierung ($s = 0$ mm, $z = 450$ mm)

Abb. 46: Gegenüberstellung der berechneten Schalldruckverläufe mit und ohne Fokussierung bei versetzter Prüfkopfanordnung (Elementdurchmesser $d = 34$ mm, Mittenfrequenz $f_m = 100$ kHz).

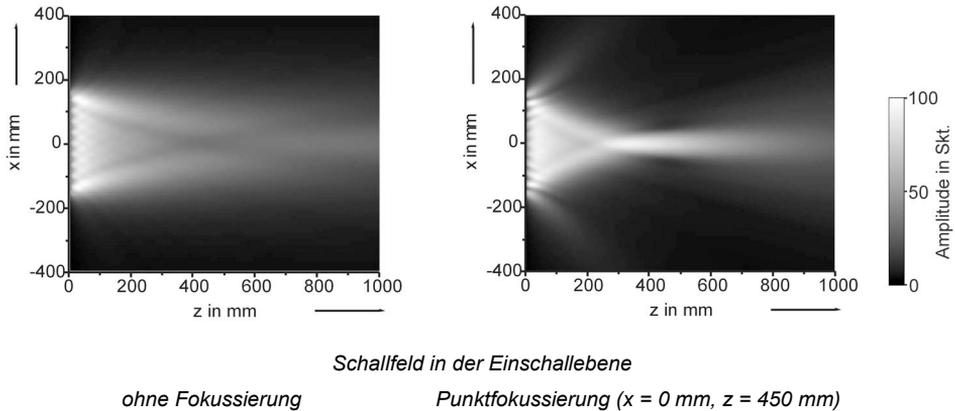


Abb. 47: Gegenüberstellung der berechneten Schallfelder mit und ohne Fokussierung bei versetzter Prüfkopf-anordnung (Elementdurchmesser $d = 34$ mm, Mittenfrequenz $f_m = 100$ kHz).

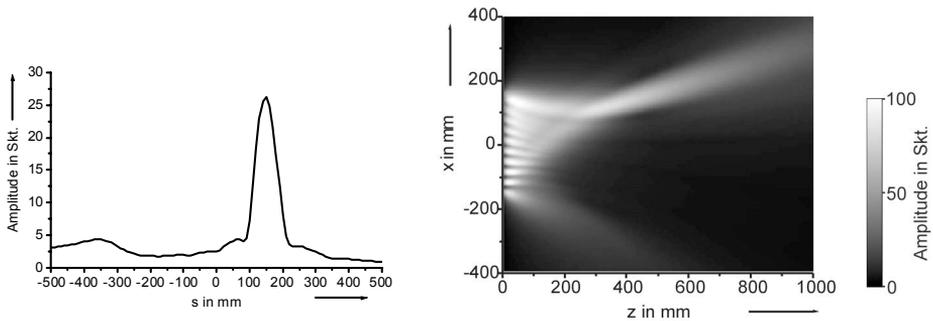


Abb. 48: Schallfeldprofil und Schallfeld des Gruppenstrahlers in der Einschallebene bei versetzter Prüfkopf-anordnung (Elementdurchmesser $d = 34$ mm, Mittenfrequenz $f_m = 100$ kHz, Punkt-fokussierung auf $s = x = 150$ mm, $z = 450$ mm).

Die Abweichung vom realen akustischen zum geometrischen Fokuspunkt ist bei den versetzt angeordneten Prüfköpfen etwas größer als bei den linear angeordneten Prüfköpfen. Der Schalldruck senkrecht zur Einschallebene nimmt bei der versetzten Prüfkopf-anordnung mit dem Abstand s' etwas stärker ab. Weiterhin zeigt sich, auch bei einem anderen Schwenkwinkel, dass die störenden Gitterkeulen im Schalldruck-verlauf bei den in Reihe angeordneten Prüfköpfen größer sind.

Durch die versetzte Anordnung der Prüfköpfe kann es aber zu störenden Gitterkeulen außerhalb der Einschallebene kommen. Um dies zu untersuchen, wird die Ampli-

tudenverteilung auf einer zur Gruppenstrahlereinschallebene senkrechten Fläche berechnet (s. **Abb. 49**). **Abb. 50** zeigt das Ergebnis der Modellierung für das geschwenkte und fokussierte Schallbündel.

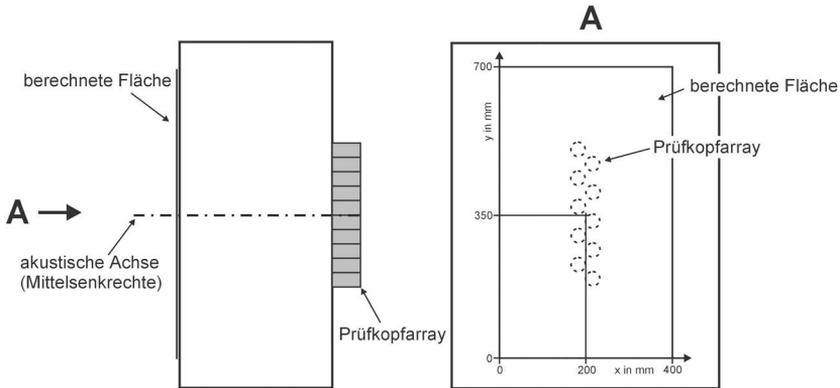


Abb. 49: Anordnung des Gruppenstrahlers und des berechneten Feldes auf dem Betontestkörper (schematisch).

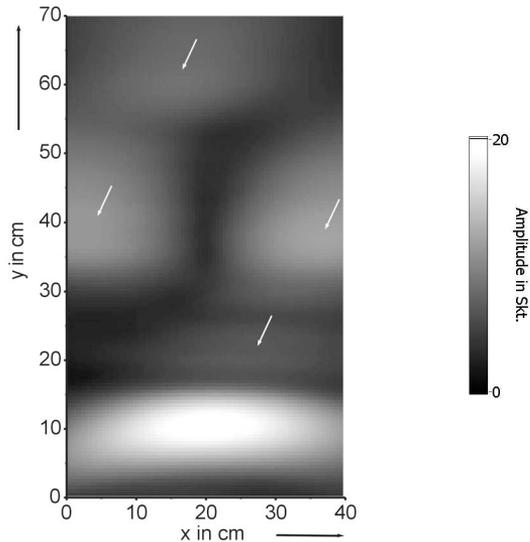


Abb. 50: Modellierung der Amplitudenverteilung im Schallbündelquerschnitt. Die Pfeile kennzeichnen die auftretenden Gitterkeulen (Elementdurchmesser $d = 34$ mm, Mittenfrequenz $f_m = 100$ kHz, Punktfokussierung $x = 200$ mm, $y = 100$ mm, akustische Achse des Gruppenstrahlers bei $x = 200$ mm, $y = 350$ mm).

In Abb. 50 sind Gitterkeulen zu beiden Seiten der Einschallebene erkennbar. Durch die versetzte Anordnung der Prüfköpfe ist das Interferenzbild nicht spiegelsymmetrisch.

Die Auswirkung der seitlichen Gitterkeulen kann je nach Prüfaufgabe bei der Bauteiluntersuchung unterschiedlich sein. Wird beispielsweise die genaue Lage von Rohrleitungen gesucht und der Gruppenstrahler senkrecht zum erwarteten Rohrverlauf auf die Betonoberfläche angekoppelt, bewirken die seitlichen Gitterkeulen keine Störanzeigen des Rohres im Ergebnis. Deren Wellenfronten kehren nicht zum Gruppenstrahler zurück.

4.5.3 Elastodynamische Finite Integrationstechnik (EFIT)

Bei den in Kapitel 4.5.2 mit der Punktquellensynthese durchgeführten Modellrechnungen zur Untersuchung des Gruppenstrahlers wurden die elastischen Eigenschaften des Mediums durch die Punkttrichtwirkungen im Quellpunkt berücksichtigt.

Mit Hilfe einer numerischen Finit-Element Modellierung mit dem EFIT-Code der Universität Kassel kann die zeitliche Ausbreitung der Schallwellen auch im inhomogenen und verlustbehafteten Beton simuliert werden [33], [55].

Um bei verschiedenen Beton-Sieblinien den Einfluss der Modenkonzersionen der verschiedenen Wellentypen durch Streuvorgänge an den Gesteinskörnern und den Luftporen auf die Ultraschallausbreitung zu erfassen, wurden im Rahmen eines Forschungsprojektes in Zusammenarbeit mit der Universität Kassel 2D-EFIT-Modellierungen durchgeführt [10]. Durch die Implementierung eines Prüfkopfmodells in EFIT, das eine zeitverzögerte Ansteuerung der Schwinger-elemente ermöglicht, konnten die bisherigen theoretischen Ergebnisse an einem sehr realistischen Modell speziell auch im Hinblick auf die Möglichkeit der Fokussierung unter dem Einfluss starker Streuungen im Beton überprüft werden. Die Anregung zu dem im Rahmen dieser Arbeit vorgestellten EFIT-Modellierungsbeispielen ergab sich im zitierten Forschungsprojekt ganz wesentlich aus den Fortschritten bei der Realisierung der Schallfeldvisualisierung, wie sie im Kapitel 5.3 vorgestellt wird. Durch die mit der Visualisierungstechnik gemessenen Schallfeldabbildungen konnte die EFIT Modellierung gut bestätigt werden. Umgekehrt kann man die gute Übereinstimmung zwischen EFIT-Rechnung und experimenteller Visualisierung auch als Bestätigung für die Zuverlässigkeit der experimentellen Technik ansehen.

Bei den durchgeführten 2D-Berechnungen wurde der Beton mit einem Zementbasiertes Material und Gesteinskörnern entsprechend einer vorgegebenen Sieblinie modelliert. Die Gesteinskörner werden durch Ellipsen nachgebildet, die statistisch nach Größe, Orientierung und Material variieren. Außerdem wurden Luftporen im Modell berücksichtigt (s. **Abb. 51**) [25].

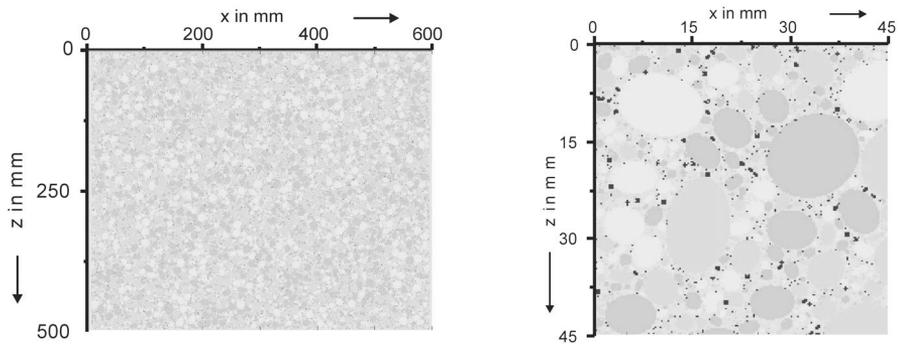


Abb. 51: Betonmodell für die EFIT-Modellierung (Universität Kassel, links: Betontestkörper 600 mm x 500 mm, rechts: Ausschnittsvergrößerung).

Momentaufnahmen der Wellenausbreitung im homogenen Medium und im Beton (16 mm Größtkorn, 2% Luftporengehalt) zeigt **Abb. 52**.

Im homogenen Medium wird die Longitudinalwellenfront fokussiert und es zeichnet sich eine Transversalwellenfront (Scherwellenfront) ab, die sich etwa halb so schnell wie die Longitudinalwellenfront ausbreitet.

Im Beton vermischt sich die Transversalwellenfront mit dem sich durch Mehrfachreflexionen ausbildenden Schweif und ist nicht mehr auflösbar. Die Hauptwellenfront wird durch die Gesteinkörner und Luftporen zerklüftet und gedämpft; sie bleibt jedoch deutlich fokussiert.

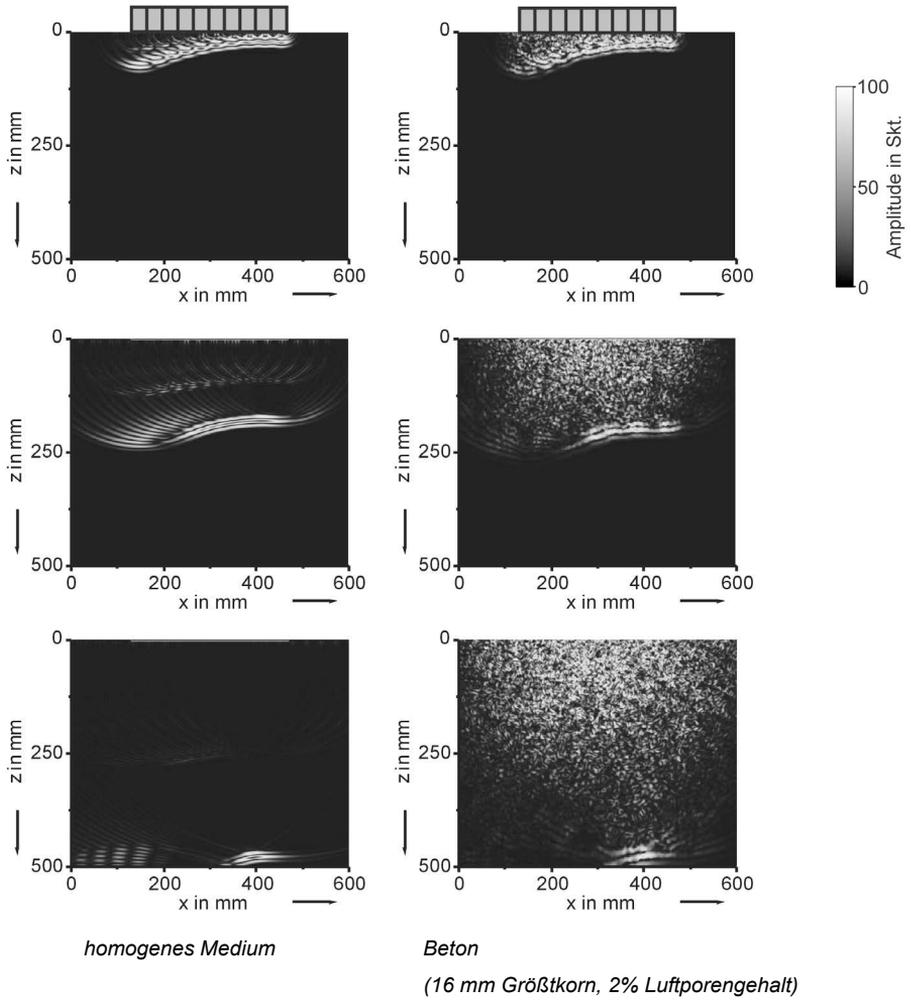


Abb. 52: EFIT-Simulation der Wellenausbreitung des Gruppenstrahlers (Universität Kassel, Momentaufnahmen, Fokussierung, Schwenkwinkel 11°).

4.5.4 Fazit der Modellrechnungen

Die Berechnungen der Schallfeldprofile mit der Punktquellensynthese zeigen, dass die Schallfeldsteuerung mit kreisförmigen Schwingerenlementen, wie sie beim Aufbau eines Gruppenstrahlers aus Standard-Niederfrequenz-Prüfköpfen vorkommen, theoretisch möglich ist. In einer Modellierungsstudie wurde der Einfluss des Elementabstandes, der Elementanzahl und -breite bzw. des Durchmessers auf das Schallfeldprofil untersucht.

Die Auswirkungen der Parameterveränderungen auf das Schallfeldprofil des Gruppenstrahlers aus kreisförmigen Schwingern haben die gleiche Tendenz wie die allgemeinen Ergebnisse im Fernfeld, bei denen eine Strahlergruppe aus schmalen Streifen vorausgesetzt wurde.

Durch die Gehäuse der einzelnen Prüfköpfe können die Schwingerenlemente nicht ohne Lücken nebeneinander angeordnet werden. Dies führt zu Gitterkeulen im Schallfeldprofil, die sich insbesondere beim Schwenken des Schallbündels bei akustischer Anregung mit langen Impulsen deutlich ausbilden.

Eine Verbesserung des Schallfeldprofils in der Einschallebene kann durch eine versetzte Anordnung der Prüfköpfe erreicht werden. Dadurch können die Schwingerenlemente bezüglich der x-Achse längs der Einschallebene ohne Lücken aneinandergereiht werden. Im Schallfeldprofil macht sich diese Prüfkopfanordnung durch eine geringere Ausprägung der Gitterkeulen beim Fokussieren und Schwenken des Schallbündels gegenüber der Anordnung in einer Reihe bemerkbar und wird für die praktischen Untersuchungen verwendet.

Mit Hilfe von EFIT konnte die zeitliche Ausbreitung der Schallfeldverteilung im inhomogenen Gefüge des Betons simuliert werden. Diese Simulation gestattet erste Einblicke in die Möglichkeiten und Grenzen einer Schallfeldsteuerung auch unter den Bedingungen einer mit dem Laufweg immer stärker werdenden Auflösung der Wellenfronten. Im Beton wird die Hauptwellenfront durch die Gesteinskörner und die Luftporen zerklüftet und gedämpft. Die Hauptwellenfront bleibt jedoch deutlich fokussiert, eine Bestätigung dafür, dass eine Schallfeldsteuerung theoretisch möglich ist.

5 Überprüfung der Modellrechnungen durch praktische Messungen

Zur Überprüfung der Ergebnisse von Modellrechnungen sind verschiedene Messungen durchgeführt worden. Die Messungen erfolgten mit dem Gruppenstrahler an Betonbauteilen mit praxisüblichen Abmessungen und Betonrezepturen. Eine sehr anschauliche, aber eher qualitative Überprüfung stellt die für diese Arbeit entwickelte messtechnische Visualisierung der Schallausbreitung in Ebenen parallel zur Schallausbreitungsrichtung dar [40]. Durch die Visualisierung der Wellenausbreitung kann anhand von Momentaufnahmen oder mit einem Film die Funktionsweise des Gruppenstrahlers demonstriert werden.

Einfachere, aber quantitativ mit Modellrechnungen eher vergleichbare Messungen sind die Erfassung von Schallprofilen entlang von Linien an Testkörpergrenzflächen senkrecht zur akustischen Achse. Zusätzlich wurden auch Schnelleverteilungen im Schallbündelquerschnitt des Gruppenstrahlers gemessen, weil durch die zweidimensionale Prüfkopfanzordnung Beugungseffekte auftreten können, die auch seitlich neben dem Gruppenstrahler zu Gitterkeulen führen können.

Für alle Messungen wurden für den Ultraschallempfang ein Normalprüfkopf, ein Exponentialhornprüfkopf und ein Laservibrometer auf Eignung getestet. Da das Abtasten des Schallfeldes mit über ein viskoses Medium an der Betonoberfläche angekoppelten piezoelektrischen Prüfköpfen große Empfindlichkeitsschwankungen und damit nicht reproduzierbare Messergebnisse zur Folge hat, wurden alle wesentlichen Messungen, bis auf eine erste orientierende Funktionsprüfung mit einem feststehenden Normalprüfkopf, mit einem berührungslos arbeitenden Laservibrometer durchgeführt.

5.1 Orientierende Messung

Für eine erste orientierende Messung zur Überprüfung der Grundfunktionen wurde der Gruppenstrahler an einer 500 mm dicken Betonplatte mit einem Größtkorn von 8 mm angekoppelt. Auf der gegenüberliegenden Seite der Platte wurde als Empfangssensor ein Normalprüfkopf genutzt. Die Position des Prüfkopfes wurde so gewählt, dass die Prüfkopfachse auf der Mittelsenkrechten des Gruppenstrahler-Prüfkopfarrays lag (s. **Abb. 53**) [37].

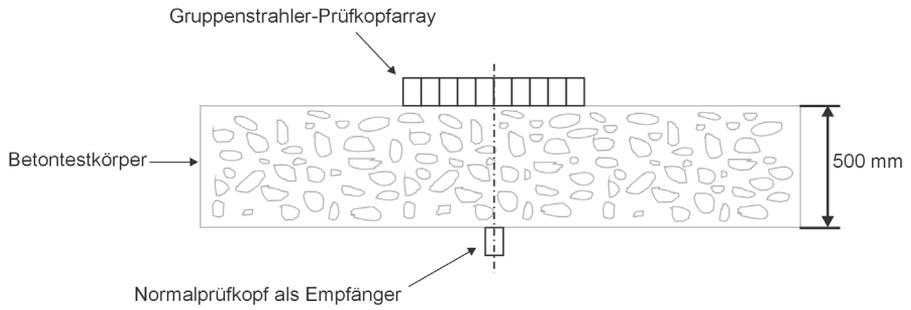


Abb. 53: Anordnung der Prüfköpfe auf dem Testkörper (schematisch).

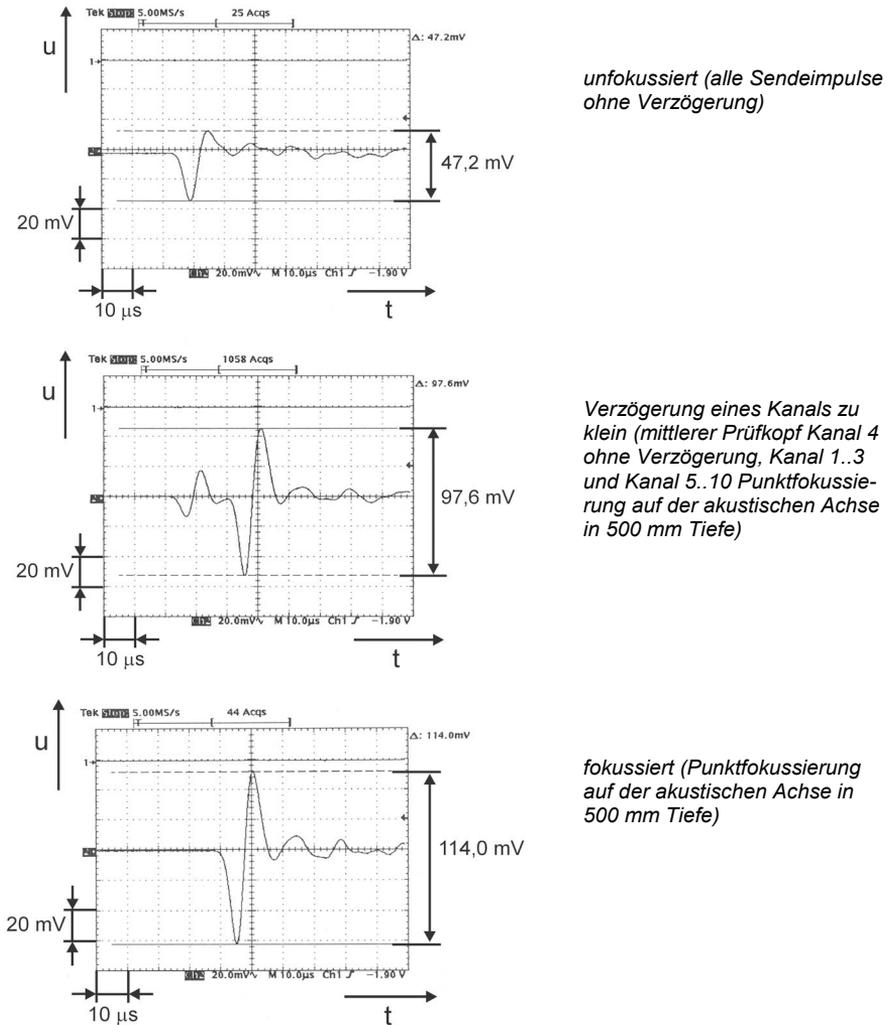


Abb. 54: Orientierende Messung der Fokussierungsmöglichkeit. In Durchschallung gemessene A-Bilder bei unterschiedlichen Verzögerungseinstellungen.

In **Abb. 54** sind die Oszillogramme der Messung, mit der die Funktion der zeitlichen Verzögerung der Sendesignale überprüft wurde, zu sehen. Aus den Bildern sind die folgenden Einzelheiten erkennbar.

Oben ist der unfokussierte Fall dargestellt. Die einzelnen Sendeimpulse der Gruppenstrahler-Prüfköpfe hatten keine Verzögerungen zueinander.

Im mittleren Bild wurden die Sendeimpulse mit Verzögerungszeiten belegt. Bei einem mittleren Kanal wurde die Verzögerung bewusst falsch gewählt, um den Einfluss des einzelnen Kanals auf die Überlagerung zum Gesamtsignal deutlich zu machen.

Das untere Bild zeigt den fokussierten Fall. Die Verzögerungszeiten wurden so gewählt, dass sich die maximale Amplitude auf der Mittelsenkrechten des Gruppenstrahlers, wo der Empfangsprüfkopf positioniert war, ergab.

5.2 Messtechnik eines Laservibrometers

Ein quaderförmiger Beton-Testkörper (s. **Abb. 55**) wurde an einer Seitenfläche (senkrecht und parallel zur Schallausbreitungsrichtung) mit einem Laservibrometer abgetastet. Bei einer Messfläche senkrecht zur Schallausbreitungsrichtung erfasst man statisch die Schallfeldform, die von den an der gegenüberliegenden Oberfläche angekoppelten Prüfköpfen erzeugt wird. Mit einer Messfläche parallel zur Schallausbreitungsrichtung kann man die Schallwellenausbreitung dynamisch verfolgen und visualisieren. Die abgetastete Oberfläche des Testkörpers war im Messfeldbereich mit einer sog. Retroreflexionsfolie beschichtet. Diese Folie streut auch bei schrägem Einfall des Laserstrahls ausreichend viel Licht für die Messung in Strahlrichtung zurück [57].

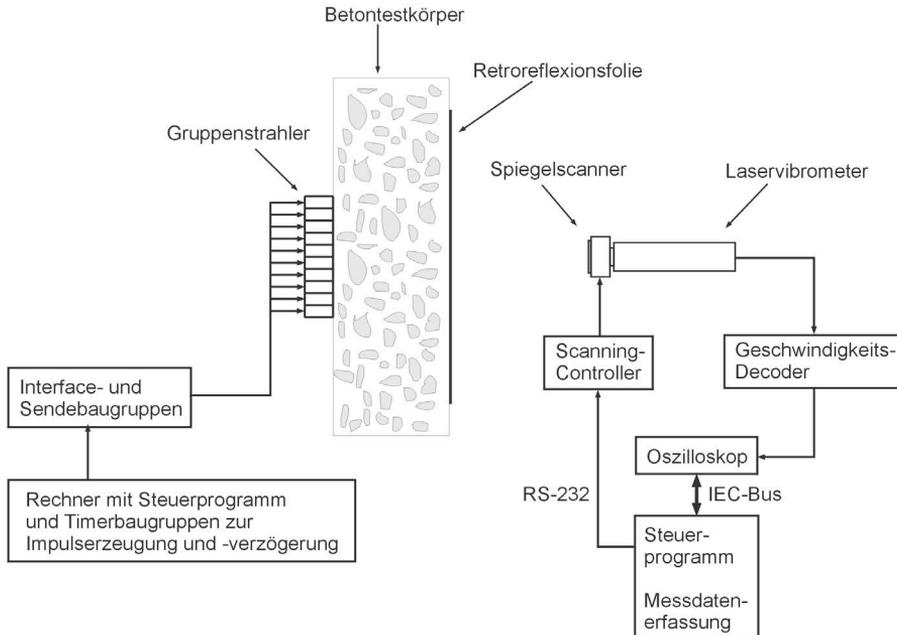


Abb. 55: Blockschaltbild des Messaufbaus mit einem Laservibrometer zur Bestimmung der Schallfeldprofile (schematisch).

In der Abb. 55 auf der linken Seite ist die Gruppenstrahlerapparatur bestehend aus einem Steuerrechner mit Timer-Steckbaugruppen zur Realisierung der Verzögerungszeiten für die Sendeimpulse, die Sendestufen und das Prüfkopffarray zu erkennen. Die Prüfköpfe sind mit Hilfe einer Schablone auf der Betonoberfläche befestigt. Als Koppelmittel wurde Vaseline verwendet.

Die Messlinie bzw. das Messfeld wurde berührungslos von einem Laserstrahl eines Laservibrometers abgetastet. Die Messposition des Strahls wurde dabei durch einen programmgesteuerten Spiegelscanner eingestellt (s. Abb. 55 rechts).

5.2.1 Messprinzip

Mit einem Laservibrometer können auf Basis des Dopplerverfahrens berührungslos Messungen von Oberflächenschwingungen durchgeführt werden. Das verwendete Messsystem besteht aus einem Controller und einem Messkopf mit dessen Objektiv der Strahl eines Helium-Neon-Lasers ($\lambda = 633 \text{ nm}$) auf die schwingende Oberfläche

fokussiert wird. Der Strahldurchmesser im Fokuspunkt beträgt ca. 100 μm in einer Entfernung von 1 m.

Zur Positionierung des Laserpunktes auf der Messoberfläche ist dem Messkopf eine xy-Abtasteinheit vorgeschaltet, die durch einen Scanning-Controller gesteuert wird. Die Abtasteinheit besteht aus zwei motorgesteuerten Spiegeln, die den Laserstrahl ablenken und auf der Messoberfläche positionieren.

Das von der Oberfläche zurückgestreute Licht, das in den Messkopf einfällt, wird nach Phase φ und Frequenz f mit einem internen Referenzstrahl verglichen. Der Vergleich der Phasen ergibt die Auslenkung $\xi(t)$ der Oberfläche. Die Frequenzdifferenz ist ein Maß für die Schwinggeschwindigkeit oder Schallschnelle $v(t)$. Um auch die Bewegungsrichtung der Oberflächenschwingungen des Messobjektes feststellen zu können, wird der Referenzstrahl moduliert. Im Controller werden die Signale über Decoderbaugruppen in weg- und geschwindigkeitsproportionale Spannungen umgesetzt und ausgegeben.

Die Schallschnelle ist durch die zeitliche Änderung der Auslenkung eines Masseteilchens gegeben. Die Schallschnelle und der Weg des Masseteilchens sind über die Frequenz miteinander verknüpft,

$$v(t) = \frac{d\xi(t)}{dt} \quad \text{Gl. 23}$$

bei harmonischen Schwingungen ergibt sich für die Amplitude $\hat{v} = 2\pi f \hat{\xi}$,

so dass prinzipiell beide Größen für Schallfelduntersuchungen geeignet sind. Mit dem verfügbaren Messsystem erreicht man mit dem analogen Geschwindigkeits-Decoder, insbesondere bei höheren Frequenzen, eine deutlich höhere Auflösung und einen größeren Dynamikbereich als mit dem digitalen Weg-Decoder [46], [47].

Die Untersuchungen an den Betontestkörpern wurden daher mit dem Geschwindigkeits-Decoder durchgeführt, d. h. es wurden die Schallschnelleverteilungen gemessen.

5.2.2 Messgenauigkeit des Messsystems

Der Geschwindigkeits-Decoder des Laservibrometers hat eine maximale Ausgangsspannung von $u_{\text{amax}} = \pm 10 \text{ V}$ und einen Innenwiderstand von $R_i = 50 \Omega$. Die Messungen wurden mit dem Empfindlichkeitsbereich von 5 mm/s/V durchgeführt, der bei

einer maximalen Frequenz von 250 kHz eine Auflösung von $0,5 \mu\text{m/s}$ aufweist. In diesem Messbereich beträgt der Amplitudenfehler laut Hersteller-Angabe $\pm 1,5 \%$ vom Messwert im Temperaturbereich von $5 \text{ }^\circ\text{C}$ bis $40 \text{ }^\circ\text{C}$. Der Linearitätsfehler des Messbereiches beträgt $\pm 1,0 \%$ vom Messwert. Zusätzlich wird ein frequenzabhängiger Amplitudenfehler in den Bereichen von 10 Hz bis 100 kHz von $\pm 0,1 \text{ dB}$ und von 100 kHz bis 250 kHz von $+0,1 \text{ dB}$ bis -1 dB angegeben [46].

Bei der Abtastung des Messfeldes ist ein weiterer Fehler zu beachten. Durch die feste Position des Spiegelscanners trifft der Laserstrahl bei Messpositionen außerhalb der Messfeldmitte schräg auf die schwingende Oberfläche. Das hat einen winkelabhängigen systematischen Fehler bei der Messung der Schwingungsnormalkomponente zur Folge, der mit Kenntnis des Neigungswinkels korrigiert werden kann (s. **Abb. 56**).

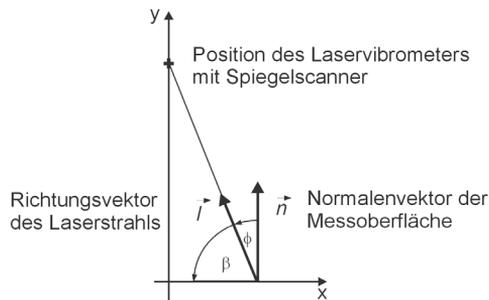


Abb. 56: Geometrie des Messaufbaues.

Mit dem Winkel ϕ (s. Abb. 56), der zwischen dem Normalenvektor der Messfläche und dem Richtungsvektor des Laserstrahls liegt, kann die senkrechte Projektion des Schallschnellevektors in Laserstrahlrichtung auf den Normalenvektor der schwingenden Oberfläche berechnet werden [6]

$$v_n = |\vec{v}| \cos \phi \quad \text{Gl. 24}$$

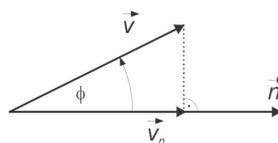


Abb. 57: Senkrechte Projektion des Schallschnellevektors auf den Normalenvektor der Messfläche.

Es ergibt sich z. B. für einen Laserabstand von 2000 mm und einer Auslenkung des Strahls auf dem Messfeld von 400 mm ein Winkel ϕ von $11,3^\circ$. Die senkrechte Projektion (s. **Abb. 57**) nach Gl. 24 ergibt eine Abweichung von 2 % der gemessenen Schallschnelle gegenüber der Normalkomponente der Schallschnelle.

Bei Messfeldabmessungen, die wesentlich kleiner als der Abstand des Laservibrometers zum Messfeld sind, ist der Fehler i. d. R. zu vernachlässigen.

Trotz einer glatten, mit retroreflektierender Folie beschichteten Oberfläche, kann es zu Fehlmessungen in einzelnen Messpunkten kommen. Gründe hierfür sind z. B. sog. Speckle-Effekte oder fehlendes Rückstreulicht.

Die Steuerung des Spiegelscanners kann wahlweise über einen IEC-Bus oder eine serielle Schnittstelle erfolgen. Der maximale Ablenkwinkel beträgt $\pm 20^\circ$. Die minimale Schrittweite des Ablenkwinkels von $0,01^\circ$, der gewählte Messabstand und der Positionierungswinkel des Messkopfes haben einen direkten Einfluss auf die minimale Schrittweite des Laserpunktes auf der Messoberfläche [47].

Das Steuerprogramm berechnet je nach momentaner Laserposition, gewünschter Schrittweite und Richtung die notwendigen Ablenkwinkel für die Scannerspiegel. Auch bei einer schrägen Positionierung des Messkopfes zur Messoberfläche sind bei der Abtastung äquidistante Abstände der einzelnen Messpositionen gewährleistet. Allerdings ist dann der Aufwand für das Einmessen der Messapparatur erheblich.

Für die Messungen mit dem Laservibrometer werden die Betontestkörper im Messfeldbereich mit Retroreflexionsfolie beschichtet, so dass möglichst viel Licht in Laserstrahlrichtung zurückgestreut wird. Trotzdem ist das nicht kohärente elektrische Rauschen oft so groß, dass das Ultraschallsignal in den Störungen untergeht. Eine signalangepasste Bandbreitenbegrenzung allein ist oft nicht ausreichend, um einen genügenden Signal-Rauschabstand zu erhalten. Nachfolgend wird allgemeiner vom Signal-Störverhältnis gesprochen, weil sich die Erläuterung auch auf zusätzlich eingestreuete Störsignale bezieht.

Durch die externe Triggerung des Ultraschallsenders kann im vorliegenden Fall eine Messung beliebig oft wiederholt werden, was eine Mittelung im Zeitbereich ermöglicht. Durch diese Mittelung eines störbehafteten Signals kann der Signal-Störabstand wesentlich verbessert werden, wenn die Störung stochastischer und das Signal deterministischer Natur sind. Die externe Triggerung wird dabei als Synchronisationssignal für die Mittelung genutzt. Das Signal-Störverhältnis des gemittelten

Signals mit m -Mittelungen, dem Nutzsignal S und dem Effektivwert der Störung σ berechnet sich zu [14]

$$\frac{\bar{S}}{\bar{\sigma}} = \sqrt{m} \frac{S}{\sigma} \quad \text{Gl. 25}$$

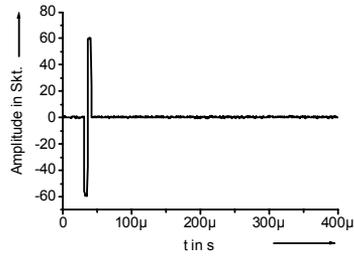
mit den gemittelten Werten

$$\bar{S} = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m S_k(t_1 + kT) = S(t_1) \text{ wenn } S_k(t_1 + kT) = S \quad \text{und} \quad \bar{\sigma} = \frac{1}{m} \sqrt{\sum_{k=1}^m \sigma_k^2} = \frac{\sigma}{\sqrt{m}} .$$

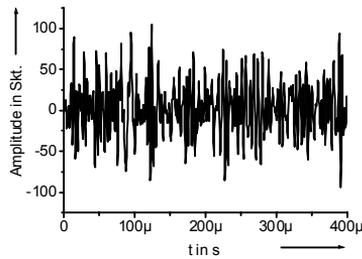
Die Signalverbesserung wächst mit der Anzahl der Mittelungen mit $m^{1/2}$.

Die **Abb. 58** zeigt den Sendeimpuls und die gemessenen A-Bilder einer Durchschallungsmessung eines Betontestkörpers mit einem Größtkorn von 32 mm mit steigender Anzahl der Mittelungen. Ohne Mittelung des Empfangssignals ist im A-Bild der primäre Ultraschallimpuls kaum zu erkennen. Erst durch eine Zeitbereichsmittelung wird das Signal-Störverhältnis verbessert und dadurch das Ultraschallsignal auswertbar.

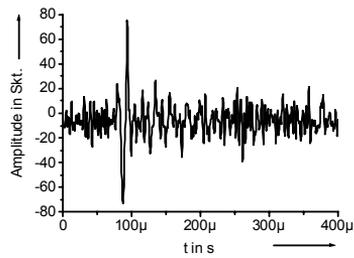
Diese Methode zur Signalverbesserung wurde durchgängig bei den folgenden Messungen angewendet.



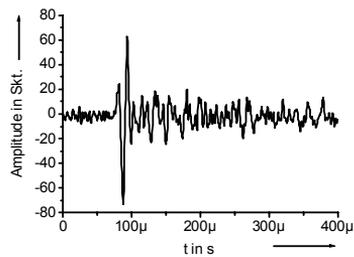
Sendeimpuls



ohne Mittelungen



30 Mittelungen



100 Mittelungen

Abb. 58: Mit dem Laservibrometer gemessene Durchschallungssignale (Betontestkörper $d = 175$ mm, 32 mm Größtkorn).

5.3 Visualisierung der Schallausbreitung

Das Prinzip des Verfahrens, das Schallfeld eines Ultraschallprüfkopfes in einer streifenden Schnittebene des Feldes abzubilden, geht auf Köhler und Schurig [19], [20] zurück und wurde von Ernst [13] weiterentwickelt.

Nachfolgend werden die Ergebnisse eines etwas modifizierten Verfahrens vorgestellt, mit dem qualitativ die Wellenausbreitung eines Ultraschall-Niederfrequenz-Prüfkopfes und eines laufzeitgesteuerten Gruppenstrahlers für Betonuntersuchungen visualisiert wird [21], [40].

Abb. 59 zeigt die Messapparatur mit Laservibrometer zur Visualisierung der Wellenausbreitung. Auf der linken Seite ist das aus zehn einzelnen Prüfköpfen bestehende Gruppenstrahlerarray zu erkennen. Rechts neben dem Betontestkörper steht das Gruppenstrahlergerät mit Sende- und Interfacebaugruppen sowie dem Steuerrechner, mit dem die Zeitverzögerungen der Sendeimpulse zwischen den Prüfköpfen eingestellt werden. Auf der rechten Seite befindet sich die Messapparatur mit dem Laservibrometer und dem vorgeschalteten Spiegelscanner.



Abb. 59: Messapparatur mit Laservibrometer zur Visualisierung der Wellenausbreitung.

Die **Abb. 60** zeigt die Geometrie der Messapparatur mit einem Laservibrometer. Gemessen wird die Schallschnelle der Oberflächenteilchenbewegung in Richtung des Laserstrahls.

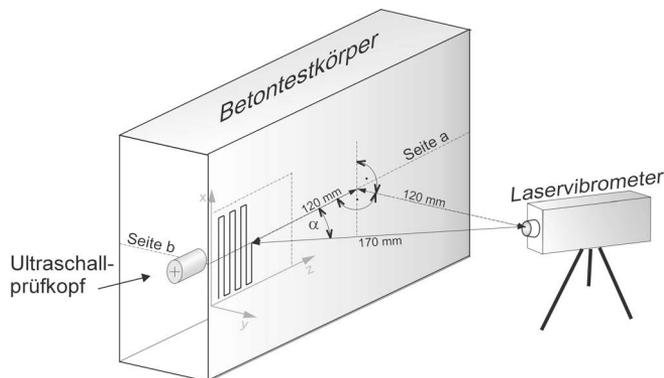


Abb. 60: Geometrie der Messanordnung.

Um die Schallausbreitung zu visualisieren, wird das Messfeld mit dem Laservibrometer schrittweise abgetastet und die einzelnen A-Bilder, die jeweils mit dem Sendesignal synchronisiert sind, in eine Orts-Zeit-Matrix gespeichert. Eine Zeitscheibe der Matrix entspricht dann einer Momentaufnahme des Schallfeldes auf der Testkörperoberfläche. Die **Abb. 61** zeigt schematisch den Aufbau der Matrix.

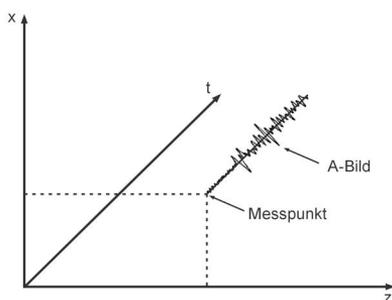


Abb. 61: Aufbau der Orts-Zeit-Matrix zur Speicherung der Messsignale (A-Bilder).

Durch die Lage des Messfeldes parallel zur Einschallebene kann im Ergebnis der Visualisierung mit zunehmendem Prüfkopfabstand eine Trennung der Wellenarten mit unterschiedlichen Schallgeschwindigkeiten beobachtet werden.

Beim verwendeten Messaufbau ist das Laservibrometer so positioniert, dass sich in der Messfeldmitte ein Winkel α von 45° zwischen Laserstrahl und Betonoberfläche ergibt [40].

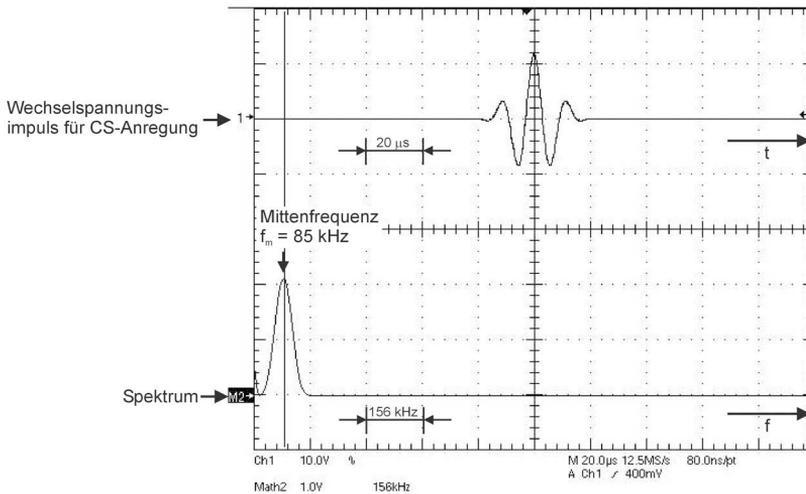


Abb. 62: Wechselspannungs-Impuls für CS-Anregung.

Möchte man über eine einfache Visualisierung hinaus die Teilchenauslenkungen auf der Betonoberfläche vollständig, d. h. vektoriell bestimmen, muss die Schallschnelle in jedem Messpunkt in drei linear unabhängige Richtungen gemessen werden. Die Messung der Normalkomponente ist direkt möglich, dagegen müssen die Tangentialkomponenten mit Hilfe der jeweils anderen beiden Messungen berechnet werden. Messsysteme, die eine Oberfläche in drei Raumrichtungen gleichzeitig abtasten und daraus die Komponenten der Schallschnelle automatisch bestimmen, sind bereits am Markt, standen allerdings für diese Arbeit nicht zur Verfügung [45].

Bei den Ultraschallprüfköpfen handelt es sich um breitbandige Niederfrequenz-Senkrechtprüfköpfe mit einer Nennfrequenz von $f_0 = 200$ kHz und einem Schwingerdurchmesser von 34 mm. Für die Messungen wurden die Prüfköpfe mit Wechselspannungsimpulsen (CS-Anregung, s. **Abb. 62**) und Rechteckimpulsen angesteuert (s. Kapitel 4.4). Die effektive Frequenz liegt dann eher bei 100 kHz und weniger (siehe Kapitel 4.2).

Die Ankopplung der Prüfköpfe erfolgte jeweils an der Kante des Betontestkörpers mit Vaseline. Das Laservibrometer tastete ein Messfeld der Größe 400 mm x 400 mm bzw. 500 mm x 500 mm mit einer Schrittweite von 5 mm mit Hilfe eines Spiegelscanners automatisch ab.

Durch die Position des Prüfkopfes an der Testkörperkante wird die Möglichkeit geschaffen, die Verteilung der Schallschnelle parallel zur Einschallebene abzutasten. Allerdings haben die Vorgänge der Wellenumwandlung beim streifenden Schalleinfall auf die Grenzfläche zwischen Beton und Luft einen zu berücksichtigenden Einfluss. Nachfolgend wurden für den streifenden Einfall 2D-EFIT-Simulationsrechnungen der Wellenausbreitung durchgeführt (R. Marklein, K. Mayer, Universität Kassel).

In **Abb. 63** sind Momentaufnahmen der Wellenausbreitung zu unterschiedlichen Zeiten abgebildet.

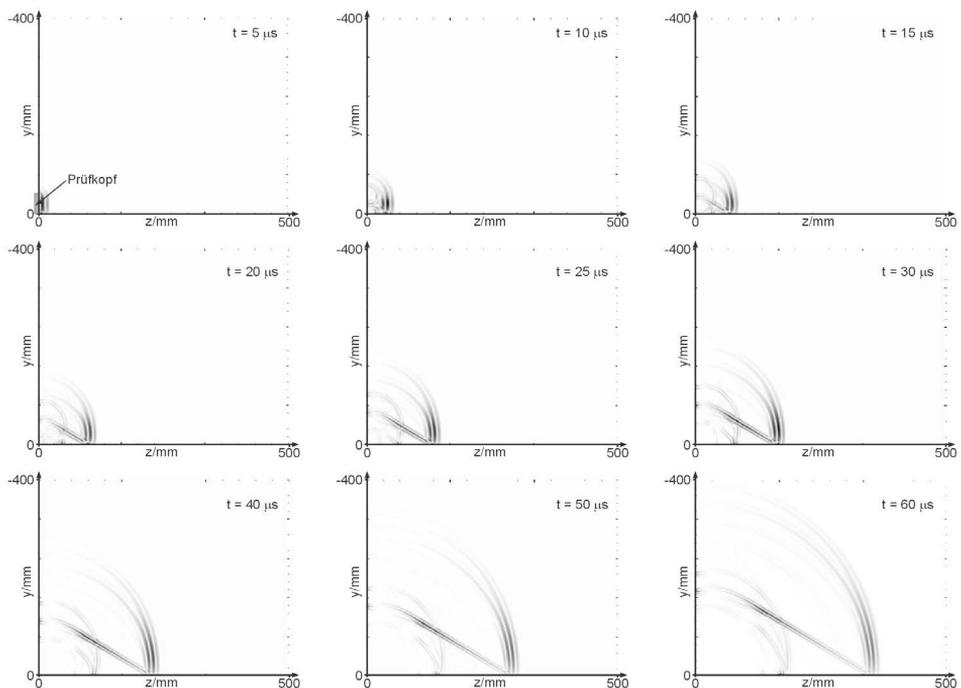


Abb. 63: 2D-EFIT-Simulation der Wellenausbreitung bei streifendem Einfall zu unterschiedlichen Zeitpunkten, Universität Kassel.

Abb. 64 zeigt schematisch die Lage der mit EFIT analysierten Simulationsebene im Testkörper.

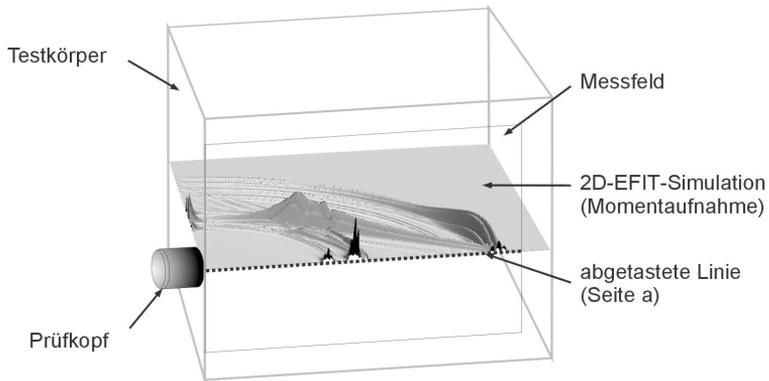


Abb. 64: Lage der mit EFIT analysierten Simulationsebene im Testkörper (schematisch).

Die **Abb. 65** zeigt die 2D-EFIT-Simulation einer Momentaufnahme der Wellenausbreitung bei streifendem Einfall gemäß der Messanordnung. Dargestellt ist ein Schnitt durch den Testkörper, bei dem die Seite a in der Abb. 60 einer abgetasteten Linie auf der Betonoberfläche in Höhe der Prüfkopfachse in der Messung entspricht.

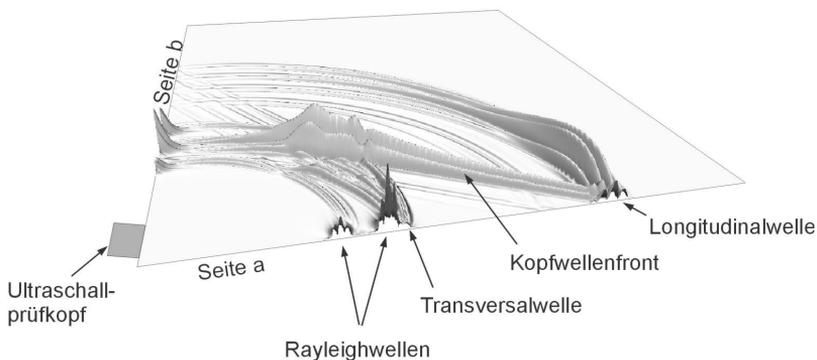


Abb. 65: 2D-EFIT-Simulation der Wellenausbreitung bei streifendem Einfall (perspektivische Darstellung), Universität Kassel.

Fällt, wie im vorliegenden Fall, die Longitudinalwelle des Prüfkopfes unter einem großen Winkel zur Normalen der Betonoberfläche ein (streifender Einfall), wird eine Kopfwellenfront angeregt, die in den Testkörper hineinläuft. Zusätzlich kommt es an der Seite a durch die Ultraschallanregung zu einer Transversalwelle geringer Amplitude, gefolgt von zwei Rayleighwellen, von denen die erste eine hohe Amplitude aufweist.

Zunächst wurde ein einzelner Senkrechtprüfkopf mit Wechselspannungs-Sendeimpulsen der Mittenfrequenz $f_m = 85$ kHz angeregt. Der Rand des Sendeprüfkopfes ist bei $x = 200$ mm und $z = 0$ mm an der Testkörperkante positioniert.

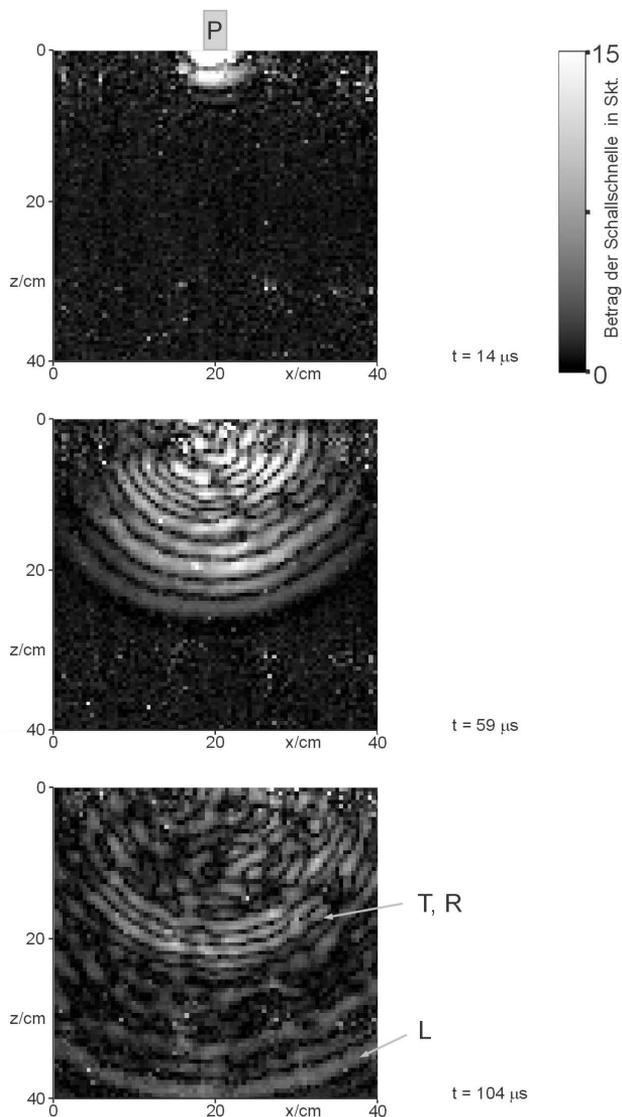


Abb. 66: Messung der Wellenausbreitung eines breitbandigen Niederfrequenz-Ultraschallprüfkopfes (P) mit Wechselspannungsimpulsanregung ($f_m = 85$ kHz). Die Pfeile zeigen auf die auftretenden Fronten der Longitudinal- (L), der Rayleigh- (R) und der Transversalwelle (T) (Prüfkopffrequenz 200 kHz, Schwingerdurchmesser $d_s = 34$ mm, Werkstoff Beton).

Auf den Momentaufnahmen in **Abb. 66** ist das stark divergierende Schallbündel des Prüfkopfes gut zu erkennen, wodurch im Ultraschall-Niederfrequenzbereich beim Impuls-Echo-Verfahren die Ergebnisinterpretation durch Störechos aus unbekannter Richtung erschwert wird. Die Position des Prüfkopfes ist oberhalb der Bilder mit P gekennzeichnet.

Aus den Momentaufnahmen kann die Spurwellenlänge λ_s an der Messfeldoberfläche $\lambda_{s85kHz} = 50$ mm abgelesen werden. Das Ergebnis der Simulation ermöglicht nun eine Zuordnung der gemessenen Wellenfronten zu den vom Prüfkopf abgestrahlten Wellen. Die schnellste Wellenfront kann über die Geschwindigkeit als Longitudinalwelle identifiziert werden. In der untersten Aufnahme nach $t = 104 \mu\text{s}$ zeichnen sich deutlich weitere Wellenfronten mit etwa der halben Longitudinalwellengeschwindigkeit ab. Der Simulation entsprechend handelt es sich um eine Transversalwellenfront gefolgt von zwei Rayleighwellenfronten.

Durch den großen Divergenzwinkel des Prüfkopfes wird die z-Komponente der Schallschnelle der Longitudinalwellenfront außerhalb der akustischen Achse kleiner. Im Folgenden wird das Schallfeld des Gruppenstrahlers für den fokussierten Fall visualisiert.

Vor der Messung wurde mit Hilfe der Punktquellensynthese die Longitudinalwellenausbreitung auf der Messfläche, die parallel zur Einschallebene des Gruppenstrahlers liegt, zu unterschiedlichen Zeiten berechnet (s. **Abb. 67**).

Im ersten Moment, kurz nach dem Aussenden der Ultraschallimpulse, sind nur die Wellenfronten der fünf an der Kante angekoppelten Prüfköpfe auf der Messfläche erkennbar. Außerdem kommt es auf der Messfläche zu einer Unsymmetrie der Wellenausbreitung, weil die Prüfköpfe, mit den für die Fokussierung paarweise gleichen Verzögerungszeiten, unterschiedliche Abstände zur Bauteilkante haben.

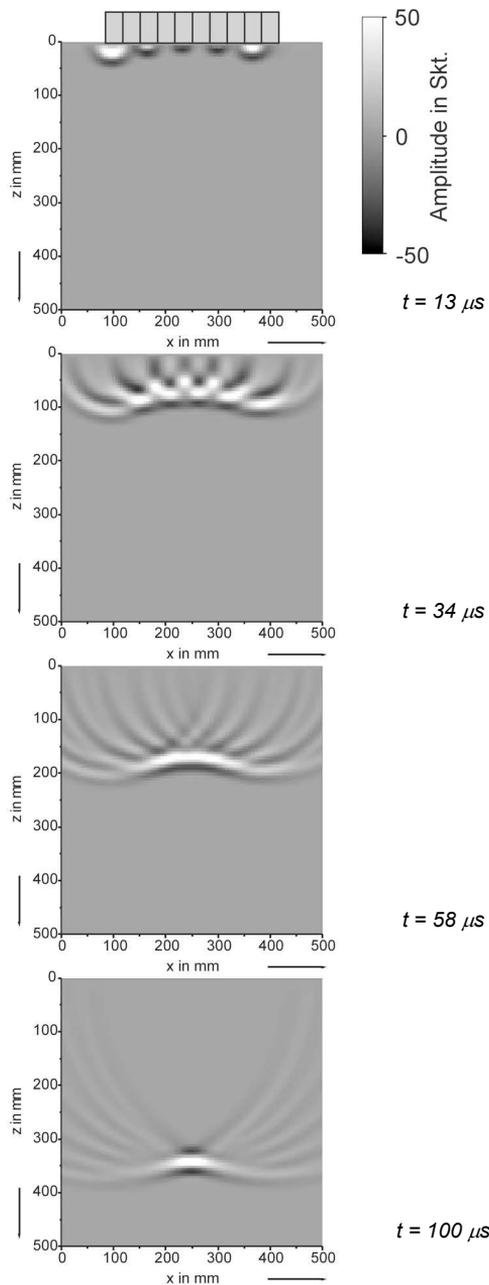


Abb. 67: Simulation der Wellenausbreitung der Longitudinalwellenfront auf der Messfläche parallel zur Einschallebene (Punktquellensynthese, $RC2(t)$ -Anregungsimpuls nach Abb. 30, Elementdurchmesser $d = 34$ mm, Mittenfrequenz $f_m = 100$ kHz, Punktfokussierung bei $x = 250$ mm, $z = 450$ mm).

In der **Abb. 68** ist die Messung der Fokussierung des Schallbündels eines laufzeitgesteuerten Gruppenstrahlers der 2D-EFIT-Modellierung gegenübergestellt. Die Position des laufzeitgesteuerten Gruppenstrahlers ist oberhalb der Bilder eingezeichnet. Die entsprechenden Verzögerungszeiten der Anregungssignale der Gruppenstrahler-Prüfköpfe waren so gewählt, dass sich eine Fokussierung des Schallbündels in der Tiefe von $z = 450$ mm ergab.

Für die 2D-EFIT-Modellierung waren die zehn Prüfköpfe als Linienarray angeordnet. In der oberen linken Momentaufnahme erkennt man, dass, wie vorgegeben, die äußeren Prüfköpfe früher als die mittleren angeregt werden. Dadurch bildet sich eine gekrümmte Wellenfront aus, die in größeren Tiefen zunehmend örtlich ungleichmäßig stark gedämpft und gestreut wird. Die Transversalwellenfront ist im Schweif der starken Streuungen nicht erkennbar.

Die rechte Spalte zeigt die Visualisierung der Schallbündelfokussierung durch eine Messung. In der ersten Aufnahme ist die zeitlich unterschiedliche Ansteuerung der Prüfköpfe zu sehen. Wie die Berechnung mit Hilfe der Punktquellensynthese erwarten ließ, sind durch die versetzte Anordnung der Prüfköpfe im Array (in y -Richtung) zuerst nur die Wellenfronten der vorderen fünf Prüfköpfe, die direkt an der Testkörperkante positioniert sind, in der Momentaufnahme zu sehen. An den unterschiedlichen Amplituden der einzelnen Wellenfronten erkennt man, dass die Prüfköpfe unterschiedlich gut angekoppelt waren. Mit zunehmender Tiefe wird die Longitudinalwellenfront durch Dämpfung und Streuung ungleichmäßig und es zeichnen sich im Gegensatz zur Modellierung zusätzlich weitere Wellenfronten mit etwa der halben Longitudinalwellengeschwindigkeit ab.

Wie in der Modellierung, bleibt die Hauptwellenfront fokussiert. Besonders deutlich wird die verbesserte Schallbündelung des laufzeitgesteuerten Gruppenstrahlers durch Vergleich mit der Visualisierung der Schallausbreitung eines einzelnen Niederfrequenz-Prüfkopfes (s. Abb. 66).

Durch den Einsatz von laufzeitgesteuerten Gruppenstrahlern kann eine Fokussierung des Schallbündels im Beton erreicht werden. Sowohl die Visualisierung durch Messung als auch die 2D-EFIT-Modellierung zeigen die mit zunehmender Tiefe ungleichmäßig stark gedämpfte Wellenfront. Deutlich erkennt man, dass die Hauptwellenfront des Gruppenstrahlers fokussiert bleibt [40].

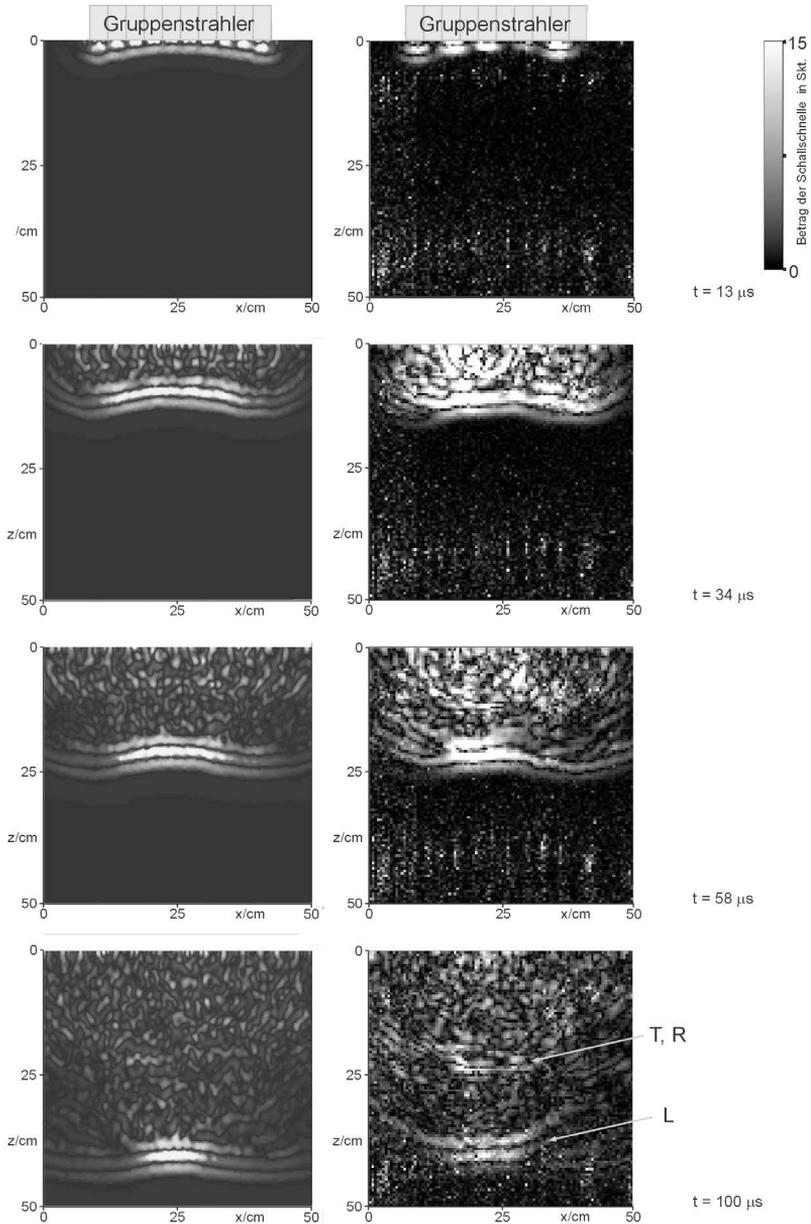


Abb. 68: Wellenausbreitung eines laufzeitgesteuerten Gruppenstrahlers (Punktfokussierung in der Tiefe $z = 450 \text{ mm}$, Werkstoff Beton). Die Pfeile zeigen auf die auftretenden Fronten der Longitudinal- (L), der Rayleigh- (R) und der Transversalwelle (T). Links: 2D-EFIT-Modellierung der Wellenausbreitung im Beton mit einem 16 mm Größtkorn und 2% Luftporengehalt (Darstellung der z-Komponente der Schallschnelle), Universität Kassel. Rechts: Messung der Wellenausbreitung mit einem Laservibrometer.

5.4 Gruppenstrahler-Schallfeldprofile

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Modellierungen und Messungen der Schallfeldprofile des Gruppenstrahlers zusammengefasst. Die auf Modellierungen basierenden Schallfeldprofile, die die theoretischen Möglichkeiten der Schallfeldbeeinflussung aufzeigen, werden mit den Ergebnissen der Messungen an zwei Beton-testkörpern mit 8 mm bzw. 16 mm Größtkorn verglichen. Anhand der gemessenen Schallfeldprofile an Testkörpern mit unterschiedlichen Sieblinien soll untersucht werden, wie sich die Schallbündelfokussierung mit steigendem Größtkorn verhält [31], [38], [39].

5.4.1 Modellierung

Parallel zu den Messungen wurde die Möglichkeit der Schallfeldbeeinflussung in Beton in Zusammenarbeit mit der Universität Kassel mit EFIT zweidimensional modelliert. Es wurden die Schallfeldprofile des Gruppenstrahlers für die Fälle unfokussiertes, fokussiertes Schallfeld sowie geschwenktes und fokussiertes Schallfeld berechnet.

Für die Modellierung der Empfangssignale auf einer 400 mm langen Aufpunktlinie wurde eine Betondicke von 500 mm, ein Größtkorn von 16 mm und ein Luftporengehalt von 2 % angenommen. Die Schrittweite auf der Aufpunktlinie beträgt 1 mm (vergl. Abb. 51).

Für die Darstellung der Schallfeldprofile wurden die Hüllkurven der Empfangssignale berechnet und die Amplituden bestimmt. Die Amplituden wurden jeweils als Funktion des Abstandes von der Mittelsenkrechten aufgetragen.

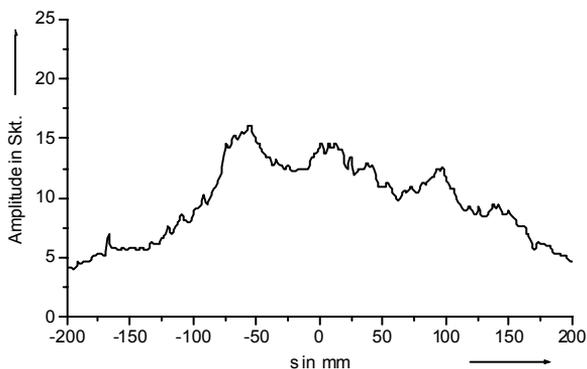


Abb. 69: Schallfeldprofil des Gruppenstrahlers mit modellierten EFIT-Daten (Schallbündel unfokussiert).

Die **Abb. 69** zeigt den unfokussierten Fall des Gruppenstrahlers. Der Gruppenstrahler hat einen schwankenden Amplitudenverlauf, der mit größerem Abstand von der Mittelsenkrechten abfällt. Die natürliche Fokussierung ist nur schwach ausgeprägt.

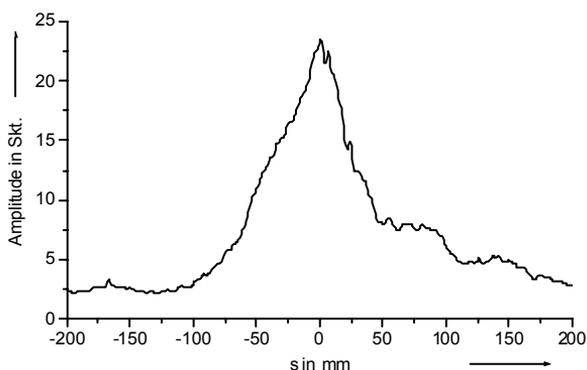


Abb. 70: Schallfeldprofil des Gruppenstrahlers mit modellierten EFIT-Daten (Punktfokussierung auf die akustische Achse in 500 mm Tiefe).

In **Abb. 70** wurde das Schallfeld des Gruppenstrahlers fokussiert. Im Bereich der Mittelsenkrechten des Gruppenstrahlers ($s = 0$ mm) ist die Amplitude maximal. Mit steigendem Abstand s von der Mittelsenkrechten fällt die Amplitude ab. Das Schall-

bündel ist deutlich auf Abmessungen unterhalb der Arraygröße eingeschnürt. Der Amplitudengewinn durch Fokussierung beträgt im Fokuspunkt 1,67.

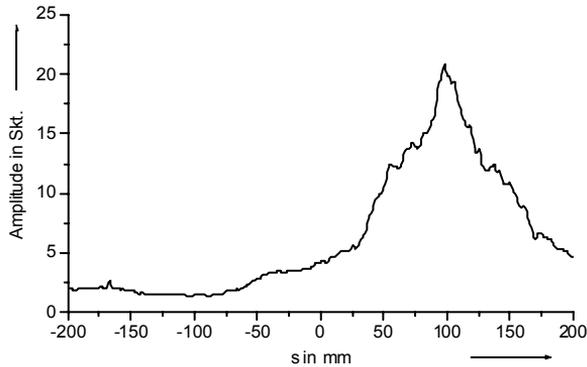


Abb. 71: Schallfeldprofil des Gruppenstrahlers mit modellierten EFIT-Daten (Punktfokussierung auf $s = 100$ mm, $z = 500$ mm).

Die **Abb. 71** zeigt den geschwenkten und fokussierten Fall. Der Abstand des Fokuspunktes von der Gruppenstrahlermittelsenkrechten beträgt $s = 100$ mm. Der Schallbündeldurchmesser bleibt auch bei diesem Schwenkwinkel stark eingeschnürt. Der Amplitudenabfall gegenüber der Fokussierung des Schallbündels auf der Mittelsenkrechten beträgt weniger als 10 %.

Die Modellierungen zeigen, dass eine Schallfeldsteuerung auch im inhomogenen Beton möglich ist. Bei der Fokussierung ergibt sich ein Amplitudengewinn und eine deutliche Einschnürung des Schallbündels, was auch beim Schwenken zu beobachten ist.

5.4.2 Messung der Schallfeldprofile

Bei der Messung des Schalldruckes mit einem Normalprüfkopf (s. Kapitel 5.1) wird zwar über die Fläche des Schwingers integriert, aber durch die unvermeidbaren Ankopplungsschwankungen ist das Abtasten entlang einer Linie oder Fläche kaum reproduzierbar und wurde deshalb nicht weiter verfolgt. Demgegenüber sind die gelegentlichen Fehlmessungen bei der Verwendung des Laservibrometers vernachlässigbar.

Die Messungen wurden an zwei verschiedenen Betontestkörpern mit unterschiedlichen Sieblinien mit 8 mm und 16 mm Größtkorn durchgeführt, um den Einfluss des Kornrauschens auf die Möglichkeiten der Schallfeldsteuerung zu untersuchen. Die bei einem Größtkorn von 8 mm erwarteten besseren Ausbreitungsbedingungen treten kurioserweise bei einem Größtkorn von 16 mm auf (s. Kapitel 5.4.3). Obwohl die Ursache zurzeit noch ungeklärt ist, stellen beide Blöcke dennoch typisch die unterschiedlichen Ausbreitungsbedingungen bei Beton dar.

Bei den folgend dargestellten Ergebnissen werden die Messlinien von einem scannenden Laservibrometer mit einer Schrittweite von 0,5 mm abgetastet. Zur Unterdrückung von nicht systematischen Schwankungen wird eine gleitende Mittelung von jeweils 30 aufeinanderfolgenden Messwerten durchgeführt. Die Messpositionen sind so dicht nebeneinander, dass in den Abbildungen der Schallfeldprofile in Bereichen geringer Steigung der Funktion kaum erkennbar ist, dass die Messpunkte nicht durch eine Linie verbunden sind.

Der Nullpunkt auf der Aufpunktlinie kennzeichnet den Schnittpunkt mit der Mittelsenkrechten des Gruppenstrahlers und s den Abstand zur Mittelsenkrechten.

Die Verzögerungszeiten der einzelnen Elemente des Arrays wurden so vorgegeben, dass sich die drei unterschiedlichen Fälle der Schallfeldbeeinflussung ergaben:

- Unfokussiertes Schallfeld: Die einzelnen Sendeimpulse der Prüfköpfe des Arrays haben keine Verzögerung zueinander.
- Fokussiertes Schallfeld: Die Verzögerungszeiten wurden so gewählt, dass sich eine Punktfokussierung auf der Mittelsenkrechten des Gruppenstrahlers in 500 mm bzw. 451 mm Abstand ergab.

- Fokussiertes und geschwenktes Schallbündel: Die Verzögerungszeiten wurden so gewählt, dass sich eine Punktfokussierung im Abstand von 100 mm zur Mittelsenkrechten des Gruppenstrahlers in 500 mm bzw. 451 mm Abstand ergab.

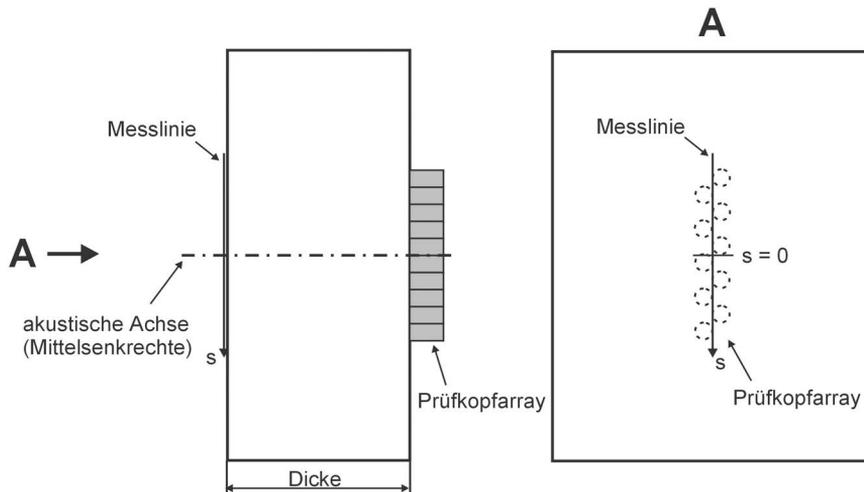


Abb. 72: Anordnung des Prüfkopffarrays und der Messlinie auf den Betontestkörpern (8 mm und 16 mm Größtkorn).

Abb. 72 zeigt schematisch die Anordnung des Prüfkopffarrays und der Messlinie auf dem Betontestkörper für die Messung des Schallfeldprofils.

5.4.2.1 Betontestkörper mit 8 mm Größtkorn

Der Betontestkörper hatte ein Größtkorn von 8 mm und eine Dicke von 500 mm. Das Laservibrometer hatte einen Abstand zur Messfeldmitte von 1730 mm und tastete die Messlinie mit einer Schrittweite von 0,5 mm ab.

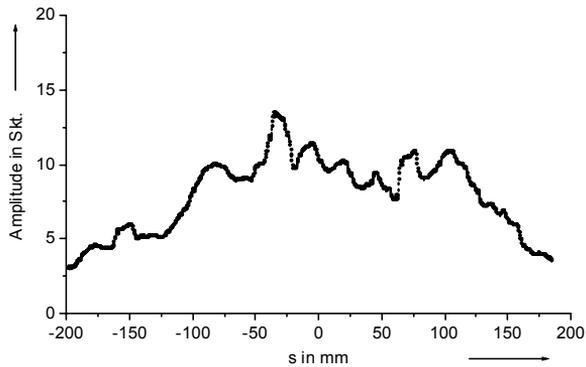


Abb. 73: Mit einem Laservibrometer in Durchschallung gemessenes Schallfeldprofil des Gruppenstrahlers, Schallbündel unfokussiert.

Die **Abb. 73** zeigt einen schwankenden Amplitudenverlauf. Im mittleren Bereich um die Mittelsenkrechte des Gruppenstrahlers ist die Amplitude maximal und fällt zu den Seiten hin mit steigendem Abstand s ab. Die natürliche Fokussierung ist wenig ausgeprägt.

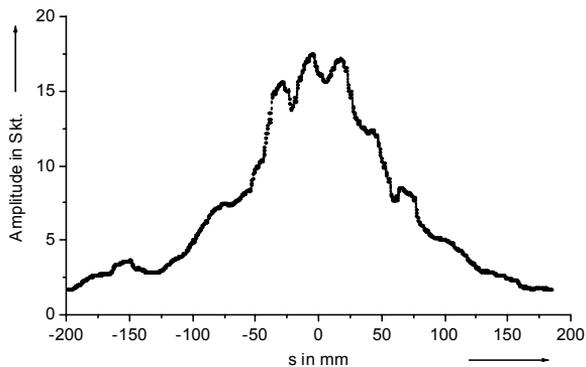


Abb. 74: Mit einem Laservibrometer in Durchschallung gemessenes Schallfeldprofil des Gruppenstrahlers (Punktfokussierung auf die akustische Achse in 500 mm Tiefe).

Im fokussierten Fall (s. **Abb. 74**) ist eine Einschnürung des Schallbündels und ein Amplitudenanstieg zu erkennen. Im Vergleich zur Modellierung ist der Fokussierungseffekt nicht ganz so deutlich.

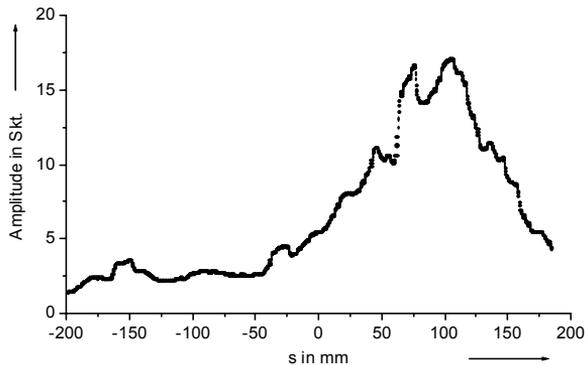


Abb. 75: Mit einem Laservibrometer in Durchschallung gemessenes Schallfeldprofil des Gruppenstrahlers (Punktfokussierung auf $s = 100$ mm, $z = 500$ mm).

Die Messung bei geschwenktem und fokussiertem Schallfeld (s. **Abb. 75**) zeigt deutlich, dass das Schallbündel eingeschnürt bleibt. Ein Amplitudenabfall gegenüber der Fokussierung des Gruppenstrahlers auf der Mittelsenkrechten ist kaum zu erkennen.

Die Messungen belegen, dass eine Schallfeldsteuerung im Beton möglich ist. Die Amplitudenverläufe in den Abbildungen zeigen die gute Reproduzierbarkeit der Messungen. Obwohl zwischen den Messungen einige Stunden oder sogar Tage lagen, sind Einzelheiten im Amplitudenverlauf, die im weiten Abstand zum Fokuspunkt liegen, in allen Messungen erkennbar. Deutlich ist z. B. in allen drei Amplitudenverläufen eine erhöhte Amplitude bei $s = -150$ mm zu sehen.

5.4.2.2 Betontestkörper mit 16 mm Größtkorn

Der Betontestkörper hatte ein Größtkorn von 16 mm und eine Dicke von 451 mm. Das Laservibrometer hatte einen Abstand zur Messfeldmitte von 1500 mm und tastete die Messlinie mit einer Schrittweite von 0,5 mm ab.

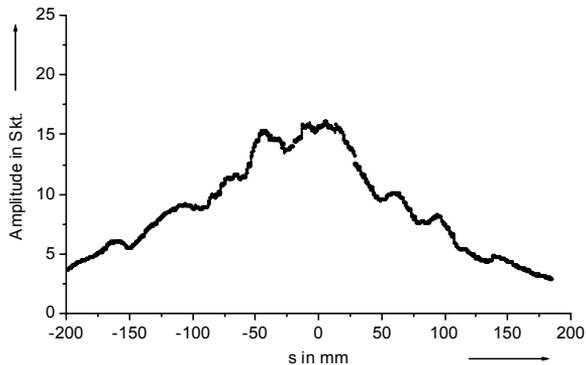


Abb. 76: Mit einem Laservibrometer in Durchschallung gemessenes Schallfeldprofil des Gruppenstrahlers, Schallbündel unfokussiert.

Abb. 76 zeigt den unfokussierten Fall des Gruppenstrahlers. Das Maximum durch die natürliche Fokussierung ist auf der Mittelsenkrechten des Strahlers bei $s = 0$ mm deutlicher ausgeprägt als in der vorherigen Messung (s. Kapitel 5.4.2.1).

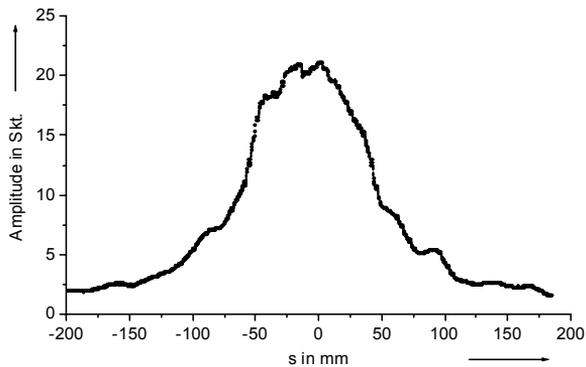


Abb. 77: Mit einem Laservibrometer in Durchschallung gemessenes Schallfeldprofil des Gruppenstrahlers (Punktfokussierung auf die akustische Achse in 451 mm Tiefe).

Das fokussierte Schallbündel in **Abb. 77** zeigt einen deutlichen Amplitudengewinn; eine Einschnürung des Schallbündels ist klar erkennbar. Der Amplitudenverlauf des Schallfeldprofils ist gleichmäßiger als beim Betontestkörper mit 8 mm Größtkorn (s. **Abb. 74**).

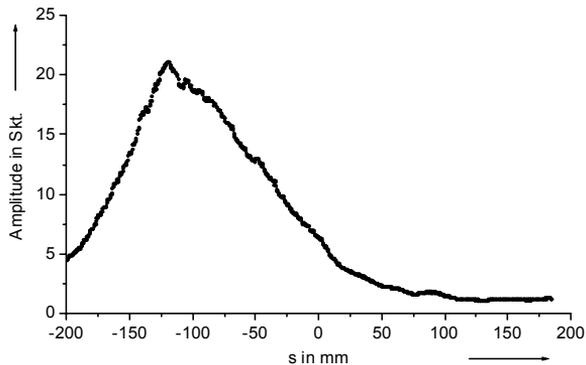


Abb. 78: Mit einem Laservibrometer in Durchschallung gemessenes Schallfeldprofil des Gruppenstrahlers (Punktfokussierung auf $s = -100$ mm, $z = 451$ mm).

Das Schallfeldprofil des Gruppenstrahlers mit geschwenktem und fokussiertem Schallbündel ist in **Abb. 78** dargestellt. In dieser Messung ist das Schallbündel in die andere Richtung geschwenkt worden, als wie im Kapitel 5.4.2.1 beschrieben. Wiederum ist der Amplitudenverlauf gleichmäßiger als bei dem entsprechenden Schallfeldprofil am Testkörper mit 8 mm Größtkorn (s. Abb. 75).

5.4.3 Bemerkungen zu den Messungen der Schallfeldprofile

In den beiden letzten Abschnitten wurden Schallfeldprofilmessungen an Betontestkörpern mit 8 mm und mit 16 mm Größtkorn durchgeführt. Die Messergebnisse deuten auf für die Ultraschallprüfung günstigeren Betoneigenschaften des Betontestkörpers mit 16 mm Größtkorn hin. Erfahrungsgemäß müsste aber eigentlich der Betontestkörper mit dem kleineren Größtkorn für Ultraschallmessungen geeigneter sein, weil mit geringeren Streuungen zu rechnen ist.

Um diesen Widerspruch zu untersuchen, wurden die beiden Betontestkörper nacheinander mit einem kommerziellen Ultraschallgerät untersucht. Mit dem Ultraschallgerät, das mit Transversalwellen arbeitet, wurden Messpunkte entlang der Aufpunktlinien abgetastet. Die Aufpunktlinien wurden zuvor mit dem Laservibrometer gescannt.

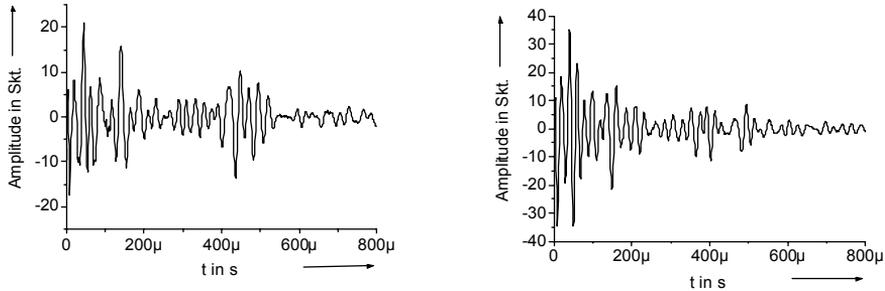


Abb. 79: A-Bilder von benachbarten Messpositionen (Betontestkörper mit 8 mm Größtkorn).

Die **Abb. 79** zeigt zwei A-Bilder, die am Betontestkörper mit 8 mm Größtkorn aufgenommen wurden. Die Messungen wurden in zwei Positionen auf der Aufpunktlinie im 50 mm Abstand durchgeführt. Das Rückwandecho nach $t = 400 \mu\text{s}$ ist in der **Abb. 79** rechts durch den geringen Signal-Rauschabstand kaum erkennbar. Für Zeiten $t < 100 \mu\text{s}$ werden Störanzeigen durch Oberflächenwellen registriert. Danach sind Störanzeigen vorhanden, die teilweise eine höhere Amplitude aufweisen als das Rückwandecho. Die Echoanzeigen bei $t = 440 \mu\text{s}$ stammen von der an der Testkörperseite reflektierten Welle. Die Herkunft der starken Störanzeigen, die in einigen Messpositionen auf der Aufpunktlinie eine Bestimmung der Rückwandreflexion erschweren, ist nicht geklärt. Ob es sich hierbei um einen hohen Luftporengehalt oder Verdichtungsmängel bei der Herstellung des Testkörpers handelt, könnte nur eine zerstörende Prüfung klären.

Dagegen zeigen die A-Bilder in **Abb. 80**, die auf der Aufpunktlinie des Betontestkörpers mit 16 mm Größtkorn aufgenommen wurden, ein wesentlich besseres Signal-Rauschverhältnis. Außer der Rückwandanzeige, die bei $t = 320 \mu\text{s}$ deutlich erkennbar ist, ist in beiden A-Bildern sogar das erste Mehrfachecho der Rückwand abgebildet.

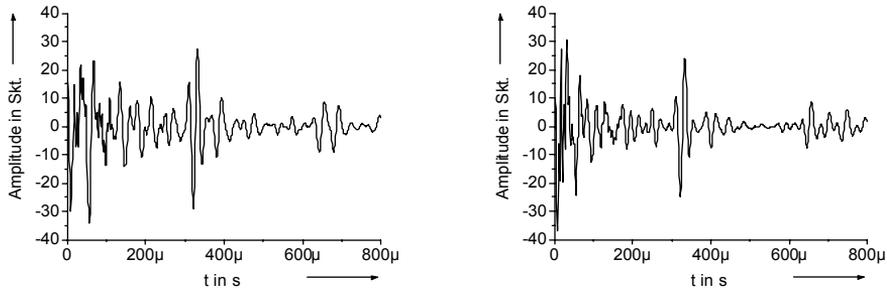


Abb. 80: A-Bilder von benachbarten Messpositionen (Betontestkörper mit 16 mm Größtkorn).

Der Vergleich der A-Bilder der beiden Messreihen erklärt, dass bei dem Betontestkörper mit 8 mm Größtkorn durch das örtlich stark schwankende Signal-Rauschverhältnis die natürliche Fokussierung weniger ausgeprägt ist und das fokussierte Schallbündel größere Amplitudenschwankungen aufweist als bei dem Testkörper mit 16 mm Größtkorn. Die Messungen sollten die Funktionstauglichkeit des Gruppenstrahlers an Testkörpern mit unterschiedlichen Sieblinien belegen. Die Ergebnisse des für die Ultraschallmessung vermeintlich „besseren“ Betontestkörpers mit dem geringeren Größtkorn zeigen, dass noch andere Werkstoff-Parameter (z. B. Luftporengehalt) Einfluss auf die Ultraschallausbreitung haben.

5.5 Amplitudenquerverteilung des Schallbündels

Abb. 81 zeigt schematisch die Anordnung des Prüfkopffarrays und des Messfeldes auf dem Betontestkörper für die Messung der Querverteilung der Schallschnelle. Das Messfeld der Größe 400 mm x 700 mm wurde mit dem Laservibrometer mit der Schrittweite von $\Delta x = \Delta y = 10$ mm abgetastet.

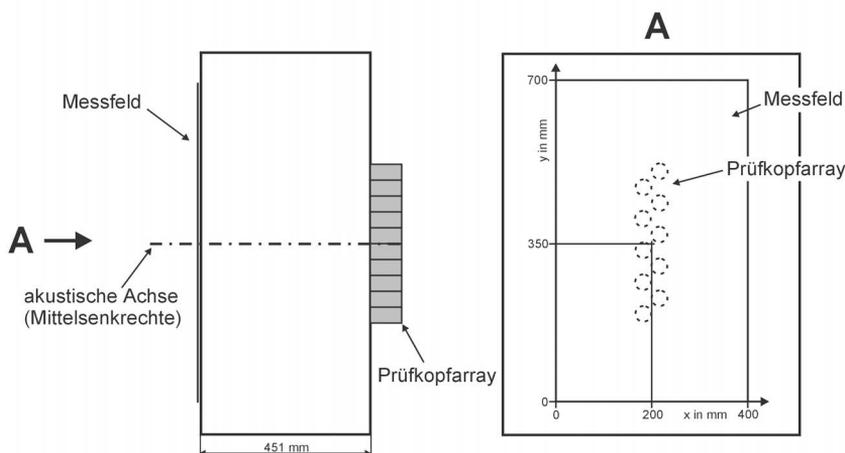


Abb. 81: Anordnung des Prüfkopffarrays und des Messfeldes auf dem Betontestkörper.

Bei den Messungen der Schallfeldprofile waren die Prüfköpfe versetzt im Array angeordnet. Durch diese Anordnung konnten die Prüfköpfe dichter zusammengeschoben werden, wodurch die Gitterkeulen entlang der Aufpunktlinie gedämpft wurden (s. Kapitel 4.5.2).

Die folgenden Messergebnisse zeigen die Amplitudenquerverteilungen des Schallbündels in einem Messfeld des Betontestkörpers mit einem Größtkorn von 16 mm im Abstand von 451 mm zum Array für unterschiedliche Fälle der Schallfeldbeeinflussung.

Abb. 82 links zeigt die Querverteilung des unfokussierten Gruppenstrahlers, dessen Schallbündel eine natürliche Fokussierung erkennen lässt. Im mittleren Bild ist das Schallbündel fokussiert. Das Bündel wird schmaler und die Amplitude auf der Strahlerachse wird größer. Im rechten Bild wurde das fokussierte Schallbündel geschwenkt und man erkennt deutlich das Maximum des Schallbündels unterhalb der Strahlerachse.

Außerdem sind im oberen Bereich des Messfeldes bei $y = 40$ cm leicht erhöhte Amplitudenwerte erkennbar, die auf Gitterkeulen hinweisen, die sich seitlich neben dem Gruppenstrahler ausgebildet haben (s. Pfeile in der Abbildung).

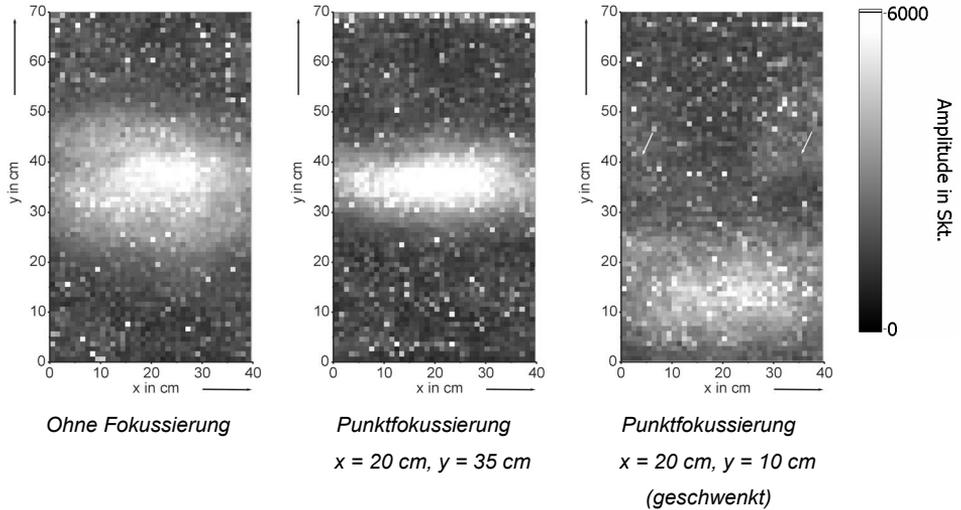


Abb. 82: Messung der Schnelleverteilung im Schallbündelquerschnitt.

6 Praktisches Beispiel einer Hüllrohrortung im Beton

Nachfolgend wird anhand einer Testmessung mit dem zeitlich gesteuerten Gruppenstrahler an einem Betontestkörper mit einem Größtkorn von 16 mm erläutert, wie die zur Schallfeldsteuerung notwendigen Verzögerungszeiten berechnet werden können. Die **Abb. 83** zeigt den 500 mm dicken Betontestkörper mit einem eingebauten Hüllrohr (luftgefüllt) und die Messpositionen des Gruppenstrahlers. Mit dem Gruppenstrahler soll im Impuls-Echo-Betrieb das Hüllrohr geortet werden. Für die Hüllrohrortung sollen die Verzögerungszeiten der Sendepulse so eingestellt werden, dass sich der akustische Fokus im Abstand von 300 mm vom Gruppenstrahlermittelpunkt ergibt.

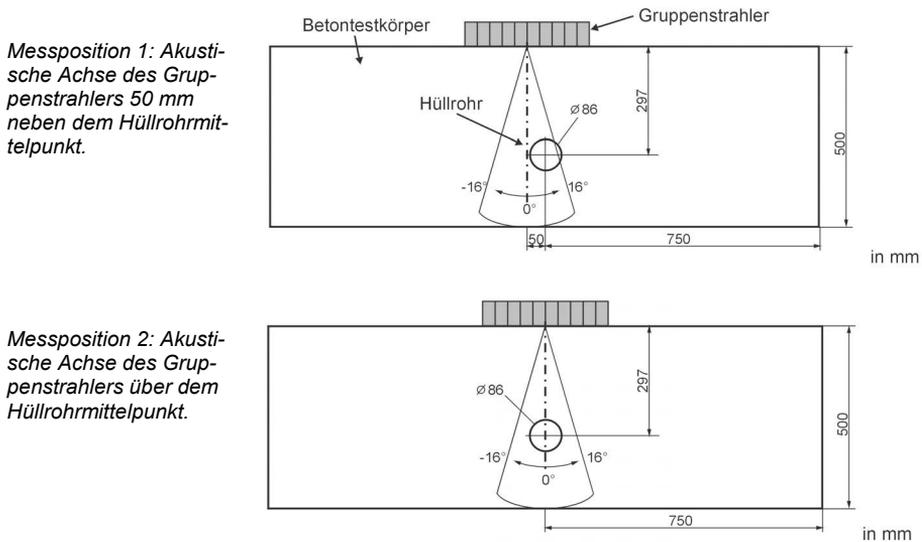


Abb. 83: Anordnungen des Gruppenstrahlers auf dem Betontestkörper.

Zuerst wird gezeigt, wie mit vereinfachten Betrachtungen die Verzögerungszeiten näherungsweise berechnet werden können. Danach werden zum Vergleich iterativ die optimalen Verzögerungszeiten mit der Punktquellensynthese bestimmt.

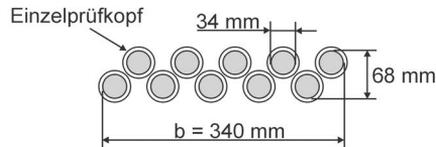


Abb. 84: Prüfkopfanzordnung im Array (schematisch).

Der Testkörper hat eine Schallgeschwindigkeit von $c_L = 4425$ m/s, woraus sich eine Wellenlänge von $\lambda = 44,25$ mm bei einer Prüffrequenz von $f = 100$ kHz ergibt. Mit Gl. 55 kann die Nahfeldlänge von rechteckförmigen Schwingern berechnet werden. Setzt man für den Gruppenstrahler ein Seitenverhältnis von $68/340 = 0,2$ an (siehe **Abb. 84**), kann in grober Näherung die Nahfeldlänge N zu

$$N \approx h \frac{b^2}{4 \lambda} = 0,99 \frac{(10 \cdot 34 \text{ mm})^2}{4 \cdot 44,25 \text{ mm}} \approx 646 \text{ mm}$$

bestimmt werden.

Für die gewünschte Fokustiefe von $f_{ak} = 300$ mm ergibt sich mit Gl. 52 der Fokussierungsgrad K

$$K = \frac{f_{ak}}{N} = \frac{300 \text{ mm}}{646 \text{ mm}} = 0,46.$$

Mit der Näherungsformel Gl. 53 kann der geometrische Fokus f_{geom} als Funktion des Fokussierungsfaktors K und der Nahfeldlänge N berechnet werden. Für die Nahfeldlänge $N = 646$ mm und den Fokussierungsgrad $K = 0,46$ ergibt sich der geometrische Fokus zu

$$f_{geom} = \frac{N}{(1-K)} (K - 0,82 K^2 + 0,43 K^3) = \frac{646 \text{ mm}}{1-0,46} (0,46 - 0,82 \cdot 0,46^2 + 0,43 \cdot 0,46^3)$$

$$f_{geom} = 393 \text{ mm}.$$

Dieser geometrische Fokus könnte durch einen geschliffenen Schwinger mit dem Krümmungsradius $r = 393$ mm erreicht werden. Im vorliegenden Fall wird der be-

rechnet den Krümmungsradius r in eine äquivalente Verzögerungszeitverteilung für die Triggerung der Ultraschallsender des Arrays umgerechnet. Die Verzögerungszeiten $t_v(n)$ für ein Lineararray mit n Elementen und der Elementbreite b berechnen sich zu [69]

$$t_v(n) = \frac{1}{c_L} \left(r - \sqrt{r^2 - (n-1)b^2(n_{\max} - 1) + ((n-1)b)^2} \right) \quad \text{Gl. 26}$$

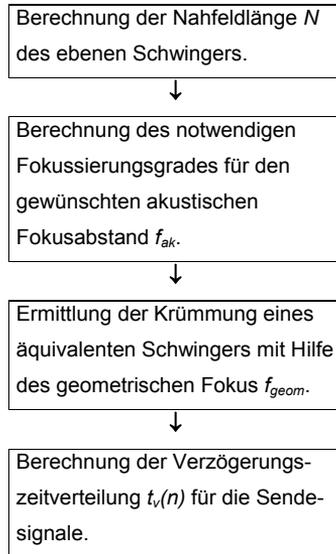
mit $n = 1, 2, \dots, n_{\max}$.

Für eine akustische Fokussierung in der gewünschten Tiefe von $f_{ak} = 300$ mm ergeben sich nach Gl. 26 die folgenden Verzögerungszeiten (s. **Tabelle 1**):

Tabelle 1: Berechnete Verzögerungszeiten (Näherungsrechnung).

Element n	Verzögerungszeit t_v in μs
1	0
2	2,7
3	4,8
4	6,2
5	6,9
6	6,9
7	6,2
8	4,8
9	2,7
10	0

Das folgende Schema soll den Ablauf zur Bestimmung des akustischen Fokus und der Berechnung der Verzögerungszeiten eines Lineararrays noch einmal verdeutlichen:



Bei dieser ursprünglich für Kreisschwinger abgeleiteten näherungsweise Berechnung der Verzögerungszeiten werden die rechteckige 2D-Anordnung, die Form der Einzelprüfköpfe und die elastischen Eigenschaften des Betons nicht berücksichtigt. Berechnet man den Schalldruckverlauf unter Zugrundelegung der Verzögerungszeiten aus **Tabelle 1** mit der Punktquellensynthese, erkennt man, dass sich der akustische Fokus nicht in 300 mm Tiefe, sondern in einer Tiefe von 275 mm ergibt (siehe **Abb. 85**).

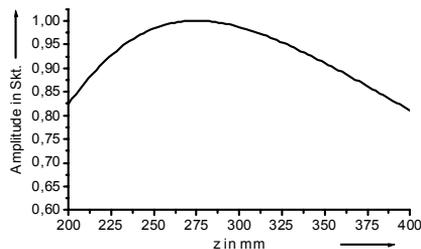


Abb. 85: Modellierung des Schalldruckverlaufes auf der akustischen Achse von 200 mm bis 400 mm für die mit den Näherungsformeln ermittelten Verzögerungszeiten. Das Maximum (akustischer Fokus) liegt in 275 mm Tiefe (gefordert $f_{ak} = 300$ mm).

In den nachfolgenden Modellierungen (s. **Abb. 86**) wird gezeigt, wie iterativ die Verzögerungszeiten für die gewünschte akustische Fokustiefe bestimmt werden.

Weil sich der akustische Fokus stets in kürzeren Abständen zum Gruppenstrahler befindet als der geometrische Fokus ($f_{ak} < f_{geom} < N$, s. Kapitel 9.5), werden die Verzögerungszeiten im ersten Schritt so gewählt, dass der geometrische Fokus f_{geom} zwischen dem geforderten akustischen Fokus f_{ak} und der Nahfeldlänge N liegt. Danach wird im Ergebnis der Modellierung der Abstand der maximalen Amplitude (akustischer Fokus f_{ak}) vom Gruppenstrahler bestimmt. Liegt der akustische Fokus noch nicht im gewünschten Abstand von 300 mm, wird iterativ der geometrische Fokussierungsabstand verändert. Die Modellierung zeigt, dass sich bei einer Punkt-fokussierung im Abstand von $f_{geom} = 410$ mm der akustische Fokus im gewünschten Abstand von $f_{ak} = 300$ mm ergibt.

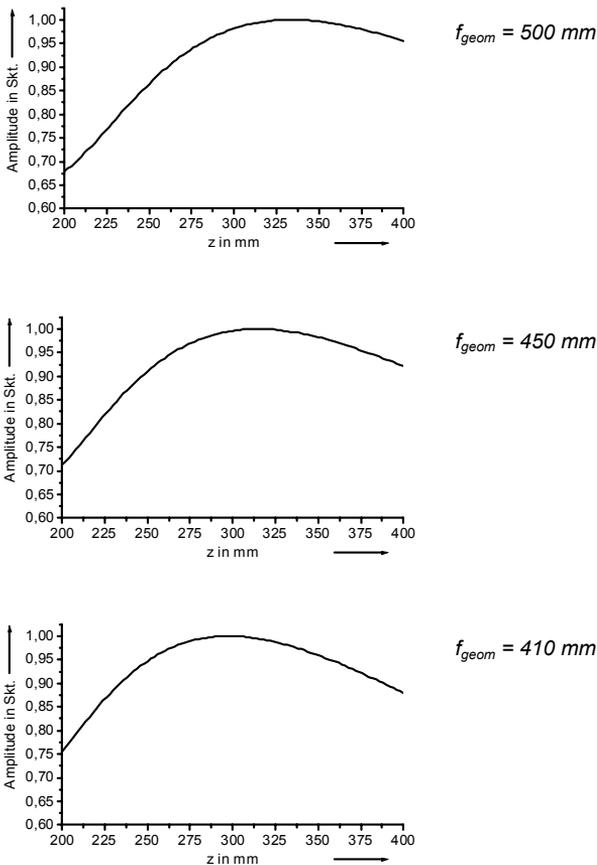


Abb. 86: Ermittlung der Verzögerungszeiten durch Variation der geometrischen Fokustiefe.

Aus dieser Modellierung erhält man dann die folgenden Verzögerungszeiten (s. **Tabelle 2**):

Tabelle 2: Verzögerungszeiten aus der Modellierung.

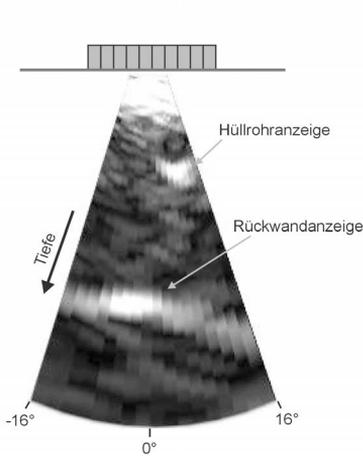
Element n	Verzögerungszeit t_v in μs
1	0
2	2,4
3	4,3
4	5,5
5	6,2
6	6,2
7	5,5
8	4,3
9	2,4
10	0

Die folgende **Abb. 87** zeigt für die beiden Arraypositionen die Sektorbilder des Winkelbereiches von -16° bis 16° der Messungen. Im Bereich bis $t = 80 \mu\text{s}$ befindet sich die tote Zone des Gruppenstrahlers. In diesem Bereich überdecken die Sendesignale mögliche Echos, was für die Ortung von oberflächennahen Fehlern nachteilig wäre. Bei Messposition 1 befindet sich die akustische Achse des Gruppenstrahlers 50 mm neben dem Hüllrohrmittelpunkt. Deutlich ist die Rückwandanzeige in 490 mm Tiefe erkennbar. Das Hüllrohr zeichnet sich im Winkelbereich von 2° bis 16° klar als erhöhte Amplitude in 270 mm Tiefe ab.

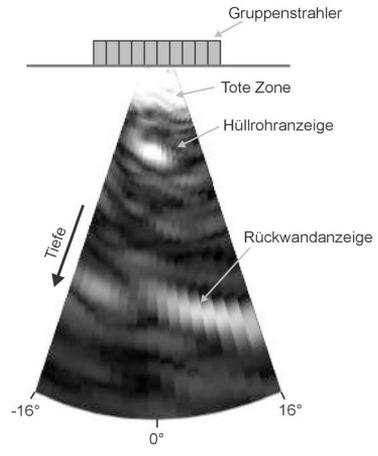
Bei der zweiten Messposition befindet sich der Gruppenstrahler direkt über dem Hüllrohr. Deutlich erkennt man die Hüllrohranzeige in 270 mm Tiefe und die Rückwandanzeige in 490 mm Tiefe, die durch das Hüllrohr teilweise abgeschattet wird.

Messposition 1:
Akustische Achse des Gruppenstrahlers 50 mm neben dem Hüllrohrmittelpunkt.

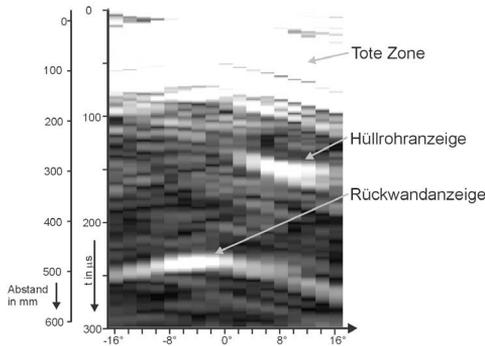
Messposition 2:
Akustische Achse des Gruppenstrahlers über dem Hüllrohrmittelpunkt.



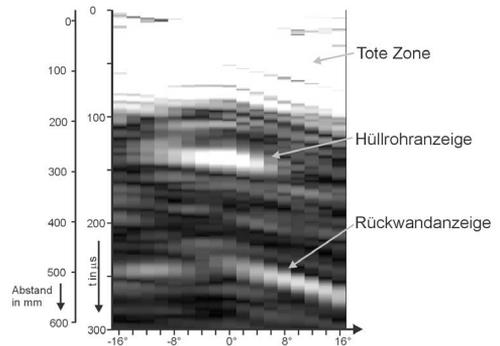
Sektorbild (schematisch)



Sektorbild (schematisch)



Rohdaten mit Tiefenskale



Rohdaten mit Tiefenskale

Abb. 87: Ergebnisse einer Hüllrohrortung im Beton mit dem zeitlich gesteuerten Gruppenstrahler nach der Impuls-Echo-Methode.

Es fällt auf, dass das Rückwandecho in Abb. 87 (rechts) einen unsymmetrischen Verlauf zeigt. Man erwartet eine symmetrische Krümmung der Rückwand. Stattdessen ist nur die rechte Hälfte deutlich erkennbar, der linke Teil der Rückwandechospur liegt bei deutlich kürzeren Laufzeiten. Die erkennbare Unsymmetrie entspricht in etwa der der toten Zone. Das deutet auf eine systematische Laufzeitverschiebung im Bereich der Ankopplungsfläche hin, z. B. bedingt durch unterschiedliche Feuchtheitsaufnahme der Betonoberfläche.

7 Diskussion der Ergebnisse

Die raue und bisweilen wellige Oberfläche des Betons lässt nur die Ankopplung von kleinen Prüfköpfen (i. d. R. kleiner 100 mm im Durchmesser) zu und führt damit zu extrem kleinen relativen, auf die Wellenlänge bezogenen Aperturen der strahlenden bzw. empfangenden Flächen. Um trotz der Ankoppelproblematik von Ultraschallprüfköpfen das günstigere Abstrahlverhalten großer Prüfkopfdurchmesser mit großen relativen Aperturen zu erhalten, kann man das Prinzip der synthetischen Apertur anwenden, bei dem ein Messbereich mit einem Prüfkopf abgetastet wird. Das Abtasten der Betonoberfläche kann auch automatisiert durchgeführt werden. Hierfür bieten sich Punktkontaktprüfköpfe an, die ohne Koppelmittel direkt auf die raue Bauteiloberfläche gedrückt werden können. Mit Hilfe von Luftultraschallprüfköpfen, die für die Prüfung von anderen Werkstoffen bereits erfolgreich eingesetzt werden, könnte eine automatisierte Messung zusätzlich beschleunigt werden. Ohne eigens für jeden Messpunkt angekoppelt werden zu müssen, könnte der Luftultraschallprüfkopf wie eine Radarantenne mit konstantem Abstand in einer schnellen Bewegung über die Betonoberfläche geführt werden. Vorbereitende Arbeiten zu einer solchen Anwendung sind zurzeit im Gange.

Bei einer anderen Entwicklungslinie des Verfahrens werden mehrere Prüfköpfe zu einer Strahlergruppe kombiniert und bereits vor der Messung simultan angekoppelt. Danach wird jeder Prüfkopf sequentiell über eine Multiplexerbaugruppe als Sender und als Empfänger betrieben. Durch sequentielle Anregung der einzelnen Arrayelemente kann das Schallbündel im Prüfkörper verschoben werden, wodurch das manuelle Abtasten mit einem Prüfkopf simuliert wird, mit der Option, die Messergebnisse beispielsweise als B-Bild darzustellen. Werden dabei benachbarte Arrayelemente parallel angeregt, kann die Schallfeldcharakteristik, insbesondere die Nahfeldlänge, an das vorliegende Prüfproblem angepasst werden. Dies entspricht einem manuellen Abtasten mit Prüfköpfen, die einen unterschiedlichen Durchmesser aufweisen. Die empfangenen Ultraschallsignale stehen, nachdem sie digitalisiert wurden, zur weiteren Verarbeitung, wie z. B. einer SAFT-Rekonstruktionsrechnung, zur Verfügung.

Auch die Ankopplung einer Strahlergruppe ist immer mit einem gewissen Zeitaufwand verbunden. Es erscheint sinnvoll, die gegebenen Möglichkeiten einer elektronischen Steuerung nicht nur auf SAFT zu beschränken, sondern sie soweit auszunutzen, dass der von einer Position aus erfasste Volumenbereich sowohl durch

Fokussierung auf unterschiedliche Tiefenbereiche als auch durch Bündelschwenk soweit wie möglich ausgedehnt wird.

Die Ergebnisse von Kapitel 5 weisen nach, dass die Schallfeldsteuerung auch im inhomogenen Werkstoff Beton möglich ist. Mit Hilfe der Gruppenstrahlertechnik kann durch Vorgabe unterschiedlicher Verzögerungsfunktionen für die Sendepulse das gesendete Schallbündel im Beton gesteuert werden. Eine lineare Verzögerung der Anregung der einzelnen Schwingerelemente ändert die Abstrahlrichtung. Durch eine überlagerte Krümmung der Verzögerungsfunktion der Prüfkopfanzregung kann das Schallbündel zusätzlich auf bestimmte Tiefenbereiche fokussiert werden. Diese Arbeitsweise des Gruppenstrahlers kann in vielen Fällen anstatt einer manuellen Abtastung mit einem Prüfkopf und nachträglicher SAFT-Rekonstruktionsrechnung angewendet werden. Die Verzögerungszeiten können im Ultraschall-Niederfrequenzbereich mit ausreichender Genauigkeit der notwendigen Diskretisierung mit kommerziell erhältlichen Timerbaugruppen realisiert werden. Für Beton, der von den Ankoppelbedingungen her keine hohen Prüfgeschwindigkeiten zulässt, ist ein zeitlich gesteuerter Gruppenstrahler mit digitaler Verzögerung und einem gemultiplexten Empfangskanal ein vernünftiges Konzept. Eine Aufwandsoptimierung führte zu der Entwicklung von Rechteck-Impuls-Sendestufen, die in den einzelnen Sendeendstufen für die Einzelprüfköpfe der Strahlergruppe eingesetzt werden. Die Impulsform hat sich für Anwendungen an Betonbauteilen als geeignet erwiesen und wird zunehmend auch für andere Ultraschall-Messverfahren mit Erfolg eingesetzt.

Der Gruppenstrahler-Prüfkopf kann, wie die Ergebnisse belegen, auch aus einzelnen Standard-Niederfrequenz-Prüfköpfen bestehen. Bei der Konstruktion des Gruppenstrahler-Prüfkopfes ist es wichtig, bereits im frühen Stadium die Schallfeldmodellierung mit einzubeziehen.

Bei vielen Prüfaufgaben, die bisher nur mit langwierigen manuellen Messungen oder mit sehr aufwendigen automatisierten Prüfsystemen bearbeitet werden, kann die Gruppenstrahlertechnik Vorteile bringen. Da der Sendebetrieb einer Strahlergruppe mit ihren Sendeendstufen zudem die reale Erzeugung der Schallfelder gestattet, kann man deren Ausbildung im Beton überprüfen, was bei der Vorbereitung von Prüfungen an Betonbauteilen und bei der Einschätzung von deren Zuverlässigkeit immer mehr an Bedeutung gewinnt.

8 Zusammenfassung

Der für die Ultraschallprüfung an Beton anwendbare Frequenzbereich liegt aufgrund von Streuungen an den Gesteinskörnern in der Regel zwischen 50 kHz und 200 kHz. Die niedrigen Prüffrequenzen führen zu einem für die Ultraschallprüfung ungünstigen Verhältnis des Prüfkopfdurchmessers zur Wellenlänge, was zu einem fast ungerichteten Abstrahlungsverhalten für Longitudinalwellen führt. Außerdem kommt es zusätzlich zu einer erheblichen Abstrahlung von Transversalwellen und Oberflächenwellen, die eine Ultraschallprüfung stören.

Im Rahmen der Arbeit werden Konzepte für den Einsatz der Ultraschallprüfung mit Strahlergruppen an Betonbauteilen vorgestellt und der Einfluss der Betoneigenschaften auf die Ultraschallausbreitung bei der Anwendung dieser Technik untersucht.

Um das Abstrahlungsverhalten zu verbessern, kann man mehrere Prüfköpfe zu Strahlergruppen zusammenschalten oder mit geringerem Aufwand an Gerätetechnik und Prüfköpfen nach dem Prinzip der sog. synthetischen Apertur entsprechende Strahlergruppen durch sequentielle Abtastung einer „Apertur“-Fläche mit einem Prüfkopf nachbilden. Wird das Prüfobjekt durch einen Prüfkopf mit einem großen Divergenzwinkel abgetastet, kann durch nachträgliche Rekonstruktionsrechnung nach dem SAFT-Verfahren (Synthetische Apertur-Fokussierungstechnik) die Aussagegesicherheit der Messergebnisse verbessert werden, indem rechnerisch auf bestimmte Bereiche im Betonbauteil fokussiert wird. Die Ankopplung von Prüfköpfen auf Betonoberflächen ist sehr zeitaufwendig. Daher lohnt es sich, um die Prüfleistung pro Ankopplung zu erhöhen, die Messdatenverarbeitung nicht nur auf die Anwendung von SAFT zu beschränken.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird für die gleiche Aufgabe erstmals ein lauffzeitgesteuerter Gruppenstrahler für den Niederfrequenzbereich, bestehend aus zehn einzelnen Prüfköpfen, entwickelt, mit dem schon während der Messung das Schallfeld verändert werden kann. Die Entwicklung orientiert sich an Gesichtspunkten, wie einfache Handhabbarkeit und Aufwandsoptimierung, so dass für die nachfolgenden Experimente ein Gerät zur Verfügung steht, wie es am ehesten auch in der Praxis Verwendung finden könnte.

Die durch eine mit Sendeendstufen ausgerüsteten Strahlergruppe gegebene Möglichkeit der Erzeugung realer Schallfelder gestattet es, die Ausbildung dieser Schall-

felder und deren Steuerbarkeit unter den Bedingungen des inhomogenen Werkstoffes Beton, auch experimentell zu überprüfen.

Um den Einfluss der Schwingerform und -größe der Prüfköpfe auf das Schallfeld theoretisch zu untersuchen, wird ein Rechenprogramm auf Grundlage der Punktquellensynthese entwickelt, das bei der Berechnung die Annahme beliebiger Schwingergeometrien und -anordnungen zulässt. Die Grundlage bilden bewährte Modelle aus der Gruppenstrahlertechnik für metallische Werkstoffe.

In Zusammenarbeit mit der Universität Kassel wird mit Hilfe von Simulationsrechnungen mit der Elastodynamischen Finiten Integrationstechnik (EFIT) der Einfluss von Luftporen und der Gesteinskörnung auf die Ultraschallausbreitung des Gruppenstrahlers im Beton untersucht.

Zur experimentellen Überprüfung des Gruppenstrahler-Prüfkopfes werden zunächst sowohl Schallfeldprofile als auch Schallschnelleverteilungen im Schallbündelquerschnitt mit und ohne Fokussierung des Schallbündels gemessen. Die Messungen erfolgen an Betontestkörpern (8 mm und 16 mm Größtkorn) mit einem scannenden Laservibrometer in Durchschallung. Das dazu verwendete Laservibrometer arbeitet nach dem Prinzip der Frequenzverschiebung durch den Dopplereffekt und bestimmt aus dem am Messpunkt rückgestreuten Laserlicht punktweise die Schallschnelle der schwingenden Betonoberfläche. Durch einen vorgeschalteten Spiegelscanner kann eine vorgegebene Messfläche automatisch abgetastet werden.

Eine besonders anschauliche Methode, die Funktionsweise des Gruppenstrahlers zu demonstrieren, ist die Visualisierung der Wellenausbreitung durch Abtastung des Schallfeldes an einer Schnittfläche des Schallbündels, die möglichst parallel und nahe zur Bündelachse liegt. Dies kann die Seitenfläche eines Testblockes sein, auf die das Schallbündel fast streifend auftrifft. Mit Hilfe eines an diese Messtechnik angepassten Auswerteverfahrens können die Vorgänge der Schallwellenausbreitung als Momentaufnahmen dargestellt werden.

Die Untersuchungen ergeben, dass die Gruppenstrahlertechnik auch für Ultraschalluntersuchungen an Betonbauteilen anwendbar ist. Bei dem Einsatz von mehreren einzelnen Prüfköpfen als Gruppenstrahler-Prüfkopf können durch geeignete Positionierung der Prüfköpfe zueinander störende Gitterkeulen minimiert werden.

9 Anhang

Nachfolgend werden die zum Verständnis der Arbeit wichtigsten Grundlagen der Ultraschalltechnik kurz zusammengefasst. Dabei wird speziell auf die Besonderheiten, die sich durch die vergleichsweise niedrigen Prüffrequenzen unter 200 kHz ergeben, hingewiesen.

Es wird außerdem eine Übersicht der Ableitungen der Wellengleichungen gegeben, weil die skalare Wellengleichung Ausgangspunkt für die Modellierung auf Grundlage der Punktquellensynthese ist, die in Kapitel 4.5.2 näher beschrieben wird [70], [28].

9.1 Wellenarten

Ultraschall ist Schall mit Frequenzen über 20 kHz. In der zerstörungsfreien Prüfung kommt hauptsächlich der Frequenzbereich von 50 kHz bis 100 MHz zur Anwendung. Die Ausbreitung einer Schallwelle wird durch eine elastische Kopplung von Masselementen ermöglicht. Ein einfaches Modell eines elastischen Körpers besteht aus einem Feder-Masse-System, in dem sich eine elastische Welle zwischen den einzelnen Masselementen durch die Kopplung über die Federkräfte ausbreiten kann (s. **Abb. 88**).

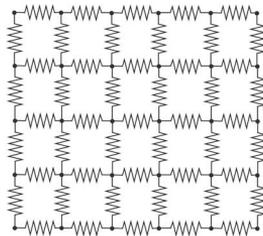


Abb. 88: Qualitative Darstellung eines elastischen Mediums als Masse-Feder-System, einfaches 2D-Modell nach [23].

Aus der Bewegungsgleichung für ein Masseelement und dem Hookeschen Gesetz, erhält man für isotrope elastische Medien eine lineare partielle Differentialgleichung für die Verschiebung [54]

$$\rho \frac{\partial^2 \vec{\xi}}{\partial t^2} = (\lambda + 2\mu) \text{grad div } \vec{\xi} - \mu \text{rot rot } \vec{\xi} . \quad \text{Gl. 27}$$

Die Zerlegung in einen divergenzfreien und in einen rotationsfreien Anteil führt unter Einführung von Potenzialen zu zwei unabhängigen Wellengleichungen, aus denen die Verschiebungen abgeleitet werden können [70]

$$c_L^2 \Delta \phi = \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} \quad \text{Gl. 28}$$

$$c_T^2 \Delta \vec{A} = \frac{\partial^2 \vec{A}}{\partial t^2} . \quad \text{Gl. 29}$$

Die skalare Wellengleichung Gl. 28 für den rotationsfreien Anteil (d. h. für schubspannungsfreie Medien) ist oft der Ausgangspunkt für Modellierungen von Schallfeldern mit Hilfe der Punktquellensynthese. Wichtige Spezialfälle für die Schallfeldberechnung sind harmonische ebene Wellen und Kugelwellen. Beide Wellentypen sind Lösungen der Wellengleichung und eignen sich besonders für die Untersuchung von speziellen Fragestellungen in der Ultraschallprüfung. So ist z. B. die Untersuchung von Grenzflächeneinflüssen auf Schallwellen mit ebenen Wellen üblich, dagegen werden Schallfeldstrukturen bevorzugt mit Hilfe von Kugelwellen berechnet [70].

Flüssigkeiten und Gase bezeichnet man als schubspannungsfreie Medien, weil sie i. d. R. keine Schubkräfte übertragen können, d. h. bei der Wellenausbreitung können nur Longitudinalwellen auftreten. Im Unterschied dazu können Festkörper auch Schubkräfte übertragen, weshalb man von nichtschubspannungsfreien Medien spricht. Das hat zur Folge, dass im Volumen eines elastisch isotropen Festkörpers bei durch Grenzflächen nicht gestörter Ausbreitung zwei Wellen auftreten: die Longitudinalwellen und die Transversalwellen. In der **Tabelle 3** sind einige Stoffe mit den zugehörigen Schallgeschwindigkeiten zusammengestellt (Quelle: [9]).

Tabelle 3: Schallgeschwindigkeiten.

Medium	Longitudinalwellen- geschwindigkeit in m/s	Transversalwellen- geschwindigkeit in m/s
Luft (trocken, 20 °C)	344	-
Wasser (destilliert, 25 °)	1497	-
Werkzeugstahl (1 % C, gehärtet)	5854	3150
Beton	3000 bis 4830	2000 bis 2400

Für das Verhältnis der beiden Geschwindigkeiten, das sich auch mit Hilfe der Poissonschen Konstanten σ ausdrücken lässt, gilt [23], [54]

$$\left(\frac{c_T}{c_L}\right)^2 = \frac{\mu}{\lambda + 2\mu} = \frac{1 - 2\sigma}{2 - 2\sigma}. \quad \text{Gl. 30}$$

Die Beziehung zwischen Frequenz f , Wellenlänge λ und Schallgeschwindigkeit c lautet

$$c = f \lambda. \quad \text{Gl. 31}$$

Für eine in Stahl typische Messfrequenz von 2 MHz erhält man eine Longitudinalwellenlänge von ca. 3 mm. Für Prüfungen von Betonbauteilen werden häufig Frequenzen bei 100 kHz benutzt, denen eine Longitudinalwellenlänge von 40 mm (für $c_L = 4000$ m/s) entsprechen.

Wichtige Schallfeldgrößen sind der Schalldruck p , die Schallschnelle v und die Masselementauslenkung oder Teilchenauslenkung (Elongation) ξ .

Das Verhältnis

$$Z = \frac{p}{v} \quad \text{Gl. 32}$$

wird definitionsgemäß als Wellenwiderstand Z oder akustische Impedanz bezeichnet und ist eine für die Nachweisbarkeit von Fehlern wichtige Materialkenngröße (Dichte ρ , Schallgeschwindigkeit c)

$$Z = \rho c . \quad \text{Gl. 33}$$

Für die harmonische Anregung ergibt sich unter Berücksichtigung von

$$v(t) = \frac{d\xi}{dt} \quad \text{Gl. 34}$$

eine Beziehung zwischen dem Schalldruck und der Auslenkung der Masselemente

$$\begin{aligned} p &= Z \omega \xi & \text{Gl. 35} \\ \text{mit } \omega &= 2\pi f . \end{aligned}$$

9.2 Ebene Wellen an Grenzflächen

Eine wichtige Voraussetzung für die Ultraschallprüfung ist der Einfluss von Grenzflächen auf die Ultraschallausbreitung. Erst durch die Störung der Wellenausbreitung an Übergängen von Stoffen mit unterschiedlichen Schallwiderständen kommt es zu Reflexionen von Schallenergie und damit zu Echoanzeigen am Ultraschallprüfgerät. Die folgenden Formeln für die Reflexions- und Durchlässigkeitsfaktoren beziehen sich auf die Schalldrücke und gelten für den senkrechten Einfall von ebenen Wellen auf eine Grenzfläche. Unter Beachtung der Stetigkeitsbedingungen für die Spannungen und die Schallschnellen an den Grenzflächen ergeben sich für den Reflexionsfaktor R [23]

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad \text{Gl. 36}$$

und für den Durchlässigkeitsfaktor D

$$D = \frac{2 Z_2}{Z_2 + Z_1} . \quad \text{Gl. 37}$$

Im Wesentlichen lassen sich zwei Fälle unterscheiden, je nachdem ob der Schallwiderstand des ersten Mediums kleiner oder größer ist als der Schallwiderstand des zweiten Mediums:

$Z_2 < Z_1$: Reflexion am schallweicherem Medium (Reflexion mit Phasensprung).
Für $Z_2 \ll Z_1$ kommt es zur Totalreflexion. Ein typisches Beispiel aus dem Bauwesen dafür ist die Reflexion an einer freien Bauteilrückwand mit den Wellenwiderständen $Z_{\text{Beton}} \gg Z_{\text{Luft}}$.

$Z_2 > Z_1$: Reflexion am schallhärteren Medium (Reflexion ohne Phasensprung).
Für $Z_2 \gg Z_1$ kommt es zur Totalreflexion. Dieser Fall tritt bei der Prüfkopfkopplung durch Wasser auf.

Wie oben beschrieben, kommt es zur Totalreflexion von Ultraschallwellen in einem Medium mit freier Grenzfläche. Entsteht bei der Ankopplung eines Prüfkopfes an einem Werkstück ein Luftspalt, ist der Übergang, wegen der großen Unterschiede der Wellenwiderstände, praktisch schallundurchlässig. Deshalb wird zwischen Prüfkopf und Werkstück in der Regel ein Koppelmittel eingesetzt, das den Spalt ausfüllt. Besonders kritisch ist die Ankopplung von großen Prüfköpfen auf nichtschalungsglatte Betonoberflächen, weshalb man normalerweise Prüfköpfe mit Durchmessern unter 60 mm einsetzt.

Bei einem schrägen Einfall einer ebenen Wellenfront auf eine Grenzschicht kann auch die jeweils andere Wellenart bei der Reflexion und bei der Brechung entstehen. Die Reflexions- und Durchlässigkeitsfaktoren sind vom Winkel der einfallenden Welle abhängig [54].

9.3 Ultraschall-Niederfrequenz-Prüfköpfe

Nachfolgend wird auf den Aufbau und das elektrische Ersatzschaltbild eines Ultraschallwandlers eingegangen, weil die Kenntnis des Einflusses der äußeren Beschaltung des Prüfkopfes auf die Prüfkopfeigenschaften für die Entwicklung geeigneter Sendestufen von Bedeutung ist (siehe Kapitel 4.4). Die Betrachtungen gelten für stationäre Vorgänge [41].

Zur Erzeugung und zum Empfang von Ultraschallwellen in der zerstörungsfreien Prüfung werden zurzeit hauptsächlich Prüfköpfe verwendet, deren Wirkungsweise auf dem piezoelektrischen Effekt beruhen. Beim direkten piezoelektrischen Effekt führt eine Kräfteinwirkung zu einer Verformung des Wandlermaterials und damit zu

elektrischen Ladungen auf den Oberflächen. Dieser Effekt ist umkehrbar. Wird der Wandler einem elektrischen Feld ausgesetzt, führt dies zu einer Deformation seiner Form (reziproker piezoelektrischer Effekt).

Die eingesetzten Niederfrequenz-Prüfköpfe enthalten als piezoelektrischen Stoff Bleimetaniobat (PbNb_2O_6). Der Wandler wird durch Pressen und Brennen eines Pulvers aus dem Werkstoff in die gewünschte Form gebracht. Durch Anlegen eines starken elektrischen Feldes wird die Keramik polarisiert und damit die piezoelektrische Eigenschaft aufgeprägt. Der Aufbau eines Standard-Normalprüfkopfes ist schematisch in **Abb. 89** abgebildet [27].

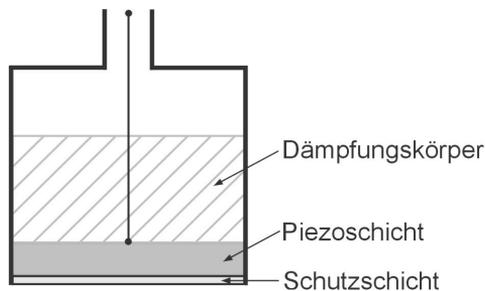


Abb. 89: Aufbau eines Standard-Ultraschallprüfkopfes (schematisch nach [27]).

Zur Charakterisierung von Prüfköpfen wird außer der Eigenfrequenz f_0 (Mittenfrequenz) auch die relative Bandbreite B_{rel} angegeben

$$f_0 = \sqrt{f_{ug} f_{og}} \quad \text{Gl. 38}$$

$$B_{rel} = \frac{f_{og} - f_{ug}}{f_0} \cdot 100 \% . \quad \text{Gl. 39}$$

Dabei werden die oberen und unteren Grenzfrequenzen im Frequenzspektrum des Empfangsechos bestimmt (6 dB Amplitudenabnahme).

Ein Piezowandler stellt ein mechanisches Schwingungsgebilde dar, bestehend aus einer Masse, einer Feder und einem Reibungswiderstand, das in einer elektrischen Analogie als elektrischer Schwingkreis nachgebildet werden kann. Mit Hilfe der Analogiebetrachtungen findet man die häufig verwendete einfachste elektrische

Ersatzschaltung, die aus der Halterungskapazität C_H und einem parallelgeschalteten Serienschwingkreis (L_m , C_m , R_S) besteht (s. **Abb. 90**) [23], [42], [70].

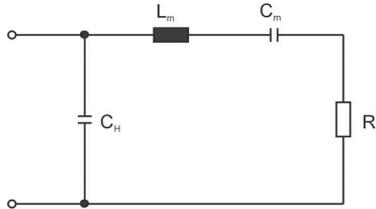


Abb. 90: Ersatzschaltung eines Ultraschallwandlers.

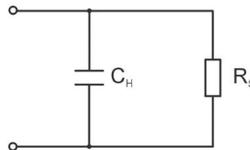


Abb. 91: Ersatzschaltung eines Ultraschallwandlers für Grundresonanz.

Um die Belastung eines Ultraschallsenders bei Betrieb eines Piezowandlers in Grundresonanz zu untersuchen, kann das Ersatzschaltbild vereinfacht werden. Das Ersatzschaltbild besteht dann aus einer Halterungskapazität mit einem parallelgeschalteten ohmschen Widerstand (s. **Abb. 91**). Der Serienwiderstand R_S in der Ersatzschaltung beinhaltet die gesamten dämpfenden Einflüsse durch Verluste und Schallabstrahlung in das umgebende Medium [5], [59].

Oft wird die Schaltung durch eine parallelgeschaltete Induktivität L_{Komp} erweitert

$$L_{Komp} = \frac{1}{\omega_0^2 C_H} \cdot \quad \text{Gl. 40}$$

Die Induktivität wird i. d. R. so gewählt, dass sich bei der mechanischen Grundresonanz die Blindströme kompensieren [70]. Bei der Berechnung der Induktivität ist zusätzlich zur Halterungskapazität der Piezoplatte die Schaltungs- und Kabelkapazität zu berücksichtigen. Die Abstimmung durch eine Kompensationsinduktivität führt

zu einer Unterdrückung von Störfrequenzen, die bei einer Stoßanregung eines Piezowandlers durch Querschwingungen und Oberwellen entstehen [23].

Ist das Verhältnis des Ausgangswiderstandes des Ultraschallsenders bzw. Wellenwiderstandes R_i zum Serienwiderstand R_s der Piezoplatte ungünstig (z. B. $\gg 1$), besteht die Möglichkeit für den Bereich der Resonanzfrequenz z. B. mit einem Übertrager die Widerstände anzupassen. Der Widerstand R_s wird quadratisch mit dem Übersetzungsverhältnis \dot{u} auf die Sendeseite mit der größeren Windungszahl hinauftransformiert [23], [65], [41], [27]

$$\dot{u} = \sqrt{\frac{R_s}{R_i}} . \quad \text{Gl. 41}$$

Oft wird zur Anpassung der Prüfköpfe ein Spartransformator bereits in das Gehäuse eingebaut, der zugleich die Kompensationsinduktivität darstellt [70].

Bei Sendeendstufen mit niederohmigem Ausgang verzichtet man im Allgemeinen auf einen Übertrager und arbeitet im Bereich der Spannungseinprägung. Bei hohen Frequenzen bzw. kurzen Signalanstiegszeiten oder langen Prüfkabeln ist das Kabel reflexionsfrei abzuschließen. In der Ultraschall-Niederfrequenz-Technik ist dies normalerweise nicht nötig, da die minimale Signalwellenlänge wesentlich größer als die üblichen Prüfkabellängen ist.

Der Aufbau einer geeigneten Sendestufe für die verwendeten Niederfrequenz-Ultraschallprüfköpfe wird ausführlich in Kapitel 4.4 erläutert.

Nachfolgend wird anhand eines Beispiels der Einfluss einer zusätzlichen elektrischen Beschaltung eines Ultraschallwandlers auf die Schwingungseigenschaften gezeigt.

Um in der Nachrichtentechnik Frequenzbänder zu übertragen, muss der Gütefaktor von Schwingkreisen oft durch Bedämpfen mit Wirkwiderständen künstlich verkleinert werden [41]. Analog kann durch zusätzliche Beschaltung eines schmalbandigen Ultraschallwandlers die Bandbreite vergrößert werden, um auch kurze Ultraschallimpulse übertragen zu können. Für die Ersatzschaltung des Wandlers ergibt sich der komplexe Gesamtleitwert zu [5], [59]

$$\underline{Y}_g = \frac{1}{\underline{Z}_g} = \frac{C_m^2 \omega^2 R_s}{(C_m \omega R_s)^2 + (L_m C_m \omega^2 - 1)^2} + j \left(C_H \omega - \frac{\omega C_m (L_m C_m \omega^2 - 1)}{(C_m \omega R_s)^2 + (L_m C_m \omega^2 - 1)^2} \right). \quad \text{Gl. 42}$$

Die drei Blindwiderstände führen zu den Kennkreisfrequenzen der Serien- und Parallelresonanz

$$\omega_s = \frac{1}{\sqrt{L_m C_m}} \quad \text{Gl. 43}$$

$$\omega_p = \sqrt{\frac{C_H + C_m}{C_H C_m L_m}}. \quad \text{Gl. 44}$$

Die **Abb. 92** zeigt den Impedanzverlauf und Phasengang und **Abb. 93** die Ortskurve des komplexen Leitwertes eines Beispiels einer Ersatzschaltung mit $C_H = 1,28 \text{ nF}$, $L_m = 1,24 \text{ mH}$, $C_m = 0,51 \text{ nF}$ und $R_s = 100 \text{ } \Omega$ (s. auch [5], [59]).

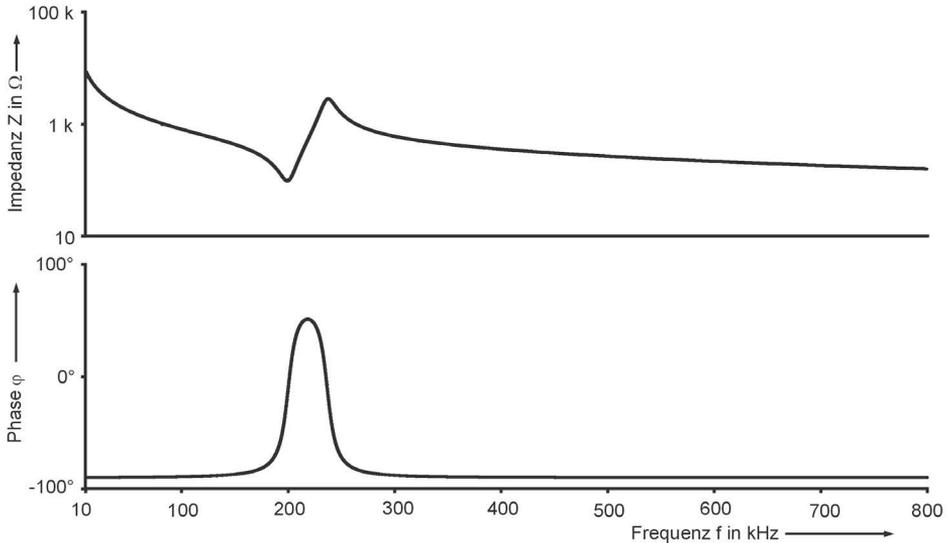


Abb. 92: Impedanz- und Phasengang (Berechnung, $C_H = 1,28 \text{ nF}$, $L_m = 1,24 \text{ mH}$, $C_m = 0,51 \text{ nF}$ und $R_s = 100 \text{ } \Omega$).

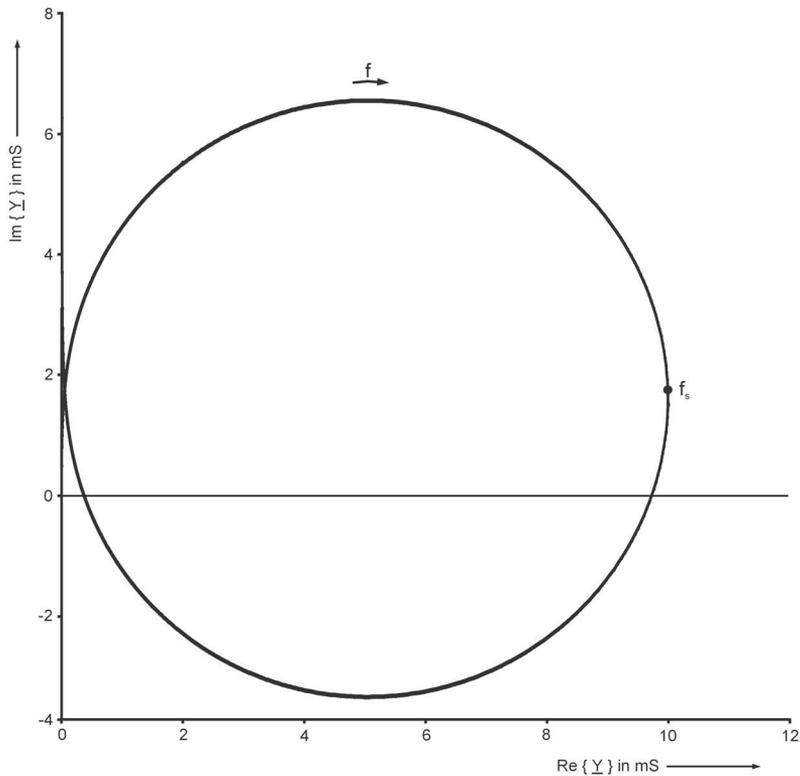


Abb. 93: Ortskurve des komplexen Leitwertes (Berechnung, $C_H = 1,28 \text{ nF}$, $L_m = 1,24 \text{ mH}$, $C_m = 0,51 \text{ nF}$ und $R_s = 100 \Omega$).

Die Simulationen der Stoßantworten ohne und mit äußerer Beschaltung sind in **Abb. 94** dargestellt. Abgebildet ist der Strom $i_{RS}(t)$ durch den Strahlungswiderstand, der dem Schalldruck $p(t)$ proportional ist.

Durch einen zusätzlichen Widerstand R_v kann die Bandbreite des Wandlers beeinflusst werden. Für

$$R_v = \frac{1}{2\pi f_s C_H} \quad \text{Gl. 45}$$

ist die Bandbreite maximal [5], [59].

Eine Vergrößerung der Bandbreite kann auch durch Abstimmung mit einer zusätzlichen Induktivität und einem Dämpfungswiderstand erreicht werden. Für die Serienabstimmung gilt nach [5]

$$R_{SA} = \frac{\sqrt{2 \frac{C_m}{C_H} - (\omega_s C_m R_s)^2}}{\omega_p C_H} \quad \text{Gl. 46}$$

$$L_{SA} = \frac{1}{\omega_p^2 C_H} \quad \text{Gl. 47}$$

In beiden Fällen zeigt der zeitliche Verlauf des Stromes durch den Strahlungswiderstand ein verbessertes Impulsverhalten, allerdings wird die Mittenfrequenz beeinflusst und die Empfindlichkeit nimmt deutlich ab.

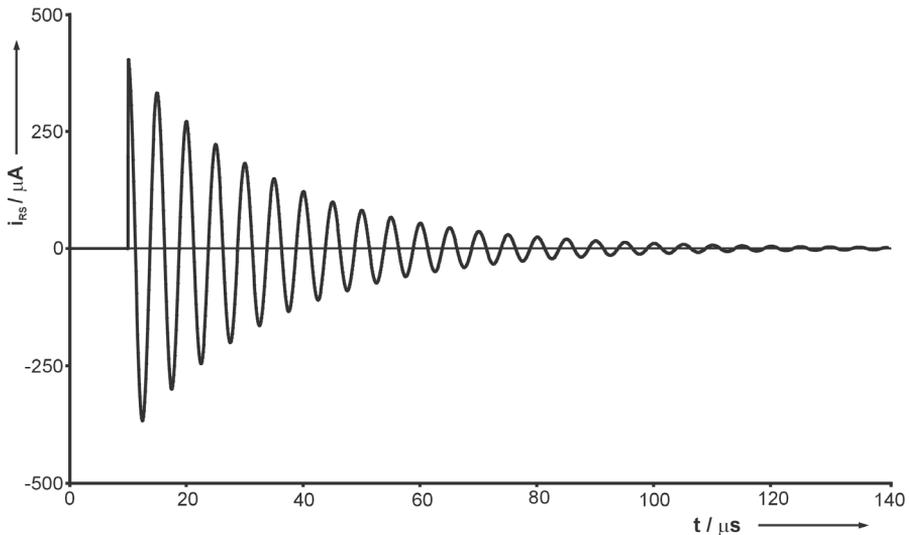


Abb. 94a: Ohne äußere Beschaltung, Spannungssteuerung.

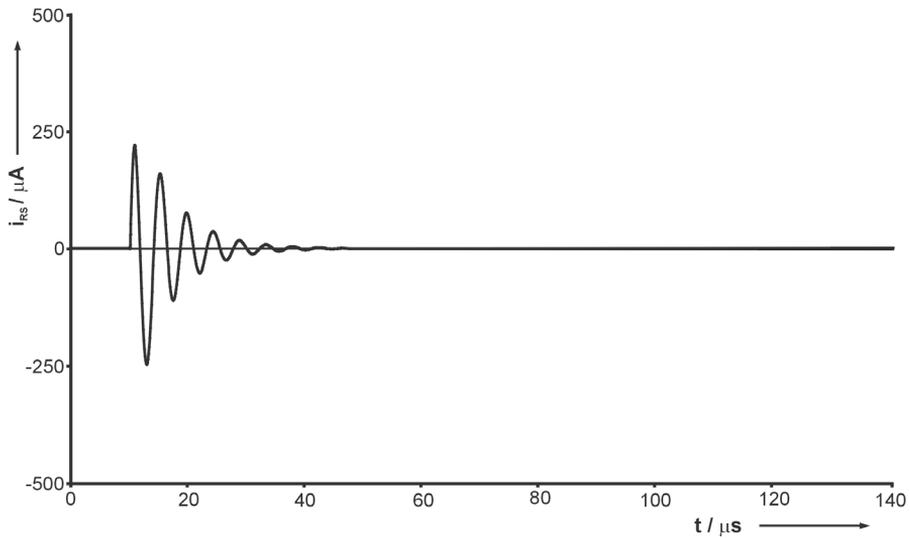


Abb. 94b: Beschaltung mit Vorwiderstand R_v .

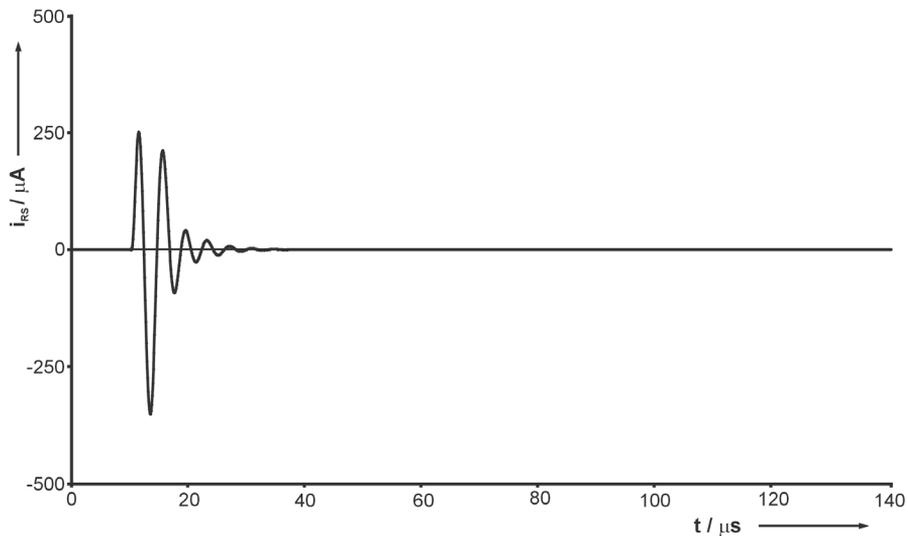


Abb. 94c: Serienabstimmung mit R_{SA} und L_{SA}

Abb. 94: Zeitlicher Verlauf des Stromes durch den Strahlungswiderstand ohne und mit äußerer Beschaltung (Simulation, $C_H = 1,28 \text{ nF}$, $L_m = 1,24 \text{ mH}$, $C_m = 0,51 \text{ nF}$ und $R_s = 100 \Omega$, Anregung durch Diracstoß).

Die eingesetzten NF-Prüfköpfe sind breitbandig und haben ein gutes Impulsverhalten, so dass auf eine äußere Beschaltung verzichtet werden kann. Die **Abb. 95** zeigt den Impedanz- und Phasengang eines Prüfkopfes Typ G0,2GC nach Herstellerangaben.

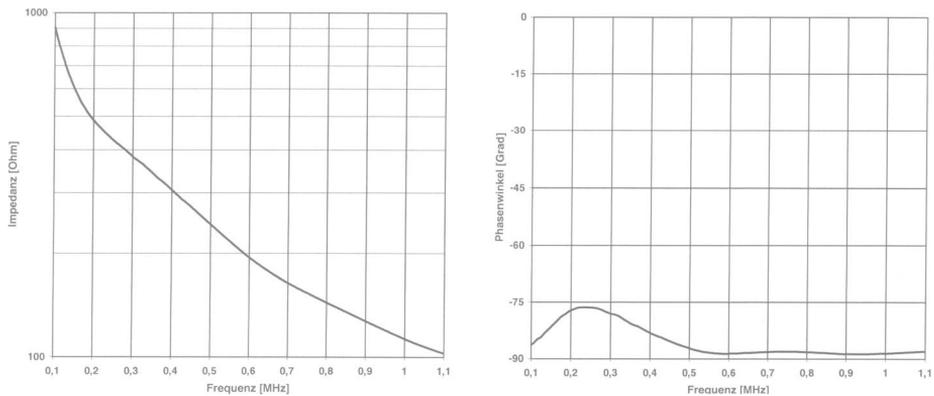


Abb. 95: Messung von Impedanz- und Phasengang eines Prüfkopfes Typ G0,2GC (Quelle: Fa. Krautkrämer).

Weitere Hinweise zur Optimierung der Schwingungseigenschaften durch äußere Beschaltung von Ultraschallprüfköpfen findet man in [5], [59].

Das Schwingungsverhalten von Prüfköpfen kann auch mit einem Vierpolmodell untersucht werden. Mit dem Vierpolmodell, das im Vergleich zur oben beschriebenen Simulation mit konzentrierten Bauelementen wesentlich aufwendiger ist, kann eine bessere Wiedergabe des Schwingungsverhaltens eines Ultraschallprüfkopfes erreicht werden. Im sog. KLM-Modell für piezoelektrische Dickenschwinger können z. B. Transformationsschichten und Klebeschichten mit den zugehörigen Reflexionseigenschaften durch Vierpolketten berücksichtigt werden. Näheres zum KLM-Modell findet man in [70].

9.4 Schallfelder von Prüfköpfen

Das Schallfeld des verwendeten Prüfkopfes hat direkten Einfluss auf die Fehlerdetektion. Nachfolgend werden die Grundbegriffe erläutert, da die besonderen Rand-

bedingungen im Bauwesen zu Konsequenzen hinsichtlich der Prüffrequenz und der Prüfkopfgröße führen, die sich unmittelbar auf die Schallfelder auswirken.

Ausgangspunkt der Betrachtung ist das Schallfeld einer idealen Kolbenmembran, die auf der ganzen Fläche mit der Schallschnelle v_0 angeregt wird. Im sog. Nahfeld können die von der Membran ausgehenden harmonischen Elementarwellen interferieren und es ergibt sich für die Schalldruckverteilung eine komplizierte Interferenzstruktur. Ab einem bestimmten Abstand zur Membran können sich die Wellen nicht mehr auslöschen und es kommt zu einem letzten Maximum auf der akustischen Achse. Diesen Abstand bezeichnet man als Nahfeldlänge. Darüber hinaus, im sog. Fernfeld, ist der Aufpunkt so weit von der Membran entfernt, dass alle Schallstrahlen als parallel angenommen werden können und der Schalldruck der Kolbenmembran reziprok mit der Entfernung abnimmt. Im Fernfeld wird das Schallbündel immer breiter. Das Aufweiten des Schallbündels wird durch den Divergenz- bzw. Öffnungswinkel γ_0 charakterisiert

$$\sin \gamma_0 = 1,22 \frac{\lambda}{d} . \quad \text{Gl. 48}$$

Für einen kreisförmigen Schwinger ergibt sich für einen Prüfkopfdurchmesser $d \gg \lambda$ die Nahfeldlänge zu

$$N \approx \frac{d^2}{4 \lambda} . \quad \text{Gl. 49}$$

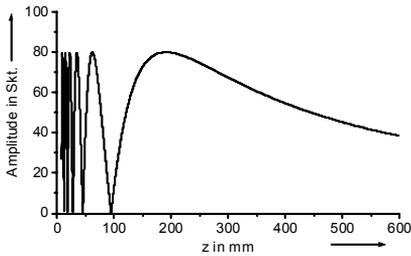
Bei impulsförmiger Anregung des Schwingers können sich durch die begrenzte Kohärenzlänge der Impulse keine vollständigen Minima im Nahfeld ausbilden; das Schallfeld wird „verschmiert“.

Die Randbedingungen der Ultraschallprüfung im Bauwesen werden im Kapitel 2 ausführlich beschrieben und führen auf ein für die Abstrahlcharakteristik ungünstiges Verhältnis des Prüfkopfdurchmessers zur Wellenlänge.

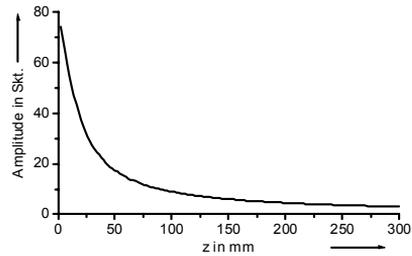
In **Abb. 96** und **Abb. 97** werden die mit der Punktquellensynthese berechneten Schalldruckverläufe und Schallfelder eines typischen Ultraschallprüfkopfes für metallische Werkstoffe einem Niederfrequenz-Prüfkopf für die Anwendung im Bauwesen gegenübergestellt. Die Unterschiede werden im Wesentlichen durch die verschiede-

nen Verhältnisse des Prüfkopfdurchmessers d zur Wellenlänge λ der Prüffrequenz hervorgerufen.

Abb. 96 zeigt die Schalldruckverläufe von zwei Prüfköpfen mit unterschiedlichen d/λ -Verhältnissen auf der akustischen Achse.



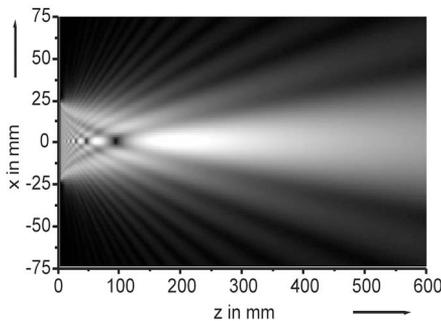
Verhältnis des Schwingerdurchmessers zur Wellenlänge $d/\lambda = 48/3 = 16$



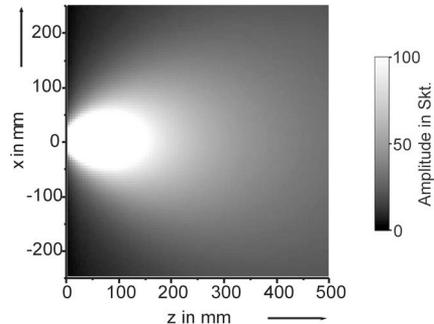
Verhältnis des Schwingerdurchmessers zur Wellenlänge $d/\lambda = 34/40 < 1$

Abb. 96: Schalldruckverlauf von kreisförmigen Schwingern entlang der akustischen Achse im schubspannungsfreien Medium bei harmonischer Anregung (Berechnung für Longitudinalwellen).

Bei harmonischer Anregung des Hochfrequenz-Prüfkopfes kommt es zu einer ausgeprägten Interferenzstruktur (Abb. 96, links). Im Gegensatz dazu erhält man für einen üblichen Niederfrequenz-Prüfkopf mit einem Schwingerdurchmesser von 34 mm für eine Wellenlänge von 40 mm im Beton einen Schalldruckverlauf auf der Schwingerachse, der sich fast wie ein Punktstrahler verhält, d. h. der Schalldruck nimmt reziprok mit der Entfernung ab; ein Nahfeld ist nicht erkennbar (Abb. 96, rechts).



Verhältnis des Schwingerdurchmessers zur Wellenlänge $d/\lambda = 48/3 = 16$

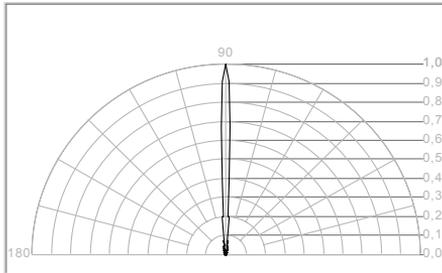


Verhältnis des Schwingerdurchmessers zur Wellenlänge $d/\lambda = 34/40 < 1$

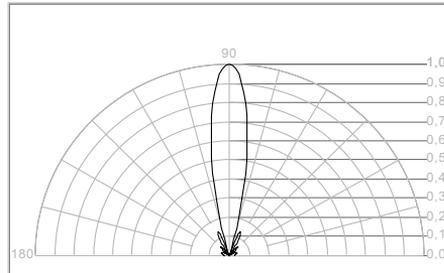
Abb. 97: Schallfelder von kreisförmigen Schwingern im nichtschubspannungsfreien Medium bei harmonischer Anregung (Berechnung für Longitudinalwellen).

Abb. 97 zeigt die zugehörigen Schallfelder. Das Schallfeld des Hochfrequenz-Prüfkopfes zeigt einen geringen Divergenzwinkel und eine ausgeprägte Interferenzstruktur (Abb. 97, links). Das Schallfeld des Niederfrequenz-Prüfkopfes zeigt dagegen einen großen Öffnungswinkel des Schallbündels, was sich ungünstig auf das Auflösungsverhalten bei der Ultraschallprüfung auswirkt (Abb. 97, rechts).

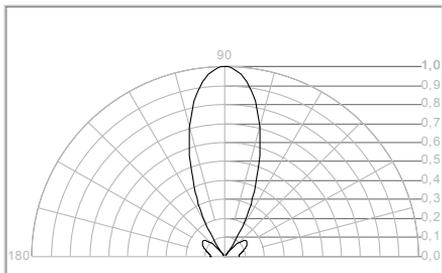
Die folgenden Rechnungen in Polarkoordinaten zeigen diesen Effekt noch deutlicher.



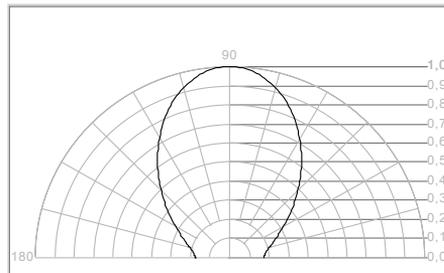
$d/\lambda = 16$



$d/\lambda = 4$



$d/\lambda = 2$



$d/\lambda = 1$

Abb. 98: Berechnung der Richtcharakteristiken für unterschiedliche Verhältnisse des Schwingerdurchmessers zur Wellenlänge d/λ (Fernfeld, schubspannungsfreies Medium bei harmonischer Anregung, Longitudinalwellen).

Abb. 98 zeigt die Richtcharakteristiken für unterschiedliche Verhältnisse des Schwingerdurchmessers zur Wellenlänge d/λ (Fernfeld, schubspannungsfreies Medium bei harmonischer Anregung, Longitudinalwellen). Das im Bauwesen übliche Verhältnis $d/\lambda \approx 1$ führt, wie in der Abbildung rechts unten, zu einem fast cosinusförmigen Abstrahlverhalten für Longitudinalwellen.

Abb. 99 stellt den Schalldruckverlauf von kreisförmigen Schwingern auf der akustischen Achse im nichtschubspannungsfreien Medium bei Impulsanregung ($d/\lambda = 16$, vergleiche Abb. 97, links) dar. Die ausgeprägten Interferenzen dicht vor dem Schwinger werden vermieden.

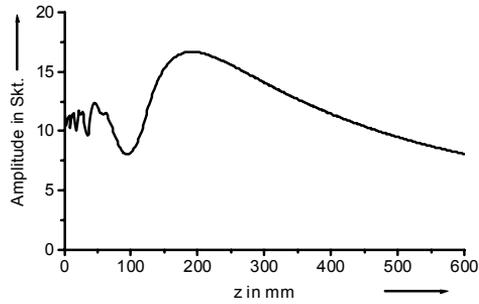


Abb. 99: Schalldruckverlauf von einem kreisförmigen Schwinger auf der akustischen Achse im nichtschubspannungsfreien Medium bei Impulsanregung (Berechnung für Longitudinalwellen, Verhältnis des Schwingerdurchmessers zur Wellenlänge $d/\lambda = 48/3 = 16$).

Für die Modellierung der Wellenausbreitung der Longitudinalwellen in einem nichtschubspannungsfreien Medium nach $t = 15 \mu\text{s}$ und nach $t = 55 \mu\text{s}$ (s. **Abb. 100**) wurde ein Niederfrequenz-Prüfkopf mit einem Verhältnis des Schwingerdurchmessers zur Wellenlänge von $d/\lambda \approx 1$ (vergleiche Abb. 97, rechts) zugrunde gelegt. Die Anregung erfolgte mit einem RC2(t)-Impuls der Mittenfrequenz von $f_m = 100 \text{ kHz}$. Deutlich erkennt man den großen Divergenzwinkel mit der maximalen Amplitude der Wellenfront in Richtung der Prüfkopfachse.

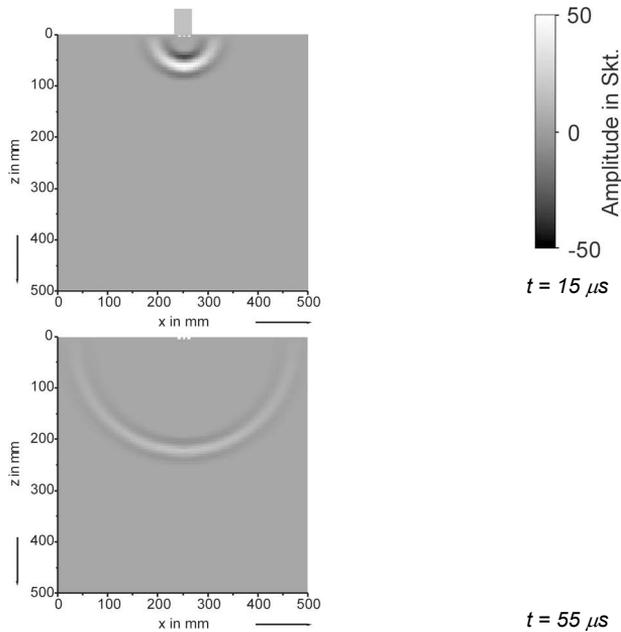


Abb. 100: Simulation der Wellenausbreitung eines kreisförmigen Schwingers auf der akustischen Achse im nichtschubspannungsfreien Medium bei Impulsanregung (Punktquellensynthese, $RC2(t)$ -Anregungsimpuls, Mittenfrequenz $f_m = 100$ kHz, Elementdurchmesser $d = 34$ mm).

9.5 Fokussierte Schallfelder

Bereits bei ebenen Schwingern kommt es allein durch Beugungseffekte zu einer Einschnürung des Schallfeldes im Abstand der Nahfeldlänge. Man spricht auch von natürlicher Fokussierung. Prüfköpfe, die durch geometrische Maßnahmen das Schallfeld fokussieren, verbessern die natürliche Fokussierung von ebenen Schwingern.

Die Steuerung der Fokussierung kann prinzipiell durch Veränderung verschiedener Parameter, wie z. B. der Schallgeschwindigkeit der verwendeten Vorlaufstrecken oder der Krümmungsradien von Schwingern bzw. von Linsen, erfolgen [69].

Durch geometrische Maßnahmen, wie z. B. gekrümmte Schwinger, kann auf bestimmte konstante Abstände fokussiert werden, die innerhalb der Nahfeldlänge des entsprechenden ebenen Strahlers liegen. Anhand eines konkreten Beispiels eines sphärisch gekrümmten kreisförmigen Schwingers werden nachfolgend einige Begriffe erläutert und der Effekt der Fokussierung verdeutlicht.

In Anlehnung an [23] wurden die folgenden berechneten Schalldruckverläufe für den Impuls-Echo-Betrieb in dB dargestellt. Der Bezugspegel p_0 entspricht dem mittleren Wert des Schalldruckes unmittelbar vor dem ebenen Schwinger (Krümmungsradius $r \rightarrow \infty$). In die Empfindlichkeitscharakteristik für Echoverfahren geht die Freifeld-Richtcharakteristik quadratisch ein, wenn derselbe Prüfkopf sowohl zum Senden als auch für den Empfang benutzt wird

$$A_{Echo} = 20 \lg \left(\frac{p}{p_0} \right)^2 \text{ dB} . \quad \text{Gl. 50}$$

So beträgt bei einem ebenen Schwinger die relative Echohöhe eines Punktreflectors im Abstand der Nahfeldlänge N (natürlicher Fokus) 12 dB. **Abb. 101** zeigt die Echoamplitude eines Punktreflectors auf der akustischen Achse eines Prüfkopfes mit einem Durchmesser von $d = 400$ mm bei einer Wellenlänge von $\lambda = 40$ mm.

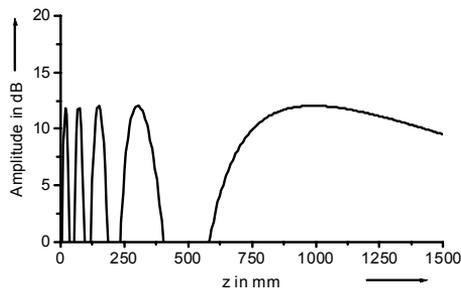


Abb. 101: Berechnung der Echoamplitude eines Punktreflectors auf der akustischen Achse eines ebenen Schwingers. Die relative Echo-Schalldruckamplitude im Nahfeldabstand beträgt 12 dB.

Der Schalldruck p im Abstand z auf der Bündelachse eines sphärisch gekrümmten Schwingers berechnet sich mit einem Schwingerdurchmesser d und einem Krümmungsradius r zu [23], [52], [53]

$$p = p_0 \left| \frac{2}{1 - \frac{z}{r}} \right| \left| \sin \left[\frac{\pi}{\lambda} \left(\sqrt{\left(z - \left(r - \sqrt{r^2 - \frac{d^2}{4}} \right) \right)^2 + \frac{d^2}{4}} - z \right) \right] \right| . \quad \text{Gl. 51}$$

Der erste Term der Gleichung gibt den geometrischen Einfluss der Schwingerkrümmung und der Sinus-Term die Beugungseffekte bedingt durch den begrenzten Schwinger wieder.

Ein abgewandeltes Beispiel aus [23] zeigt die Größenordnungen, insbesondere des möglichen Empfindlichkeitsgewinns durch Fokussierung. Die Parameter wurden dem Niederfrequenzbereich entsprechend angepasst. Ein Prüfkopf dieser Größe ist für eine Fokussierung im Niederfrequenzbereich eher unüblich, daher soll die folgende Beispielrechnung lediglich eine Vorstellung von den Größenordnungen des sich ergebenden Arbeitsbereiches und dem Empfindlichkeitsgewinn geben.

Für einen sphärisch gekrümmten Schwinger mit dem Durchmesser $d = 400$ mm, dem Krümmungsradius $r = 600$ mm und der Wellenlänge $\lambda = 40$ mm ergibt sich folgender Schalldruckverlauf auf der akustischen Achse:

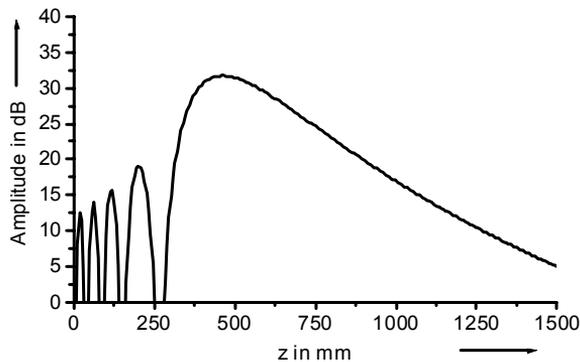


Abb. 102: Berechnung der Echoamplitude eines Punktreflectors auf der akustischen Achse eines sphärisch gekrümmten Schwingers (Krümmungsradius $r = 600$ mm).

In der **Abb. 102** wird die Echohöhe eines Punktreflectors in Abhängigkeit vom Abstand in dB dargestellt. Es ergibt sich in 462 mm Tiefe der Fokus des Schallfeldes. Der Bereich um den Fokuspunkt herum stellt den Arbeitsbereich des fokussierten Prüfkopfes dar, dessen Grenzen üblicherweise durch einen Abfall um 6 dB der Echo-Amplitude bzw. 3 dB der Freifeldamplitude definiert wird. Der Arbeitsbereich wird mit stärkerer Fokussierung immer kleiner. Nach dem Fokuspunkt zu größeren Abständen hin treten wiederum Extrema des Druckes auf. Diese gespiegelten Nahfeldeigenschaften werden durch die zunehmenden Phasenverschiebungen für größere Abstände verursacht [52], [53].

Für das fokussierte Schallfeld ergibt sich im Beispiel für einen Punktreфлектор im Fokuspunkt die relative Echohöhe von 31,7 dB, was einen Empfindlichkeitsgewinn von $31,7 \text{ dB} - 12 \text{ dB} = 19,7 \text{ dB}$ und damit etwa der zehnfachen Echohöhe gegenüber dem ebenen Schwinger entspricht.

Man erkennt, dass das Schalldruckmaximum, der akustische Fokus, entgegen der erwarteten Position an der Stelle des geometrischen Fokus im Abstand $f_{ak} < f_{geom}$ liegt. Dieser Effekt wird durch die Überlagerung des Einflusses der Schwingerkrümmung und der Beugung der Wellen durch die begrenzte Schallquelle hervorgerufen. Dadurch wird der Fokussierungseffekt abgeschwächt und der Ort maximaler Feldstärke rückt näher an den Schwinger heran. Es bildet sich im Gegensatz zur Optik ein Fokusschlauch mit nicht mehr so starker Feldkonzentration aus. Bekannte Ableitungen aus der geometrischen Optik können also nicht verwendet werden, weil die Bedingung $d/\lambda \rightarrow \infty$ nicht erfüllt ist und damit der Schalldruck auch von der Wellenlänge λ abhängt [52], [53], [28]. Der auf die Nahfeldlänge N des entsprechenden ebenen Schwingers bezogene akustische Fokusabstand wird als Fokussierungsgrad K oder auch als Nahfeldverkürzungsfaktor bezeichnet. Eine Fokussierung für $K > 0,6$ gilt als schwach und für $K < 0,3$ als stark. Der Fokussierungsfaktor korreliert auch mit der Einschnürung im Bereich der Bündelachse [23]. Im Beispiel beträgt der Fokussierungsfaktor $K \approx 462 \text{ mm}/990 \text{ mm} = 0,47$, was einer mittleren Fokussierung entspricht

$$K = \frac{f_{ak}}{N} = \frac{4 f_{ak} \lambda}{d^2} . \quad \text{Gl. 52}$$

Die Lage der empfindlichen Zone hängt also von der Nahfeldlänge und der zusätzlichen Fokussierung durch den Krümmungsradius des Schwingers ab. Um für eine Fokussierung in einer bestimmten Tiefe den entsprechenden Krümmungsradius zu finden, kann außer einem iterativen Verfahren auch folgende Näherung benutzt werden [70]

$$f_{geom} \approx \frac{d^2}{4\lambda(1-k)} (k - 0,82 k^2 + 0,43 k^3) . \quad \text{Gl. 53}$$

Dabei entspricht der berechnete geometrische Fokus f_{geom} dem notwendigen Krümmungsradius r des Schwingers für einen vorgegebenen Fokussierungsgrad. Mit steigendem Fokussierungsgrad wird die Einschnürung des Schallbündels geringer. Die Druckverteilung des fokussierten Schallfeldes quer zur akustischen Achse zeigt ein Beugungsbild wie beim ebenen Schwinger, das im Fokusabstand mit Hilfe einer Besselfunktion erster Gattung der Ordnung 1 beschrieben werden kann [23], [52], [53]

$$p = \left| p_{\max} \frac{2 J_1(x)}{x} \right| \quad \text{Gl. 54}$$

$$\text{mit } x = \frac{\pi d s}{\lambda f_{ak}},$$

$$J_n(x) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k \left(\frac{x}{2}\right)^{n+2k}}{k! \Gamma(n+k+1)} \quad \text{und}$$

$$\Gamma(n+1) = n! \quad \text{für } n = 1, 2, 3, \dots$$

Mit s ist die Querverschiebung senkrecht zur akustischen Achse bezeichnet.

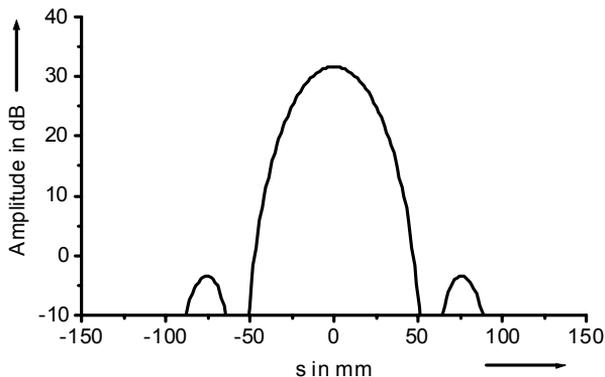


Abb. 103: Berechnung des Schallfeldprofils der Echoamplitude eines Punktrefektors im Fokusabstand $f_{ak} = 462 \text{ mm}$ (Krümmungsradius $r = 600 \text{ mm}$).

Abb. 103 zeigt für das Beispiel die Schalldruckquerverteilung eines Schwingers mit einem Durchmesser $d = 400 \text{ mm}$ und einem Krümmungsradius $r = 600 \text{ mm}$. Man erkennt deutlich die Einschnürung des Schallbündels auf Werte, die unterhalb des Schwingerdurchmessers liegen.

Eine Erhöhung des Schalldrucks im Arbeitsbereich durch fokussierende Prüfköpfe ist für einen Nachweis kleiner Reflektoren im Prüfling vorteilhaft. Die Einschnürung des Schallbündels ist bei der Reflektorrandabtastung interessant.

Im Zusammenhang mit der Ultraschalluntersuchung von Betonbauteilen ist die Einengung des untersuchten Volumens, was den Signal-Störabstand von Echoanzeigen verbessert, besonders hervorzuheben.

Nachfolgend werden der Schalldruck entlang der akustischen Achse und die Schalldruckquerverteilung für einen Schwinger mit einem Krümmungsradius von $r = 450$ mm dargestellt. Die sonstigen Berechnungsparameter sind unverändert.

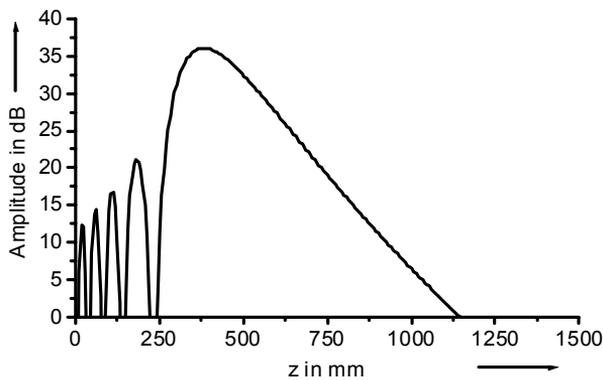


Abb. 104: Berechnung der Echoamplitude eines Punktrefektors auf der akustischen Achse eines sphärisch gekrümmten Schwingers (Krümmungsradius $r = 450$ mm).

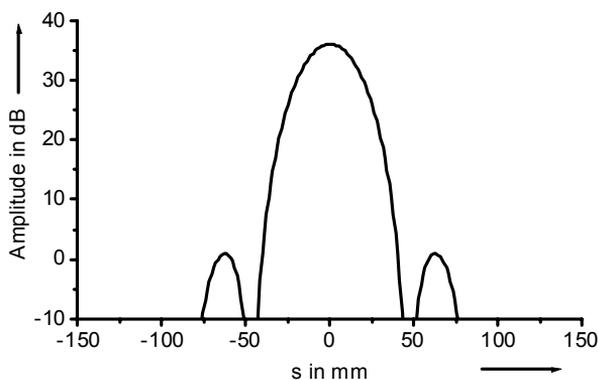


Abb. 105: Berechnung des Schallfeldprofils der Echoamplitude eines Punktrefektors im Fokusabstand $f_{ak} = 383$ mm (Krümmungsradius $r = 450$ mm).

Abb. 104 und **Abb. 105** zeigen, dass die Schallbündelbreite und -länge durch die stärkere Fokussierung geringer und damit der Arbeitsbereich kleiner wird.

Der Einsatz fokussierender Prüfköpfe zur Fehleranalyse setzt die geeignete Auswahl der Prüfmethode und Prüfköpfe voraus. Die Fokussierung des Prüfkopfes muss an das zu untersuchende Volumen angepasst sein, was zu Prüfköpfen führt, die für einen speziellen Anwendungsfall zugeschnitten sind [70], [52], [53].

9.6 Schalldruckverlauf auf der Gruppenstrahlerachse

Durch die langgestreckte Form des Gruppenstrahler-Prüfkopfes ist das Schallfeld nicht rotationssymmetrisch im Gegensatz zum Schallfeld eines kreisförmigen Schwingers. Für rechteckförmige Schwinger findet man in der Literatur Näherungsformeln der Nahfeldlänge für unterschiedliche Schwingerseitenverhältnisse [23]. Die Nahfeldlänge ist dabei als der Abstand des letzten Maximums auf der Strahlerachse definiert.

Für einen rechteckförmigen Schwinger mit der Kantenlänge b berechnet sich die Nahfeldlänge N zu [23] (mit Faktor h aus **Tabelle 4**)

$$N_{\text{recht}} = h \frac{b^2}{4 \lambda} . \quad \text{Gl. 55}$$

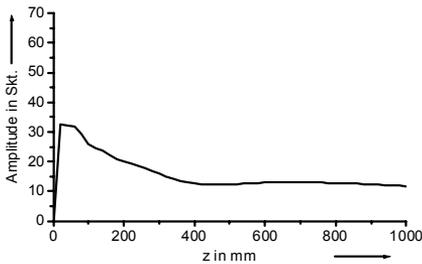
Tabelle 4: Faktor h für die Näherungsformel Gl. 55 (Auswahl aus [23]).

Schwingerseitenverhältnis a/b	h
1	1,37
0,5	1,01
0,2	0,99

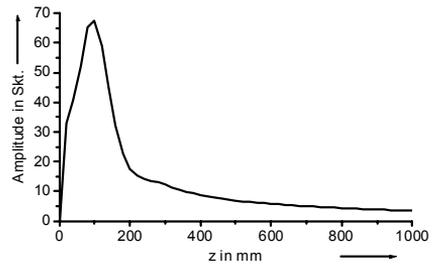
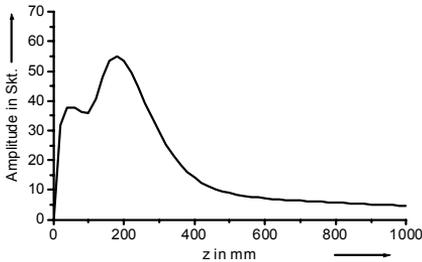
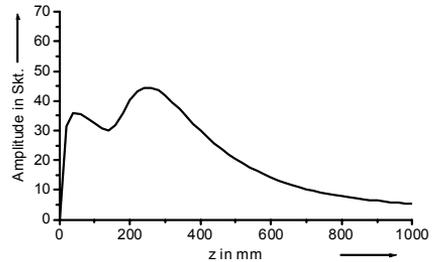
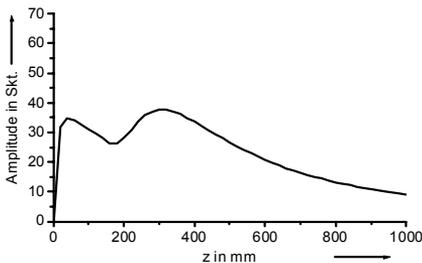
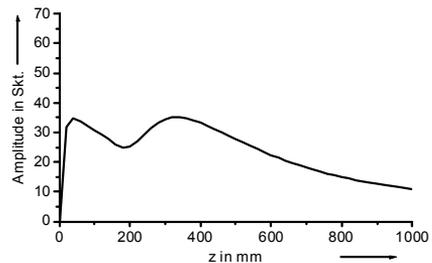
Für rechteckförmige Schwinger mit den Kanten a und b (b entspricht der längeren Kantenlänge) wird mit kleiner werdendem Seitenverhältnis a/b der Faktor h und damit die Nahfeldlänge geringer. Setzt man für den Gruppenstrahler-Prüfkopf nach Abb. 84 näherungsweise das Seitenverhältnis 0,2 an, ergibt sich für die Nahfeldlänge und damit für den Bereich, in dem eine Fokussierung möglich ist, ein Wert von $N_{\text{Grstr}} \approx 715 \text{ mm}$ ($h = 0,99$, $b = 340 \text{ mm}$, $\lambda = 40 \text{ mm}$).

Nachfolgend werden mit der Punktquellensynthese die Schalldruckverläufe auf der Gruppenstrahlerachse für die Fokussierung in verschiedenen Tiefen berechnet (s. **Abb. 106**).

Der berechnete Schalldruckverlauf auf der Achse des Gruppenstrahlers für den unfokussierten Fall zeigt kein ausgeprägtes Maximum. Der Schalldruck ist im Abstand von 400 mm bis 1000 mm fast konstant. Die Berechnungen zeigen, dass durch Punktfokussierung in Abständen von 700 mm und 800 mm nur noch eine geringe Steigerung der Amplitude erreicht werden kann.



a) ohne Fokussierung

b) Punktfokussierung ($s = 0 \text{ mm}$, $z = 100 \text{ mm}$)c) Punktfokussierung ($s = 0 \text{ mm}$, $z = 200 \text{ mm}$)d) Punktfokussierung ($s = 0 \text{ mm}$, $z = 300 \text{ mm}$)e) Punktfokussierung ($s = 0 \text{ mm}$, $z = 400 \text{ mm}$)f) Punktfokussierung ($s = 0 \text{ mm}$, $z = 450 \text{ mm}$)

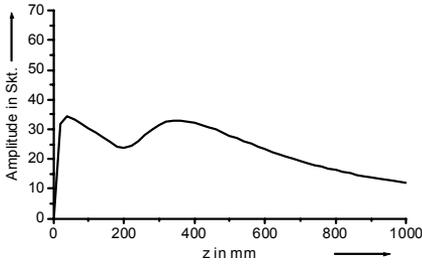
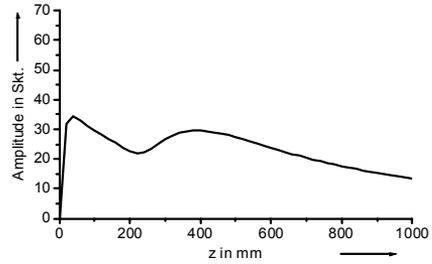
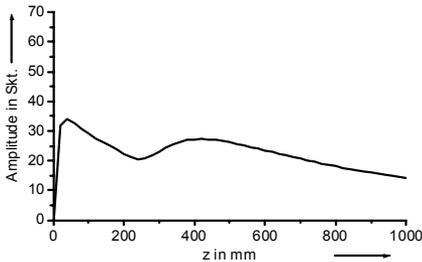
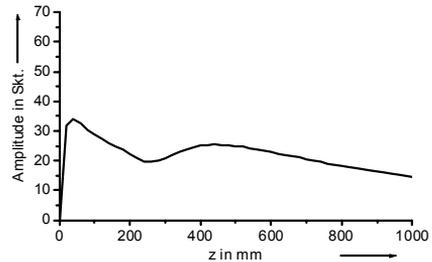
g) Punktfokussierung ($s = 0$ mm, $z = 500$ mm)h) Punktfokussierung ($s = 0$ mm, $z = 600$ mm)i) Punktfokussierung ($s = 0$ mm, $z = 700$ mm)j) Punktfokussierung ($s = 0$ mm, $z = 800$ mm)

Abb. 106: Schalldruckverlauf des Gruppenstrahlers auf der akustischen Achse ($s = 0$ mm) für die Fokussierung in unterschiedlichen Tiefen.

9.7 Punktgerichtwirkungen

Es folgt die Beschreibung der Felder einer punktförmigen Tangentialspannung in einem nichtschubspannungsfreien Medium nach [28]. Die Richtcharakteristik einer Longitudinalwelle bei einer punktförmigen Tangentialspannung lautet

$$R_{LT}(\alpha) = - \frac{2 \sin \alpha \cos \alpha \sqrt{\left(\frac{c_L}{c_T}\right)^2 - \sin^2 \alpha}}{\left[\left(\frac{c_L}{c_T}\right)^2 - 2 \sin^2 \alpha\right]^2 + 4 \sin^2 \alpha \cos \alpha \sqrt{\left(\frac{c_L}{c_T}\right)^2 - \sin^2 \alpha}} . \quad \text{Gl. 56}$$

Die Richtcharakteristik einer Transversalwelle bei einer punktförmigen Tangentialspannung lautet

$$R_{TT}(\alpha) = \frac{(1 - 2 \sin^2 \alpha) \cos \alpha}{(1 - 2 \sin^2 \alpha)^2 + 4 \sin^2 \alpha \cos \alpha \sqrt{\left(\frac{c_T}{c_L}\right)^2 - \sin^2 \alpha}} \quad \text{Gl. 57}$$

Die **Abb. 107** zeigt die Punktrichtwirkungen einer punktförmigen Tangentialspannung für Beton ($c_L = 4000$ m/s, $c_T = 2300$ m/s).

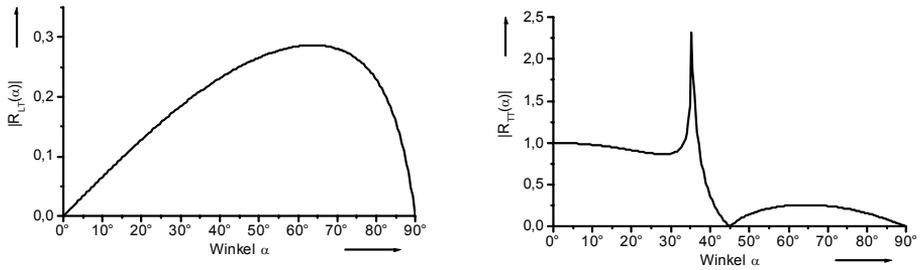


Abb. 107: Punktrichtwirkung bei einer punktförmigen Tangentialspannung für Beton ($c_L = 4000$ m/s, $c_T = 2300$ m/s).

Links: Richtungsabhängigkeit der entstehenden Longitudinalwelle.

Rechts: Richtungsabhängigkeit der entstehenden Transversalwelle.

10 Literatur

- [1] Azar, L.; Wooh, S.-C.: *Experimental Characterization of Ultrasonic Phased Arrays for the Non-Destructive Evaluation of Concrete Structures*. Materials Evaluation, Vol. 57 (1999) 2, p. 134-140.
- [2] Boehm, R.; Erhard, A.; Möhrle, W.: *Beeinflussung des Gruppenstrahlerschallfeldes durch Anisotropie*. In: DGZfP-Jahrestagung 17.-19.5.1993 in Garmisch-Partenkirchen, DGZfP-Berichtsband auf CD, Berlin (1993).
- [3] Boehm, R.; Erhard, A.; Wüstenberg, H.: *Dreidimensionale Modellrechnungen zum Einfluss von zylindrischen Bauteilkrümmungen auf das Schallfeld von Gruppenstrahler-Prüfköpfen*. In: DGZfP-Jahrestagung 6.-8.5.2002 in Weimar, DGZfP-Berichtsband auf CD, Berlin (2002).
- [4] Boehm, R.: *Einfluss fokussierter Schallfelder auf das Reflexionsverhalten von Testfehlern*. In: DGZfP-Jahrestagung 2003 in Mainz, DGZfP-Berichtsband auf CD, Berlin (2003).
- [5] Borchhardt, G.: *Zur Applikation von piezoelektrischen Luftultraschallwandlern*. In: Hermsdorfer Technische Mitteilungen 69, 1986, S. 2196 bis 2204.
- [6] Bronstein, I. N.; Semendjajew, K. A.: *Taschenbuch der Mathematik*. 5. Aufl. Thun und Frankfurt am Main: Harri Deutsch Verlag, 2001.
- [7] Czichos, H. (Hrsg.): *Hütte, Die Grundlagen der Ingenieurwissenschaften*. 30. Aufl. Berlin: Springer-Verlag, 1996.
- [8] Cremer, L.; Heckl, M.: *Körperschall*. 2. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1996.
- [9] Deutsch, V.; Platte, M.; Vogt, M.: *Ultraschallprüfung*. 1. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1997.
- [10] DFG-Forschergruppe 384: *Zerstörungsfreie Strukturbestimmung von Betonbauteilen mit akustischen und elektromagnetischen Echo-Verfahren*. Zwischenbericht 2001 bis 2003.
- [11] Erhard, A.; Wüstenberg, H.; Haufe, U.; Möhrle, W.: *Berechnung und Bau von Gruppenstrahler-Prüfköpfen*. In: Proceedings of the 3rd European Conference on Non-Destructive Testing, Florence (1984), p. 156-170.
- [12] Erhard, A.; Bertus, N.; Montag, H.-J.; Schenk, G.; Hintze, H.: *Ultrasonic Phased Array System for Railroad Axle Examination*. In: 8 th ECNDT, Barcelona, 2002.
- [13] Ernst, H.: *Experimentelle Verifizierung von Modellvorstellungen zur Schallausbreitung in anisotropen Materialien*. Dissertation TU Freiberg, 2004.

- [14] Filbert, D.: *Technische Diagnose*. Skriptum zur Vorlesung. TU Berlin, Fachgebiet Elektrische Messtechnik, 1992.
- [15] Gebhardt, W.: *Grundlagen und Anwendungen von Phased Arrays*. In: DGZfP, Fachausschuss Sonderprüfverfahren und Ultraschall-Prüfverfahren: Sitzung neuere Verfahren zur Analyse von Ultraschall-Befunden, Berlin 24.2.1977.
- [16] Goebels, K.; Römer, M.: *Quantitativer Vergleich verschiedener Ultraschall-Prüfverfahren zur Verbesserung des Signal-Rausch-Abstandes beim Vorliegen kohärenten Untergrundes*. In: DGZfP-Jahrestagung 21.-23.5.1979 in Lindau, DGZfP-Berichtsband, Berlin, 1979.
- [17] Kozlov, V.; Samokrutov, A.; Shevaldykin, V.: *Ultrasonic Defectoscopy of concrete by means of Pulse-Echo-Technique*. In: Proceedings of the 8th ECNDT, Barcelona, 2002.
- [18] Koska, J.: *Simulation und Inversion der Ausbreitung elastischer Wellen*. Dissertation Technische Universität Kassel, 1999.
- [19] Köhler, B.; Schurig, C.: *Visualization of ultrasonic fields on solids*. Konferenz-Einzelbericht: Ultrasonics World Congress 1995. Part 1. Proceedings of the World Congress on Ultrasonics (1995), Seite 459-462 (4 Seiten, 8 Bilder, 4 Quellen), Duisburg: Ges. f. angewandte Ultraschallforschung (GEFAU).
- [20] Köhler, B.; Schubert, F.: *Scan-Technik zur Schallfeldvermessung an Festkörpern*. In: Materialprüfung 38 (1996) 7-8, München, Carl Hanser Verlag, S. 298-301.
- [21] Köhler, B.; Schubert, F.; Algernon, D.; Gardei, A.; Mielentz, F.; Krause, M.: *Experimental Study of Elastic Waves in Concrete for NDE in Civil Engineering*. In: WCNDT, Montreal, Canada, 30.8.-3.9.2004.
- [22] Krause, M.; Mielentz, F.; Milmann, B.; Müller, W.; Schmitz, V.: *Imaging of cracks and honeycombing in concrete elements*. In: Proceedings of 27th International Acoustical imaging Symposium, 24-27 March 2003, Saarbrücken, Germany.
- [23] Krautkrämer, J.; Krautkrämer, H.: *Werkstoffprüfung mit Ultraschall*. 5. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1986.
- [24] Krautkrämer Firmenschrift: *Nadel oder Rechteck*. Z. Echo. 1998, Nr. 37, Fa. Krautkrämer, S. 27-29.
- [25] Krieger, J.; Krause, M.; Wiggenhauser, H.: *Erprobung und Bewertung zerstörungsfreier Prüfmethoden für Betonbrücken*. In: BAST-Bericht Heft B 18, Bremerhaven: Wirtschaftsverlag NW (1998), 143 Seiten.

- [26] Kroggel, O.; Krause, M.; Langenberg, K. J.: *Moderne Verfahren der Bauwerksdiagnose, Entwicklung und Anwendung. Ultraschall*. In: Fachtagung des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (DafStb) in Zusammenarbeit mit der BAM, Konferenz-Einzelbericht, Seite A5-A10, Berlin, 2005.
- [27] Kuttruff, H.: *Physik und Technik des Ultraschalls*. Stuttgart: Hirzel-Verlag, 1988.
- [28] Kutzner, J.: *Grundlagen der Ultraschallphysik*. 1. Aufl. Stuttgart: B. G. Teubner-Verlag, 1983.
- [29] Kühnicke, E.: *Elastische Wellen in geschichteten Festkörpersystemen*. 1. Edition, Bonn: TIMUG e.V., 2001.
- [30] Langenberg, K. J.: *Elektromagnetische- und elastische Wellen*. Skriptum zum Kurs. TU Kassel, 2003.
- [31] Langenberg, K. J.; Mayer, K.; Marklein, R.; Ampha, P.; Krause, M.; Mielentz, F.: *Ultrasonic Phased Array and synthetic Aperture Imaging in Concrete*. In: WCNDT, Montreal, Canada, 30.8.-3.9.2004.
- [32] Lipsmeier, A. (Hrsg.); Teml, A.: *Friedrich, Tabellenbuch Bautechnik*. 331.-340. Aufl. Bonn: Dümmler-Verlag, 1998.
- [33] Marklein, R.: *Numerische Verfahren zur Modellierung von akustischen, elektromagnetischen, elastischen und piezoelektrischen Wellenausbreitungsproblemen im Zeitbereich basierend auf der Finiten Integrationstechnik*. Shaker-Verlag, Aachen, 1998.
- [34] Miller, G. F.; Pursey, H.: *The field and radiation impedance of mechanical radiators on the free surface of a semi-infinite isotropic solid*. In: Proc. R. Soc. London, Bd. 223 der Reihe A, S. 521-541, 1954.
- [35] Millner, R.: *Ultraschalltechnik*. Weinheim: Physik-Verlag, 1987.
- [36] Mielentz, F.; Milman, B.; Krause, M.; Wiggerhauser, H.: *Praxiseinsatz eines Ultraschallecho-Verfahrens zur Strukturuntersuchung von Betonbauteilen*. In: DGZfP (Hrsg.); Fachtagung Bauwerksdiagnose - Praktische Anwendungen Zerstörungsfreier Prüfungen, 21.-22.1.1999 in München, DGZfP-Berichtsband 66-CD (1999), Poster 3.
- [37] Mielentz, F.; Krause, M.; Wüstenberg, H.: *Entwicklung einer Gruppenstrahler-Sendeeinheit für Ultraschalluntersuchungen von Betonbauteilen*. In: DGZfP-Jahrestagung 06.-08.5.2002 in Weimar, DGZfP-Berichtsband BB 80-CD, Vortrag 44, Berlin, 2002.

- [38] Mielentz, F.; Krause, M.; Wüstenberg, H.; Wiggnerhauser, H.: *Development of a phased array transmitting equipment for ultrasonic testing of concrete*. In: Proceedings of the 11th International Symposium on Non-Destructive Characterization of Materials, 24.-28.6.2002, Berlin, DGZfP-Berichtsband, Vortrag B10-2 auf CD, Berlin, 2002.
- [39] Mielentz, F.; Krause, M.; Boehm, R.; Wüstenberg, H.; Mayer, K.; Marklein, R.: *Experimental and theoretical investigation to optimize an ultrasonic phased array for low frequencies*. In: Proceedings of Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE), 16.-19.9.2003 in Berlin, Poster 49.
- [40] Mielentz, F.; Ernst, H.; Wüstenberg, H.; Mayer, K.; Marklein, R.: *Gruppenstrahler für Ultraschallprüfungen von Betonbauteilen: Überprüfung der Funktionsweise eines laufzeitgesteuerten Gruppenstrahlers durch Visualisierung der Wellenausbreitung*. Z. MP Materialprüfung. Jahrg. 46. 2004, Nr. 11-12, S. 582-586.
- [41] Moeller, F.; Fricke, H.; Frohne, H.; Vaske, P.: *Grundlagen der Elektrotechnik*. 17. Aufl. Stuttgart: Teubner-Verlag, 1986.
- [42] Möschwitzer, A. (Hrsg.): *Formeln der Elektrotechnik und Elektronik*. 2. Aufl. Berlin: Technik-Verlag, 1989.
- [43] Müller, W.; Schmitz, V.; Schäfer, G.: *Reconstruction by the synthetic aperture focussing technique (SAFT)*. In: Konferenz-Einzelbericht: Nucl. Eng. Des., 3. Japanese-German joint seminar on reactor safety research, 1986.
- [44] Paris, O.; Brédif, Ph.; Roy, O.; Rambach, J. M.; Nahas, G.: *Study of Phased Array Techniques for Cracks Characterization in Concrete Structures*. In: Proceedings of Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE), 16.-19.9.2003 in Berlin.
- [45] Polytec Firmenschrift: *Info Special, Geschäftsbereich Lasermesssysteme*. Firmenschrift 1/2003.
- [46] Polytec: Laser Doppler Vibrometer: *Bedienungshandbuch Controller OFV-3001, Messkopf OFV-303*. Waldbronn: Fa. Polytec GmbH, 1999.
- [47] Polytec: Scanning Controller System: *Bedienungshandbuch Controller OFV-042*. Waldbronn: Fa. Polytec GmbH, 2001.
- [48] Schenk, G.; Möhrle, W.; Montag, H.-J.; Erhard, A.; Wüstenberg, H.: *Ultraschall Real-Time-Scanner für die Schweißnahtprüfung*. In: DGZfP (Hrsg.); DACH-Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung, 29.-31.5.2000 in Innsbruck, DGZfP-Berichtsband 73, Berlin (2000), S. 659-668.

- [49] Schenk, G.: *Mündliche Mitteilung*. Gespräch Berlin, 2003.
- [50] Schickert, M.: *Einfluss der frequenzabhängigen Schallschwächung auf die Ultraschall-Laufzeitmessung an mineralischen Stoffen*. In: DGZfP-Jahrestagung 09.-11.5.1994 in Timmendorfer Strand, DGZfP-Berichtsband, Berlin, 1994.
- [51] Schickert, M.: *Progress in ultrasonic SAFT-imaging of concrete*. In: Proceedings of Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE), 16.-19.9.2003 in Berlin.
- [52] Schlengermann, U.: *Schallfeldausbildung bei ebenen Ultraschallquellen mit fokussierenden Linsen*. Z. Acustica. Vol 30. 1974, S. 291-300.
- [53] Schlengermann, U.: *Erläuterungen zum Ultraschallprüfen mit fokussierenden Prüfköpfen*. In: DGZfP (Hrsg.); Neuere Verfahren zur Analyse von Ultraschall-Befunden, 1977, S. 9-22.
- [54] Schoch, A.: *Schallreflexion, Schallbrechung und Schallbeugung*. In: Ergebnisse der exakten Naturwissenschaften, Bd. XXIII, S. 127-234, 1950.
- [55] Schubert, F.: *Ausbreitungsverhalten von Ultraschallimpulsen in Beton und Schlussfolgerungen für die zerstörungsfreie Prüfung*. Dissertation Technische Universität Dresden, 1999.
- [56] Schultz, H.-J.: *Aktuelle Geräteliste der DEGUM, AK Ultraschallsysteme der DEGUM*. E. Fröhlich, H. Weiss, Sektion Innere Medizin der DEGUM; H. Strunk, Sektion Radiologie der DEGUM. In: Ultraschall in der Medizin. Thieme-Verlag, 2003.
- [57] Scotchlite 3M Firmenschrift: *Das Prinzip der Retroreflexion*. Produktinformation 2000.
- [58] Shevaldykin, V. G.; Samokrutov, A. A.; Kozlov, V. N.: *Ultrasonic Low-Frequency Short-Pulse Transducers with Dry Point Contact*. In: Proceedings of Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE), 16.-19.9.2003 in Berlin.
- [59] Stauch, G.; Köhler, B.; Schamlott, A.: *Wirkung des Innenwiderstandes von Ultraschallgeräten auf Form und Bandbreite des im Ultraschallsensor (Prüfkopf) erzeugten Schalldrucksignals*. Z. Acustica. Vol 77. 1992, S. 63-73.
- [60] Stibel, Ch.; Würtz, T.; Janocha, H.: *Leistungsverstärker für piezoelektrische Aktoren*. Z. Elektronik. 2001, Nr. 12, S. 82-88.
- [61] Supertex Firmenschrift: *Databook 1998-1999*. 1235 Bordeaux Drive Sunnyvale, CA 94089. <http://www.supertex.com>

- [62] Thiel, R.: *Elektrisches Messen nichtelektrischer Größen*. 2. Aufl. Stuttgart: Teubner-Verlag, 1983.
- [63] Tietze, U.; Schenk, Ch.: *Halbleiterschaltungstechnik*. 10. Aufl. Berlin: Springer-Verlag, 1993.
- [64] Tränkler, H.-R.; Obermeier, E.: *Sensortechnik*. 1. Edition, Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1998.
- [65] Veit, I.: *Technische Akustik*. 5. Aufl. Würzburg: Vogel-Verlag, 1996.
- [66] Weber, R.; Tegelaar, R.; Schwara, H.; Soller, R.: *Guter Beton*. 17. Aufl. Düsseldorf: Beton-Verlag, 1991.
- [67] Wüstenberg, H.; Just, T.; Möhrle, W.; Kutzner, J.: *Zur Bedeutung fokussierender Prüfköpfe für die Ultraschallprüfung von Schweißnähten mit austenitischem Gefüge*. Z. Materialprüfung 19 (1977) Nr. 7, Juli 1977.
- [68] Wüstenberg, H.: *Möglichkeiten und Konzepte für Ultraschall-Prüfköpfe speziell für das Bauwesen*. In: DGZfP (Hrsg.); Internationales Symposium Zerstörungsfreie Prüfung im Bauwesen, 27.2. - 1.3.1991 in Berlin, Tagungsbericht Teil 2, S. 488-504.
- [69] Wüstenberg, H.; Schenk, G.: *Entwicklungen und Trends bei der Anwendung von steuerbaren Schallfeldern in der ZfP mit Ultraschall*. In: DGZfP-Jahrestagung Mai 2003 in Mainz, DGZfP-Berichtsband, Berlin, 2003.
- [70] Wüstenberg, H.: *Zerstörungsfreie Werkstoffprüfung*. Skriptum zur Vorlesung. TU Berlin. Fakultät Verkehrs- und Maschinensysteme, Institut für Werkstofftechnik, Zerstörungsfreie Prüfung, 2004.