

Dipl.-Ing. Boris Gräfe

**Luftgekoppeltes
Ultraschallecho-Verfahren
für Betonbauteile**

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

Impressum

**Luftgekoppeltes Ultraschallecho-Verfahren
für Betonbauteile**

2009

Herausgeber:

BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung

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 © 2009 by

BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung

Layout: BAM-Arbeitsgruppe Z.64

ISSN 1613-4249

ISBN 978-3-9812354-4-9

Luftgekoppeltes Ultraschallecho-Verfahren für Betonbauteile

vorgelegt von
Dipl.-Ing. Boris Gräfe
aus Berlin

von der Fakultät VI - Planen Bauen Umwelt
der Technischen Universität Berlin
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften
(Dr.-Ing.)

Genehmigte Dissertation

Promotionsausschuss:

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr. sc. techn. Mike Schlaich
Gutachter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Bernd Hillemeier
Gutachter: Prof. u. Dir. Dr. rer. nat. Herbert Wiggenhauser
Gutachter: Dr. rer. nat. Martin Krause

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 6. Juni 2008

Berlin 2008

D83

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	1
Abstract	1
1 Einleitung.....	3
2 Grundlagen zum Ultraschallecho-Verfahren.....	6
2.1 Ultraschall allgemein	6
2.2 Wellenarten	6
2.3 Schallgeschwindigkeit und Schnelle.....	7
2.4 Reflexion und Transmission	8
2.5 Wellenausbreitung eines Ultraschallwandlers bei direkter Ankopplung an einem homogenen isotropen Material	11
2.6 Prüfkopfanordnungen	13
2.7 Theoretische Bestimmung des Laufweges und der Laufzeit	14
2.8 Zeitliche Mittelung.....	16
2.9 Flächiges Messen, Darstellungsarten.....	16
2.10 Synthetic Aperture Focusing Technique (SAFT)	16
2.11 Common-Midpoint (CMP) und Geschwindigkeitsspektrum.....	18
2.11.1 Stapelung.....	20
2.11.2 Wellenlängenänderung durch NMO-Korrektur	20
2.11.3 Geschwindigkeitsspektrum	20
2.11.4 Reflektortiefe	20
2.11.5 Vereinfachung zur bistatischen Prüfkopfanordnung	21
3 Stand der Technik	22
3.1 Ultraschall	22
3.2 Ultraschall für Beton.....	22
3.3 ACU-Prüfköpfe.....	25
3.3.1 Bauweisen von ACU-Prüfköpfen	25
3.3.2 Intensitätsverluste bei luftgekoppeltem Ultraschall.....	26
3.3.3 Fokussierende ACU-Prüfköpfe.....	27
3.3.4 Verwendung von Chirp-Signalen	27

3.4	Stand der Technik berührungsloser Ultraschall-Verfahren	27
3.4.1	Luftgekoppelte Transmissionsmessungen	28
3.4.2	Luftgekoppeltes Ultraschallecho	29
3.5	Fazit.....	31
4	Messapparaturen, Messunsicherheiten und Allgemeines zur Ergebnisdarstellung	35
4.1	Allgemeiner Aufbau einer Luftultraschallapparatur	35
4.2	Verwendete Messapparaturen und Auswertesoftware	35
4.2.1	Messapparatur „Manuell“ und „LVIB“	36
4.2.2	Messapparatur „Luftscanner“	39
4.3	Messunsicherheiten.....	44
4.3.1	Allgemeines	44
4.3.2	Luftultraschalltypische Messunsicherheiten	45
4.4	Begriffserläuterungen und Allgemeines zur Ergebnisdarstellung	54
4.4.1	Einfallswinkel	54
4.4.2	Wechselspannungssignal und Einhüllende über die Hilbert-Transformation	54
4.4.3	Intensitätsgraphen und Farbskala.....	54
4.4.4	Laufzeit	55
4.4.5	Bezug des Prüfkopfaufbaus zur x-Achse	56
5	Voruntersuchungen an einer Plexiglasplatte	57
5.1	Einleitung.....	57
5.2	Mittenfrequenz und Pulsform	57
5.3	Bistatische Messungen an Plexiglas mit Laservibrometer.....	59
5.3.1	Messaufbau	59
5.3.2	Bearbeitung und Auswertung der Messdaten	61
5.3.3	Fazit.....	72
5.4	Bistatische Messungen an Plexiglas mit zwei luftgekoppelten Prüfköpfen.....	72
5.4.1	Einleitung.....	72
5.4.2	Messaufbau	72
5.4.3	Messergebnisse	74
5.4.4	Fazit.....	76

5.5	Einfluss des Prüfkopfabstandes zur Körperoberfläche	76
5.5.1	Einleitung	76
5.5.2	Prüfkopfabstand bei senkrechter Einschallung in Transmission	77
5.5.3	Prüfkopfabstand bei der Tandemanordnung an Beton.....	80
5.5.4	Fazit.....	82
6	Nachweis von Rückwandechos in Betonbauteilen mit luftgekoppeltem Ultraschall	83
6.1	Bistatische Messung an 210 mm Beton	83
6.1.1	Messaufbau	83
6.1.2	Messergebnisse	83
6.1.3	Diskussion der Ergebnisse	86
6.1.4	Fazit.....	87
6.2	Modellierung der Wellenausbreitung von luftgekoppeltem Ultraschall in einer Betonplatte	87
6.2.1	Modellbeschreibung.....	87
6.2.2	Ergebnisse der Modellierung	88
6.2.3	Fazit.....	91
6.3	Eliminierung der Kriech- und Rayleighwelle	91
6.3.1	Bistatische Messung an 200 mm dicker Betonplatte mit Nut auf Vorderseite	91
6.3.2	Fazit.....	93
6.4	Messung in Tandemanordnung an einer Betonplatte mit Nuten auf der Rückseite.....	93
6.4.1	Messaufbau	93
6.4.2	Messergebnisse	94
6.4.3	Fazit.....	95
7	Visualisierung der Wellenausbreitung in Beton	96
7.1	Experimentelle Visualisierungen der Wellenausbreitung mit einem Laservibrometer	96
7.1.1	Wellenausbreitung bei senkrechter Einschallung mit einem luftgekoppelten Ultraschallprüfkopf.....	97
7.1.2	Wellenausbreitung bei Anregung mit einem Normalprüfkopf mit Plexiglaskeil	98
7.1.3	Wellenausbreitung bei schräger Einschallung unter 3° mit einem luftgekoppeltem Ultraschallprüfkopf	100

8	Automatisierte Messungen mit Scanner	102
8.1	Beschreibung des Betonprobekörpers.....	102
8.2	Einfluss des Einfallswinkels auf die Wellenausbreitung in einer Betonplatte	103
8.2.1	Messaufbau	103
8.2.2	Auswertung und Darstellung der Messergebnisse	105
8.2.3	Folgerung und weitere Erkenntnisse.....	108
8.2.4	Fazit.....	108
8.3	Flächige Messungen mit Tandemanordnung	109
8.3.1	Messaufbau	109
8.3.2	Darstellung und Auswertung der Messergebnisse	110
8.3.3	Fazit.....	116
8.4	Konzepte zur Verbesserung des Systems	117
8.4.1	Optimale Prüfkopfanordnung	117
8.4.2	Prüfköpfe.....	117
8.4.3	Methoden zur Rayleighwellenunterdrückung.....	118
8.4.4	Laufwagen für Kalibrierung und Vorlaufzeit	119
8.4.5	Verbesserte Abschirmkonstruktion zur Luftschallunterdrückung	119
8.4.6	Messzeit	120
9	Zusammenfassung.....	122
	Danksagung	126
	Abkürzungen	127
	Mathematische Symbole	128
	Literaturverzeichnis	130
	Eigene Veröffentlichungen	138

Anhang

A.1	Signalbearbeitungs- und Auswerteprogramm „US-Analyse“	A-1
A.1.1	Programmiersprache LabVIEW	A-1
A.1.2	Kurzbeschreibung und Leistungsumfang von „US-Analyse“	A-1
A.1.3	Unterdrückung von Wellenzügen in B-Bildern	A-4
A.2	Weitere Wellenfrontbilder der Modellierung	A-7
A.3	Weitere Messergebnisse zu Abschnitt 8.2	A-11
A.4	Fehlerfortpflanzung – Berechnung der kombinierten Standardunsicherheit	A-16
A.4.1	Modellfunktion	A-16
A.4.2	Eingangsgrößen und Unsicherheiten	A-17
A.4.3	Partielle Ableitungen der Modellfunktion	A-18
A.4.4	Berechnung der kombinierten Standardunsicherheit	A-19
A.4.5	Ergebnis	A-20

Kurzfassung

Die Notwendigkeit und Nachfrage von zerstörungsfreien Prüfverfahren für Beton, die schnell scannend automatisiert große Messflächen abtasten können, wird zunehmend größer. Ein großes Potential bietet das Ultraschallecho-Verfahren, mit dem sich eine Vielzahl von baupraktischen Fragestellungen bei der Überprüfung des Bauwerkszustandes beantworten lassen. Durch Verwendung luftgekoppelter Ultraschallprüfköpfe (ACU-Prüfköpfen), die berührungslos über das zu untersuchende Betonbauteil geführt werden, könnte dieses Ziel erreicht werden.

In der vorliegenden Arbeit wird die Machbarkeit von luftgekoppeltem Ultraschallecho (ACU-Echo) an Betonbauteilen von 20 cm Dicke gezeigt. Um den Einfluss der Parameter auf die Wellenausbreitung zu studieren, werden experimentelle Untersuchungen von ACU-Echo an speziellen Plexiglas- und Betonprobekörpern durchgeführt. Dabei kommt auf der Empfangsseite auch ein Laservibrometer zum Einsatz. Mit dessen Hilfe wird die Wellenausbreitung des eingetragenen Luftultraschalls im Beton visualisiert. Durch eine besondere digitale Signalbearbeitung können verschiedene Wellenarten voneinander getrennt und interpretiert werden. Mit den gewonnenen Ergebnissen wird ein Scanner für ACU-Echo-Messungen aufgebaut, mit dem weitere wesentliche Erkenntnisse gewonnen werden und ein erstes praxisorientiertes Anwendungsbeispiel demonstriert wird.

Abstract

The necessity and demand for non-destructive testing of concrete which is able to automatically scan huge pieces of concrete is increasing. Ultrasonic echo offers excellent potential for answering a huge number of questions concerning the practical field of construction at testing the condition of the work. This could be achieved in using air-coupled ultrasonic (ACU) transducers which are led above the tested pieces of concrete without touching them.

The following work shows the feasibility of ACU echo on pieces of concrete of 20 cm thickness. In order to learn more about the influence of the parameters on the wave propagation, experimental research of ACU echo on special specimens of Plexiglas and concrete are carried out. A laser vibrometer on the receiving side is also being used. With its help, one can see the propagation of the waves of the induced ACU in concrete. In using a special digital signal processing, you can separate different kinds of waves and interpret them. These results can help in having a scanner for measurements of ACU echo. You get more important information with this scanner. It is the first example to use in practice.

1 Einleitung

Stand in den letzten Jahrzehnten in der deutschen Bauwirtschaft noch die Errichtung von Bauwerken im Vordergrund, gewinnt nun zunehmend die Zustandsbewertung der bestehenden Bausubstanz an Bedeutung, um letztendlich eine Verlängerung der Bauwerkslebenszeit zu erreichen und Kosten einzusparen. Auch während des Baus kommt der Qualitätssicherung eine immer wichtigere Rolle zu. Dafür werden Prüfverfahren erforderlich, die einen Blick in das Innere von Bauteilen geben, ohne das Bauwerk beschädigen zu müssen. Der dazu anfallende Aufwand muss dem jeweiligen Problem in einem vertretbaren Maße gegenüberstehen.

Man unterscheidet je nach Eingriff in das zu untersuchende Objekt zwischen zerstörenden, zerstörungswarmen und zerstörungsfreien Prüfverfahren. Zu den zerstörenden Prüfverfahren zählt z.B. die Bohrkernentnahme. Da sie zusätzlich zu ihrer zerstörenden Wirkung nur einen lokal beschränkten Einblick in das Bauteilinnere liefert, sollte sie möglichst vermieden werden. Zu den zerstörungsfreien Prüfverfahren (ZfP-Verfahren), die keine Beschädigung des Bauteils bewirken, gehören z.B. akustische Verfahren, wie der Rückprallhammer (Schmidt-Hammer), low-strain (Hammerschlag-Methode), Impakt-Echo und Ultraschall. Hinzu kommen die elektromagnetischen-Verfahren, wie Wirbelstrom, Mikrowellen, Radar, Thermographie [36], Röntgen und Gamma-Strahlung, aber auch das magnetische Streufeldverfahren (Magnetremanenz) zur Spanndrahtbruchortung ([72],[37],[71]) und das elektrochemische Potentialfeld-Messverfahren zur Messung der Korrosionsaktivität der Bewehrung. Eine umfassende Übersicht und Beschreibung der ZfP-Verfahren im Bauwesen findet sich im ZfPBau-Kompendium ([73],[98]). Die Wahl des Verfahrens richtet sich nach der Prüfaufgabe. Gegebenenfalls können auch zwei oder mehr Verfahren kombiniert werden.

Als ZfP-Verfahren für Beton am Bauwerk ist in Deutschland bisher nur der Rückprallhammer nach Schmidt zur Abschätzung der Betondruckfestigkeit in die DIN 1048-2 [16] und DIN 1048-4 [17] (beide Juni 1991), sowie seit Dezember 2001 in die DIN EN 12504-2 [18] aufgenommen worden.

Die Anwendung von ZfP-Verfahren an Beton beschränkt sich in der Praxis größtenteils auf den Rückprallhammer, das einfache Abklopfen von Oberflächen mit einem herkömmlichen Hammer zum Auffinden von oberflächennahen Hohlräumen, Kiesnestern und Ablösungen sowie Bewehrungssuchgeräten über Wirbelstrom oder Radar. Ultraschall wird in der Praxis trotz seiner geeigneten physikalischen Eigenschaften nur selten und zumeist manuell an einzelnen Stellen eines Bauwerkes eingesetzt. Automatisierte Ultraschallmessungen werden in der Regel im Rahmen von wissenschaftlichen Untersuchungen durchgeführt [95].

Hingegen wird in anderen Bereichen außerhalb des Betonbaus die routinemäßige Untersuchung mit Ultraschall schon seit längerem praktiziert. So gehört z.B. Ultraschall im Metallbereich bei der Schweißnahtprüfung und in der Medizin zur Untersuchung des im Mutterleib heranwachsenden Kindes zum Alltag.

Die Ultraschallprüfung im Betonbau wird aber aller Voraussicht nach in Zukunft verstärkt eingesetzt werden - lassen sich doch mit ihr je nach Werkstoff, Geometrie und Zustand des Bauteils Aussagen über die Bauteildicke und die innere Struktur treffen. So ist es z.B. möglich Lufteinschlüsse, Ablösungen, Kiesnester, Bewehrung,

Spannglieder, Anker, etc. in einem Betonbauteil zu orten. Auch Aussagen über die Qualität des Betons können gemacht werden.

In den letzten paar Jahren wurde durch die Entwicklung von koppelmittelfreien Punktkontaktprüfköpfen die Möglichkeit geschaffen, das Ultraschall-Verfahren an Beton auch automatisiert scannend zu betreiben, wodurch wesentlich größere Messflächen als bei einer manuellen Messung untersucht werden können. Dazu wird der Prüfkopf statt sonst per Hand mit Hilfe eines Scanners auf die Betonoberfläche pneumatisch gedrückt. Es wird gemessen, der Prüfkopf wieder abgehoben und zum nächsten Messpunkt verfahren, wo er erneut angedrückt wird, usw. Derartige Messungen wurden seit 2004 z.B. an Stegen, Decken und Fahrbahnen von Spannbetonbrücken von der „Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung“ (BAM) umfangreich in Kombination mit Radar und Impakt-Echo durchgeführt (siehe z.B. [92]). Im Rahmen der DFG (Deutsche Forschungsgemeinschaft) Forschergruppe FOR 384 („Zerstörungsfreie Strukturbestimmung von Betonbauteilen mit akustischen und elektromagnetischen Echo-Verfahren“) konnten dadurch wesentliche Erfolge bezüglich der Spannkanalortung und der Aussage des Verpresszustandes verzeichnet werden. Die Messgeschwindigkeit liegt derzeit bei $\sim 2,5$ s/Messpunkt bzw. $0,6$ m²/h bei einem Messraster von 2 cm. Die Messzeit lässt sich zwar noch weiter reduzieren, indem mehrere Prüfköpfe parallel messen, aber der wesentliche Zeitverlust für das Andrücken und Abheben des Prüfkopfes bleibt weiterhin bestehen.

Das Problem lässt sich umgehen, indem man Prüfköpfe verwendet, die über Luft angekoppelt werden, also berührungslos arbeiten. Man bezeichnet sie als luftgekoppelte Ultraschallprüfköpfe (engl. air-coupled ultrasonic (ACU) transducer oder non-contact ultrasonic (NCU) transducer) oder auch einfach als Luftultraschallprüfköpfe. Diese können kontinuierlich scannend über die Messfläche bewegt werden. Limitierend für die Messgeschwindigkeit von ACU ist dabei die Wiederholfrequenz des Pulses. Dadurch werden Messgeschwindigkeiten von ca. 20 bis 80 Messpunkte/s an Beton möglich. Dies bedeutet eine 50 bis 200-fach höhere Messgeschwindigkeit gegenüber bisherigen Ultraschallecho-Systemen für Betonbauteile.

Luftgekoppelte Ultraschallprüfköpfe, die genügend Schalldruck für die Anwendung an Beton liefern, gibt es allerdings erst seit 1997. Transmissionsmessungen, bei denen das Objekt zwischen Sende- und Empfangsprüfkopf steht, funktionieren trotz der enormen Schalldruckverluste an den Grenzflächen Luft/Beton und Beton/Luft mittlerweile gut. Baupraktisch interessanter ist jedoch die Echo-Messung, da bei dieser Prüfkopfanordnung nur die einseitige Zugänglichkeit des Bauteils gewährleistet sein muss. Sende- und Empfangsprüfkopf befinden sich dabei auf derselben Bauteilseite. Zu der Anwendung von luftgekoppeltem Ultraschallecho an Beton existieren bisher allerdings noch keine systematischen Untersuchungen. Dies liegt vor allem an der Empfindlichkeit und Komplexität des Verfahrens. So entstehen je nach Einfallswinkel der Prüfköpfe an den Grenzflächen Luft/Beton unterschiedliche Wellenarten, die miteinander interferieren. Auch aufgrund der enormen Schalldruckverluste galt die Anwendung von luftgekoppeltem Ultraschallecho an Beton deshalb als nicht machbar. So war unklar, ob überhaupt genug Schall aus dem Inneren eines Betonbauteils zurück zum Empfänger reflektiert wird.

Der in den letzten Jahren gemachte Fortschritt in der Luftultraschallprüfkopftechnik sowie das seit jeher allgemein bestehende Ziel, ein schnell scannendes automatisiertes

Ultraschallmesssystem für große, nur einseitig zugängliche Betonbauteile zu entwickeln, waren letztendlich die Motivation für die vorliegende Arbeit.

Thema dieser Dissertation ist hauptsächlich die grundlegende Untersuchung der Machbarkeit des luftgekoppelten Ultraschallecho-Verfahrens an Betonbauteilen.

Die vorliegende Arbeit gliedert sich wie folgt:

Zunächst wird nach einer Einführung der Grundlagen zum Ultraschallecho-Verfahren in Abschnitt 2 der aktuelle Stand der Technik in Abschnitt 3 dargestellt.

Im darauf folgenden Abschnitt 4 werden die für die Untersuchungen verwendeten Messapparaturen und die Auswertesoftware beschrieben. Außerdem wird auf die luftultraschalltypischen Messunsicherheiten eingegangen und Begriffserläuterungen und Allgemeines zur Ergebnisdarstellung gegeben.

Abschnitt 5 zeigt die wesentlichen Voruntersuchungen an einer Plexiglasplatte, mit Hilfe derer wichtige Erfahrungen und Präzisierungen für die geplanten Messungen an Beton gefunden werden. Die digitalen Bearbeitungsschritte und das allgemeine Vorgehen bei der Datenauswertung werden ausführlich erläutert.

Der entscheidende Nachweis von Rückwandechos in Betonbauteilen mit luftgekoppeltem Ultraschall wird über unterschiedliche Herangehensweisen in Abschnitt 6 erbracht.

Zur weiteren Unterstützung der in Abschnitt 6 gemachten Messungen und Berechnungen sowie zur besseren Veranschaulichung wird in Abschnitt 7 eine Visualisierung der Wellenausbreitung in Beton mit Hilfe eines Laservibrometers gezeigt.

Die gewonnenen Erkenntnisse der vorangehenden Abschnitte werden dazu verwendet eine Scannerapparatur aufzubauen, die in Abschnitt 4 beschrieben wurde. Mit dieser werden in Abschnitt 8 automatisierte Messungen an Beton durchgeführt. Dabei führen weitere wesentliche Erkenntnisse zu einem verbesserten Tandemaufbau. Mit diesem gelingt über eine flächige Messung an einer 200 mm dicken Betonplatte mit geneigter Längsbohrung eine eindeutige und klare akustische Abbildung der Rückwand und der Bohrung. Außerdem werden Konzepte zur Verbesserung des Systems vorgestellt.

Die gewonnenen Ergebnisse werden in Abschnitt 9 zusammengefasst und es wird ein Ausblick gegeben.

2 Grundlagen zum Ultraschallecho-Verfahren

2.1 Ultraschall allgemein

Schall ist eine elastische Welle, bei der benachbarte Teilchen um ihre Gleichgewichtslage schwingen. Als Ultraschall bezeichnet man denjenigen Schall, der oberhalb der hörbaren Schallgrenze von ca. 16 kHz liegt.

Erzeugen und messen kann man Ultraschallwellen mit Prüfköpfen. Sie bestehen z.B. aus einem piezoelektrischen Material, um mechanischen Druck (Schalldruck) p in eine elektrische Spannung U umzuformen bzw. umgekehrt [52].

Manchmal ist statt dem Schalldruck p auch die Intensität J (Schalleistungsdichte in W/m^2) von Interesse. Sie ist bei ebenen Wellen und Kugelwellen die Energie pro Zeit und Fläche und ist proportional zum Quadrat des Schalldrucks [52].

$$J = \frac{p^2}{2Z} \quad \text{Gl. 2.1}$$

Z ist dabei die akustische Impedanz (Schallwellenwiderstand) des Materials und ist im grenzenlosen Raum definiert als das Produkt aus der Dichte ρ und der Schallgeschwindigkeit c .

$$Z = \rho \cdot c \quad \text{Gl. 2.2}$$

Die Kenntnis der akustischen Impedanz spielt eine wesentliche Rolle bei der Wellenausbreitung an Grenzschichten zweier Materialien.

In der Ultraschalltechnik wird gerne das Dezibelmaß in dB verwendet, um stark unterschiedliche Amplitudenwerte A_1 und A_2 besser miteinander vergleichen zu können [52]. Es gilt:

$$\text{Dezibelmaß} = 20 \lg \left(\frac{A_1}{A_2} \right) \text{dB} \quad \text{und} \quad \text{Gl. 2.3}$$

$$\frac{A_1}{A_2} = 10^{\left(\frac{\text{Dezibelmaß}}{20} \right)} \quad \text{Gl. 2.4}$$

2.2 Wellenarten

In einem homogenen isotropen unendlich ausgedehnten Raum gibt es nur zwei voneinander unabhängige Wellenarten: die Longitudinalwelle und die Transversalwelle. Die Longitudinalwelle L ist die schnellste Welle, bei ihr schwingen die Teilchen in Ausbreitungsrichtung der Welle (auch Druckwelle, Kompressionswelle, Primärwelle). Bei der Transversalwelle T (Scherwelle, Sekundärwelle) schwingen die Teilchen senkrecht zur Ausbreitungsrichtung. In Gasen und in der Regel auch in Flüssigkeiten können nur Longitudinalwellen auftreten, da die Teilchen nicht miteinander verbunden sind und deshalb keine Scherspannungen übertragen werden können.

Bei begrenzten Körpern, mit denen wir es in der Realität zu tun haben, treten je nach Geometrie eine Reihe weiterer Wellenarten auf, die aber immer nur Kombinationen der beiden Grundwellenarten darstellen.

So können an den Oberflächen von Körpern zusätzlich Rayleighwellen R (Oberflächenwellen) entstehen. Die Teilchen bewegen sich auf elliptischen Bahnen. Ihre Amplitude ist an der Oberfläche am größten und nimmt mit zunehmendem Abstand von der Oberfläche exponentiell ab. Die Eindringtiefe der Rayleighwelle ist von der Größenordnung einer Wellenlänge ([52] S. 36). In Ausbreitungsrichtung r nimmt die Amplitude der Rayleighwelle A_R proportional mit $(k_R \cdot r)^{-0,5}$ ab ([70] S. 97):

$$A_R \sim \frac{1}{\sqrt{(k_R \cdot r)}} \quad \text{Gl. 2.5}$$

Dabei ist $k_R = 2\pi / \lambda_R$ die Wellenzahl der Rayleighwelle mit der Wellenlänge der Rayleighwelle λ_R . Die Entstehung von Rayleighwellen wird in Abbildung 2.2 (d) erläutert.

Ebenfalls können unter bestimmten Umständen an Oberflächen noch (Longitudinal-) Kriechwellen K auftreten, von denen sich dann ins Bauteilinnere hinein Kopfwellen H abspalten. In Abbildung 2.2 (b) wird auf die Entstehung und Ausbreitung beider Wellen näher eingegangen.

Ist die Dicke d eines Bauteiles in mindestens einer Richtung in der Größenordnung der Wellenlänge λ oder kleiner, so spricht man im akustischen Sinne von einem dünnen Bauteil und es treten statt der Longitudinal- und Transversalwelle nur noch Kombinationen dieser beiden Wellenarten auf, welche recht kompliziert sein können. So werden z.B. Oberflächenwellen auf dünnen Platten gestört und verändern sich zu Lamb-Wellen ([52] S. 37). Lamb-Wellen sind dispersiv, das heißt, dass ihre Phasengeschwindigkeiten frequenzabhängig sind. Die Schallgeschwindigkeit der Lamb-Welle ist außer vom Werkstoff auch noch vom Produkt aus Plattendicke und Frequenz und der zu betrachtenden Mode abhängig. Es gibt symmetrische und asymmetrische Lamb-Wellen beliebig vieler Ordnungen (Grund- und Oberwellen). Da die Untersuchungen in dieser Arbeit nur an akustisch dicken Bauteilen stattfinden, wird auf eine weitere Erläuterung der auftretenden Wellenarten in dünnen Bauteilen verzichtet und auf [52], [70] und [14] verwiesen. In Abschnitt 3.4 (Stand der Technik berührungsloser Ultraschall-Verfahren) wird noch genauer auf die Lamb-Wellen eingegangen werden.

2.3 Schallgeschwindigkeit und Schnelle

Die Schallgeschwindigkeit c (Phasengeschwindigkeit) ergibt sich aus dem Quotienten der Wellenlänge λ und der Periodendauer T bzw. aus dem Produkt von Wellenlänge λ und Frequenz f :

$$c = \frac{\lambda}{T} = \lambda \cdot f \quad \text{Gl. 2.6}$$

Sie ist nicht zu verwechseln mit der Teilchengeschwindigkeit, der sogenannten Schnelle v , welche die zeitliche Änderung der Teilchenauslenkung u ist:

$$v = \frac{du}{dt} \quad \text{Gl. 2.7}$$

Die Longitudinal- und Transversalwellengeschwindigkeit hängt ab von dem dynamischen Elastizitätsmodul E , der Dichte ρ und der Poisson-Zahl μ . Für die Longitudinalwellengeschwindigkeit c_L gilt ([52] S. 14):

$$c_L = \sqrt{\frac{E(1-\mu)}{\rho(1+\mu)(1-2\mu)}}. \quad \text{Gl. 2.8}$$

Die Transversalwellengeschwindigkeit c_T lässt sich bestimmen zu ([52] S. 14):

$$c_T = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\mu)}}, \quad \text{Gl. 2.9}$$

wobei G den Schubmodul bezeichnet.

Die Rayleighwelle ist etwas langsamer als die Transversalwelle. Näherungsweise beträgt ihre Geschwindigkeit ([52] S. 39):

$$c_R = \frac{0,87 + 1,12\mu}{1 + \mu} \cdot c_T. \quad \text{Gl. 2.10}$$

Die Schallgeschwindigkeit in Luft c_A ist abhängig von der Temperatur ϑ und minimal von der Luftfeuchtigkeit. Bei Vernachlässigung der Luftfeuchtigkeit bestimmt sie sich annähernd zu:

$$c_A = 331,4 \frac{m}{s} \cdot \sqrt{1 + \frac{\vartheta}{273,15^\circ C}}. \quad \text{Gl. 2.11}$$

2.4 Reflexion und Transmission

Trifft eine Welle auf eine Grenzfläche zweier Medien unterschiedlicher Impedanz, so wird ein Teil reflektiert (Reflexion) und ein Teil geht hindurch (Transmission, Brechung). Der resultierende Schalldruck der reflektierten und der durchgehenden Welle ergibt sich aus dem Schalldruck der in Medium 1 einfallenden Welle multipliziert mit einem Reflexionsfaktor R_p bzw. Transmissionsfaktor T_p . Bei einer senkrecht auf eine Grenzfläche einfallenden ebenen Welle in Medium 1 auf eine Grenzfläche zu Medium 2 sind sie gegeben durch [52]:

$$R_p = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad \text{Gl. 2.12}$$

$$T_p = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1}. \quad \text{Gl. 2.13}$$

Der Reflexionsfaktor und Transmissionsfaktor kann auch auf die Intensität J bezogen werden. Nach [70] berechnet sich der Reflektionsfaktor R_J und Transmissionsfaktor T_J zu:

$$R_J = \left(\frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \right)^2 \quad \text{Gl. 2.14}$$

$$T_J = \frac{4Z_1Z_2}{(Z_2 + Z_1)^2} \quad \text{Gl. 2.15}$$

Bei schrägem Welleneinfall einer ebenen Welle auf eine Grenzfläche unter einem Winkel α zum Lot der Grenzfläche (Einfallswinkel) werden die Ausdrücke komplizierter. Sie sind dann Funktionen der Winkel, Schallgeschwindigkeiten und akustischen Impedanzen. Die Herleitung und Lösung dieser Gleichungen (Zöppritz-Gleichungen) findet sich in [70] (siehe auch [11] und [52]).

Die Richtung der reflektierten und der durchgehenden Welle ergibt sich nach dem Brechungsgesetz von Snellius ([52] S. 24):

$$\frac{\sin(\alpha_I)}{\sin(\alpha_{II})} = \frac{c_I}{c_{II}} \quad \text{Gl. 2.16}$$

I und II sind dabei zwei ganz beliebige Wellen, die in einem Reflexions- oder Brechungsvorgang zusammenhängen und die Schallgeschwindigkeiten c_I und c_{II} haben (siehe Abbildung 2.1). Bei einer einfallenden Welle auf eine Grenzfläche kann Modenkonzersion (Wellenartenumwandlung, Modenwandel) auftreten. Longitudinalwellen können sich in Transversalwellen umwandeln und umgekehrt. Dies bedeutet, dass in Gl. 2.16 c_I bzw. c_{II} die Longitudinal-, Transversal- oder eine sonstige Wellengeschwindigkeit einer Wellenart sein kann.

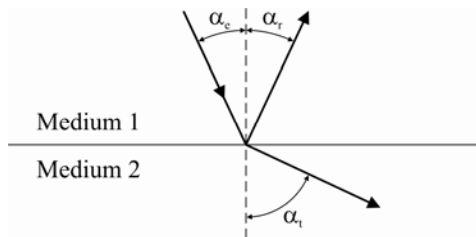


Abbildung 2.1

Vereinfachte Darstellung von Reflexion und Transmission einer ebenen Schallwelle an einer Grenzfläche. Index: e = einfallende, r = reflektierte und t = transmittierte Welle

Beim Ultraschall hat man es nicht mit ebenen unbegrenzten Wellen zu tun, sondern in der Regel mit mehr oder weniger begrenzten Schallbündeln, denen man nicht mehr einen einzelnen Einfallswinkel α_e wie in Abbildung 2.1 zuordnen kann. Vielmehr hat man es mit einem Winkelbereich zu tun, wodurch weitere Wellenarten auftreten.

Für die Anwendung von luftgekoppeltem Ultraschallecho an Beton ist die Modenkonzersion an der Grenzfläche Luft/Beton, Beton/Beton und Beton/Luft von Bedeutung. Im Folgenden sei sie für den Schallübergang von Luft zu Beton für die fünf zu unterscheidenden Winkelbereiche in Abbildung 2.2 nach dem Brechungsgesetz Gl. 2.16 mit maßstabsgetreuen Winkeln skizziert und erläutert ([52],[70]). Bei dem Übergang einer Schallwelle von Beton zu Luft verhält es sich genau umgekehrt. Die beiden kritischen Winkel (Grenzwinkel) von $\alpha_{1kr} = 5^\circ$ und $\alpha_{2kr} = 8,3^\circ$ ergeben

sich bei einer mittleren Schallgeschwindigkeit in Beton von $c_{L,Beton} = 4000$ m/s für die Longitudinalwelle und $c_{T,Beton} = 2400$ m/s für die Transversalwelle sowie einer Schallgeschwindigkeit in Luft von $c_A = 345$ m/s (bei $\vartheta = 23$ °C).

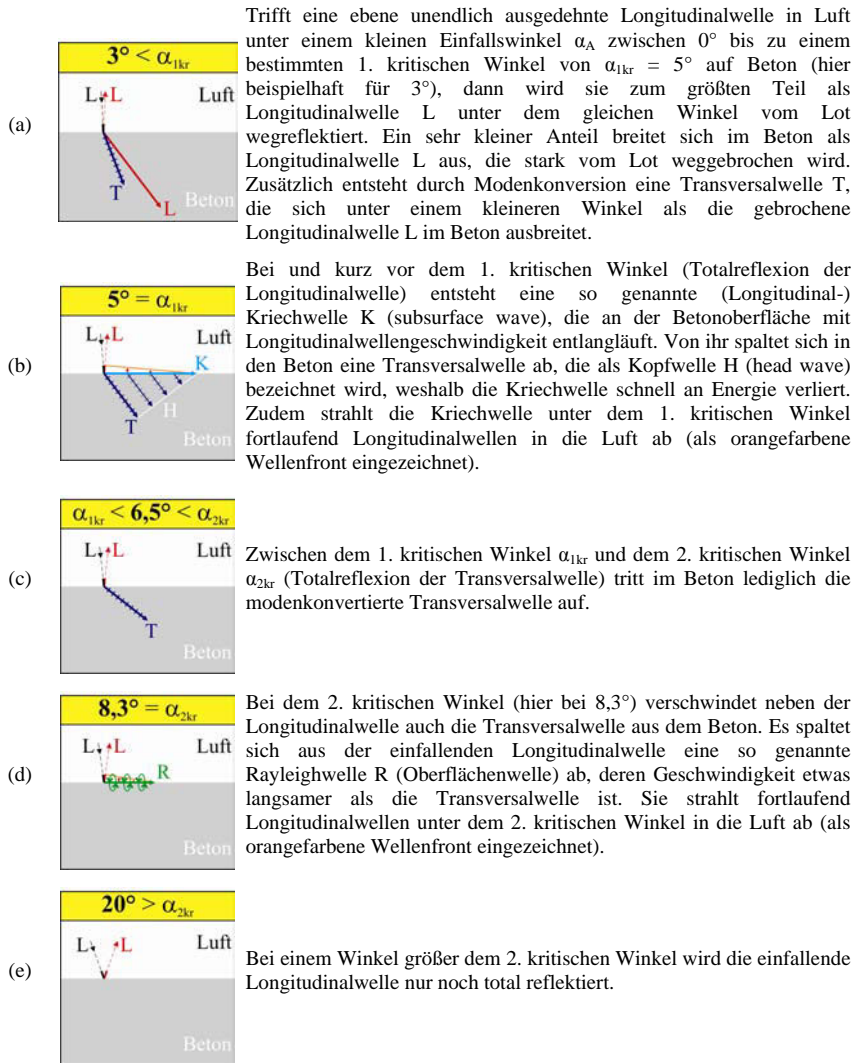


Abbildung 2.2

Strahlenmodell von Reflexion und Transmission einer ebenen Schallwelle an einer Grenzfläche Luft/Beton ([52],[70]); Die kritischen Winkel wurden beispielhaft für $c_A = 345$ m/s, $c_{L,Beton} = 4000$ m/s und $c_{T,Beton} = 2400$ m/s berechnet. Die Winkel sind maßstabsgerecht gezeichnet. Die Längen der dick gezeichneten Strahlen entsprechen der Schallgeschwindigkeit der Welle.

Betrachtet man die Reflexionsvorgänge innerhalb einer dicken Betonplatte ($d \gg \lambda$), so wird deren Darstellung als Strahlenmodell schnell unübersichtlich, da auch hier wieder an jeder Grenzfläche Modenkonversion auftritt. In Abbildung 2.3 sei dies beispielhaft für eine 3° schräg einfallende ebene Luftschallwelle auf eine Betonplatte mit $d \gg \lambda$ gemäß dem Fall in Abbildung 2.2 (a) als Strahlenmodell dargestellt. Ausführlichere Darstellungen der Wellenausbreitung finden sich in [52] und [70].

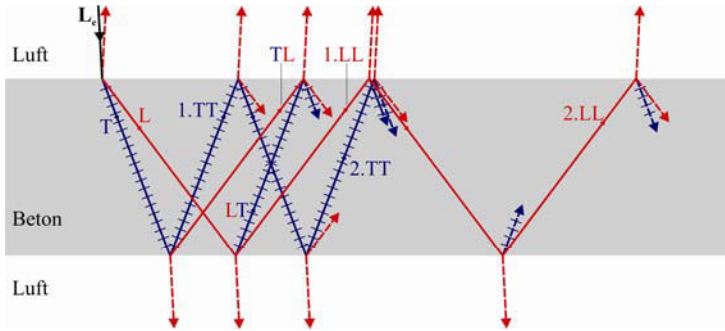


Abbildung 2.3

Schallstrahlenmodell zur Darstellung der auftretenden Reflexionen und Modenkonversionen in einer Betonplatte, die sich in Luft befindet; die einfallende ebene Luftwelle trifft in einem Winkel von 3° schräg auf die Betonplatte. Die Reihenfolge der Buchstaben in der Bezeichnung ist gleich der Reihenfolge der Reflexionen in der Platte, dabei bedeutet L = Longitudinalwelle und T = Transversalwelle; entsprechend ist TL die aus der Transversalwelle modenkonvertierte Longitudinalwelle, LT die aus der Longitudinalwelle modenkonvertierte Transversalwelle, 1.LL = LL = 1. Longitudinalwellenecho und 2.LL = LLLL = 2. Longitudinalwellenecho.

2.5 Wellenausbreitung eines Ultraschallwandlers bei direkter Ankopplung an einem homogenen isotropen Material

Zur Veranschaulichung der Wellenausbreitung eines Ultraschallwandlers, der an einem Körper aus homogenem isotropen Material angekoppelt ist, sind in Abbildung 2.4 vier Zeitschnitte einer 2D-EFIT-Modellierung (entnommen aus [55]) dargestellt. Der Körper weist zudem direkt unterhalb des Wandlers einen oberflächenparallelen Riss auf.

Die Wandlerfläche lässt sich als Summe von Punktquellen darstellen. Die Überlagerung der Punktschallfelder führt zu einer ebenen Longitudinalwelle unterhalb des Wandlers.

Durch die Begrenzung des Wandlers und der dadurch nur einseitigen Überlagerung der Punktschallfelder an den Wandlerrändern kommt es zu den nachfolgend beschriebenen Effekten.

Von den Wandlerrändern breiten sich halbkreisförmige Longitudinal- und Transversalwellen in das Material aus.

Außerdem werden an den Wandlerrändern Rayleighwellen R und Kriechwellen K erzeugt, die entlang der Körperoberfläche laufen.

Von der Kriechwelle K spaltet sich in das Bauteilinnere fortlaufend eine Transversalwelle ab, deren Wellenfront als Kopfwelle H bezeichnet wird.

Die durch die Kriech- und Rayleighwelle in die Luft abstrahlenden Longitudinalwellen sind hier nicht berücksichtigt, da sie sich nicht im Simulationsraum befinden. Sie würden aber auch wegen ihrer geringen Intensität ohne Skalierungsfaktor nicht zu erkennen sein.

An dem Riss wird die Longitudinalwelle total reflektiert (siehe Abbildung 2.4 (c)).

Erreicht die Longitudinalwelle die Ränder des Risses, so wirken die Ränder selbst wie Punktquellen, von denen sich kreisförmig Wellen ausbreiten – Man spricht hier auch von Beugung der Welle an den Rissrändern.

Für nachfolgende Wellen, wie z.B. der Transversalwelle finden diese Vorgänge an dem Riss ebenfalls statt, was zu zahlreichen Wellenüberlagerungen führt.

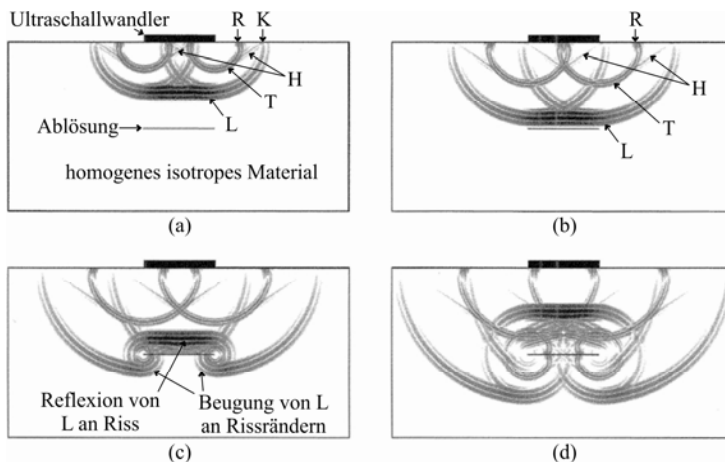


Abbildung 2.4 Wellenausbreitung (2D-EFIT-Modellierung) in Form von vier Zeitschnitten (a), (b), (c) und (d) in einem homogenen isotropen Material angeregt durch einen Ultraschallwandler; Bilder sind entnommen aus ([55] S. 525) von Langenberg, K. J., Mayer, K. und Marklein, R.

Betrachtet man als Festkörper Beton, so führt dessen Inhomogenität zu einem verrauschten Untergrund in den Empfangssignalen, den man als Kornrauschen bezeichnet. Der verrauschte Untergrund entsteht durch die zahlreichen Reflexionen und Beugungen an den Korngrenzen. Um das Kornrauschen gering zu halten, bedient man sich bei der Ultraschallprüfung an Beton niedriger Ultraschallfrequenzen von 20 kHz bis 200 kHz. Niedrige Frequenzen führen allerdings nachteiligerweise zu einer geringen Zeitauflösung und damit geringen Tiefenauflösung, so dass es gilt, den richtigen Kompromiss zu finden.

Das Wellenfeld in einem schubspannungsfreien Medium, wie z.B. das eines luftgekoppelten Ultraschallprüfkopfes in Luft, ist wesentlich einfacher, da sich lediglich die Longitudinalwellen L ausbreiten können, deren Form dieselbe ist wie die in Abbildung 2.4 (a). Trifft diese Welle dann allerdings auf einen Festkörper wie Beton, so entstehen wiederum alle anderen Wellenarten, die in Abbildung 2.4 auch auftauchen.

Die Untersuchung der Wellenausbreitung in Beton bei Anregung über luftgekoppelten Ultraschall ist ein wesentlicher Bestandteil der vorliegenden Arbeit. Eine entsprechende 2D-EFIT-Modellierung findet sich in Abschnitt 6.2.

2.6 Prüfkopfanordnungen

Das Ultraschallverfahren bietet verschiedene Möglichkeiten der Prüfkopfanordnung. In dieser Arbeit werden vier verschiedene Anordnungen verwendet, die in Abbildung 2.5 dargestellt und bezeichnet sind.

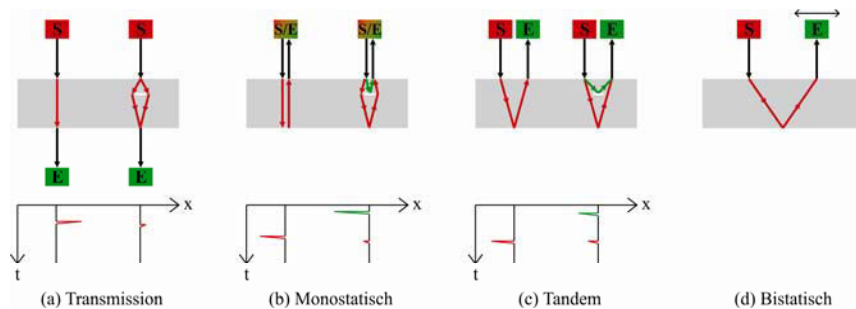


Abbildung 2.5 Unterschiedliche Prüfkopfanordnungen beim Ultraschall-Verfahren: Transmission (a), Monostatisch (b), Tandem (c) und Bistatisch (d)

Bei der Transmissionsanordnung (Durchschallung) stehen sich Sender und Empfänger gegenüber, wobei der zu untersuchende Körper dazwischen liegt. Eine Fehlstelle wird durch seine abschattende Wirkung auf den Schall und eventuell durch eine Laufzeitverzögerung registriert (Abbildung 2.5 (a)). Das Bauteil muss bei dieser Prüfkopfanordnung allerdings von beiden Seiten zugänglich sein und die Tiefe der Fehlstelle ist nicht bestimmbar.

Im Unterschied zur Transmissionsanordnung gibt es verschiedene Echoanordnungen, bei denen sich Sender und Empfänger auf derselben Bauteilseite befinden.

Sind Sender und Empfänger physikalisch identisch, so spricht man von einer monostatischen Prüfkopfanordnung oder Impuls-Echo (IE) (Abbildung 2.5 (b)).

Wird die Messoberfläche mit getrenntem Sende- und Empfangsprüfkopf mit gleich bleibendem Abstand zueinander abgescannt, so nennt man die Anordnung Tandem (Abbildung 2.5 (c)).

Bei der bistatischen Anordnung wird nur einer der beiden Prüfköpfe von Messpunkt zu Messpunkt bewegt, während der andere Prüfkopf an ein und derselben Stelle bleibt.

Bei der Echoanordnung lässt sich aus der gemessenen Laufzeit t durch Abtasten der Bauteiloberfläche bei bekannter Schallgeschwindigkeit c die Tiefe d eines Reflektors bestimmen. Da der Schall das Bauteil mindestens zweimal durchlaufen muss, lassen sich nicht so dicke Bauteile wie mit der Transmissionsanordnung untersuchen. Bei „Tandem“ und „Bistatisch“ können durch die Wahl des Einfallswinkels α_A unterschiedliche Wellenmoden im Körper angeregt werden (siehe Abschnitt 2.4 Modenkonversion). Je nachdem mit welchen Wellen man arbeiten möchte, gilt es, die entsprechenden Einfallswinkel und den richtigen Prüfkopf Abstand vom Sender zum Empfänger einzustellen. Bei den Echo-Verfahren treten neben der gewollten Wellenart eine Reihe weiterer ungewollter Wellenarten auf, die in Abbildung 2.5 nicht dargestellt sind, aber besonders bei luftgekoppeltem Ultraschall zu erheblichen Schwierigkeiten führen können (siehe dazu auch Abbildung 2.2).

2.7 Theoretische Bestimmung des Laufweges und der Laufzeit

Die Laufzeiten der experimentell erhaltenen Echoanzeigen in den B-Bildern (siehe Abschnitt 2.9) müssen mit den theoretisch bestimmten Laufzeiten überprüft werden, um eine Aussage über die Genauigkeit der Laufzeitmessung machen zu können. Die theoretische Ermittlung der Laufzeit bedingt neben der Kenntnis der Schallgeschwindigkeiten c auch die des Laufweges. Der Laufweg lässt sich über das Fermatsche Prinzip bestimmen, sofern Quell- und Zielpunkt bekannt sind.

Das Fermatsche Prinzip besagt, dass das Brechungsgesetz dann erfüllt ist, wenn die Laufzeit eines Strahls, ausgehend von einem Punkt im Medium 1 mit Schallgeschwindigkeit c_1 durch die Grenzfläche zwischen den Medien zu einem Punkt im Medium 2 mit der Schallgeschwindigkeit c_2 am kürzesten ist.

Bei der Tandemanordnung und der bistatischen Anordnung müsste demnach immer der zeitlich kürzeste Schalllaufweg von der Wandlerfläche des Senders zur Wandlerfläche des Empfängers herangezogen werden, um die Laufzeit berechnen zu können.

Die Berechnung des Laufweges für ein Reflektorecho (z.B. an der Rückwand) ist nur mit einer aufwändigen Modellierung möglich. Der Schalllaufweg in der Luft liegt nicht zwangsläufig auf der akustischen Achse (Symmetrieachse des Schallfeldes) des Sende- und des Empfangsprüfkopfes.

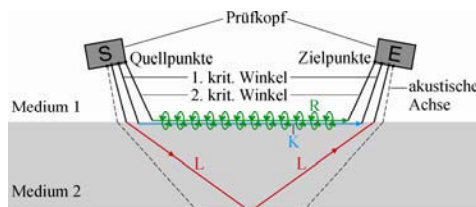


Abbildung 2.6 Skizzierung der Laufwege des Longitudinalwellen-Rückwandechos 1.LL, der Rayleighwelle R und der Kriechwelle K bei der Tandemanordnung nach dem Fermatschen Prinzip

Zur Verdeutlichung ist in Abbildung 2.6 die Tandemanordnung mit einem Einfallswinkel kleiner als dem 1. kritischen Winkel und einem festen Abstand vom Sende- zum Empfangsprüfkopf dargestellt. Medium 2 (z.B. Beton) sei schallhärter als

Medium 1 (z.B. Luft). Für das Longitudinalwellen-Rückwandecho I.LL, die Rayleighwelle R und die Kriechwelle K sind die nach dem Fermatschen Prinzip sich ergebenden Laufwege skizziert. Für weitere, hier nicht eingezeichnete Rückwande-echos wie z.B. das Transversalwellen-Rückwandecho gilt Entsprechendes.

Derjenige Abstand vom Sende- zum Empfangsprüfkopf, bei dem bei einem festgelegten Einfallswinkel die größte Rückwandechoamplitude erzeugt wird, kann z.B. mit Hilfe der Punktquellensynthese berechnet werden ([59],[96]). Folgende Faktoren haben dabei einen Einfluss auf das Ergebnis:

- Schallfeldrichtwirkung des Sendeprüfkopfes, des Reflektors und des Empfangsprüfkopfes
- Punkttrichtwirkungen im Beton (nicht schubspannungsfreies Medium)
- Abstandsfunktion vom Sendeprüfkopf zum Reflektor und vom Reflektor zum Empfangsprüfkopf
- Winkelabhängige, grenzflächenspezifische Transmissions- und Reflexionsfaktoren an den Grenzschichten Luft/Beton und Beton/Luft
- Schallschwächung bedingt durch Streuung und echte Absorption
- Kornrauschen infolge der Gesteinskörnung und der Luftporen

Vereinfachung

In der vorliegenden Arbeit wird vereinfachend angenommen, dass sich der Schall in der Luft lediglich auf der akustischen Achse ausbreitet, so wie in Abbildung 2.7 (b) dargestellt. Das Fermatsche-Prinzip (Abbildung 2.7 (a)) findet demnach keine Anwendung. Diese Vereinfachung hat den entscheidenden Vorteil, dass es für jeden Prüfkopf nur einen Durchstoßpunkt auf der Grenzfläche Luft/Beton bzw. Beton/Luft gibt und mit einer konstanten Vorlaufzeit für die Luftstrecke gerechnet werden kann.

Bei den durchgeführten experimentellen Untersuchungen in bistatischer Prüfkopfanzordnung wurde für den jeweiligen Einfallswinkel der akustischen Achse α_A der Abstand vom Schallein- zum Schallaustrittspunkt x_{th} auf der Grenzfläche Luft/Beton für das Longitudinal- und Transversalwellen-Rückwandecho mit dem Brechungsgesetz Gl. 2.16 berechnet. Ebenso werden die zugehörigen theoretischen Laufzeiten t_{th} berechnet. Die so ermittelten Punkte x_{th}/t_{th} werden mit den Rückwande-echoanzeigen in den B-Bildern verglichen.

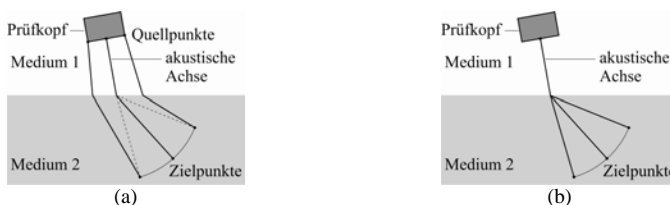


Abbildung 2.7

Konstruktionsskizzierung des Schallweges von den Quell- zu den Zielpunkten über das Fermatsche Prinzip bei schrägem Schalleinfall von Medium 1 auf Medium 2 (a); Vereinfachung (b)

2.8 Zeitliche Mittelung

Um das Signal-zu-Rausch-Verhältnis zu vergrößern, bedient man sich gerne einer zeitlichen Mittelung (engl. time averaging) der Empfangssignale. Dazu werden an einer Messposition mehrmals Pulse ausgesendet und empfangen. Die erhaltenen Empfangssignale werden miteinander gemittelt. Da das elektrische Rauschen zufällig auftritt, wird es durch destruktive Überlagerung verringert. Der Puls hingegen bleibt gleich und wird lediglich geglättet. Der Nachteil besteht in der längeren Messzeit, so dass bei jeder Messung ein Kompromiss zwischen Signalqualität und Messzeit gefunden werden muss.

2.9 Flächiges Messen, Darstellungsarten

Das Ultraschall-Verfahren ist ein Punktmessverfahren. Durch eine einzelne Messung an einem Punkt erhält man ein einzelnes Zeitsignal (A-Bild), das in der Regel keine eindeutige Aussage über die Lage eines Reflektors zulässt.

Der Grund dafür liegt in der kegelförmigen Ausbreitung des Ultraschalls im Bauteil als Schallbündel, weshalb ein etwas lateral neben dem Einschallpunkt liegender Reflektor ebenfalls zu starken Reflexionen führt, die vom Empfangsprüfkopf empfangen werden können. Je größer der Öffnungswinkel des Schallbündels γ , desto schlechter ist die Ortsauflösung eines Fehlers. Berührende Ultraschallprüfköpfe für Beton weisen aufgrund ihres kleinen Verhältnisses von Wandlerdurchmesser zur Wellenlänge einen großen Öffnungswinkel auf. Dies führt zu einer schlechten Ortsauflösung.

Weiterhin treten meistens in einem A-Bild neben der gesuchten Reflexion noch weitere andere Signalanzeigen auf, die z.B. durch Übersprechen oder Reflexionen anderer ebenfalls auftretender Wellenarten hervorgerufen werden.

Deshalb ist es notwendig die Messoberfläche flächig per Hand oder mit Hilfe eines Scanners abzurastern. Man erhält einen dreidimensionalen Datensatz x - y - t . Die Zeitachse t ist mit Hilfe der Schallgeschwindigkeit c und des Laufweges auch in eine Tiefenachse z transformierbar. Durch diesen 3D-Raum lassen sich dann Tiefenschnitte (C-Bilder) und senkrecht dazu liegende Profilschnitte legen, um das Bauteilinnere betrachten zu können (siehe dazu ([52] S. 198)). Die Profilschnitte werden in dieser Arbeit als B-Bilder bezeichnet, wenn sie in Scanrichtung liegen und als D-Bilder, wenn sie senkrecht zur Scanrichtung angeordnet sind.

Vorsicht ist geboten bei der Interpretation der Schnitte. Die Anzeige eines Streuers in der akustischen Abbildung kann stark von seiner geometrischen Form abweichen. So erscheint z.B. ein Punktstreuer als Hyperbel.

Durch eine Rekonstruktionsrechnung, wie z.B. mit SAFT (Synthetic Aperture Focusing Technique) kann aus dem Datensatz eine ortsgenaue Abbildung berechnet werden.

2.10 Synthetic Aperture Focusing Technique (SAFT)

Mittels der "Synthetic Aperture Focusing Technique" (SAFT) ist es möglich aus einem Ultraschall Datensatz das Innere eines Körpers zu rekonstruieren. SAFT erlaubt die Berechnung der Lage von Reflektoren. Es existieren verschiedene

SAFT-Algorithmen. In dieser Arbeit wird von dem 3D-SAFT-Algorithmus Gebrauch gemacht, weshalb dieser kurz erläutert werden soll.

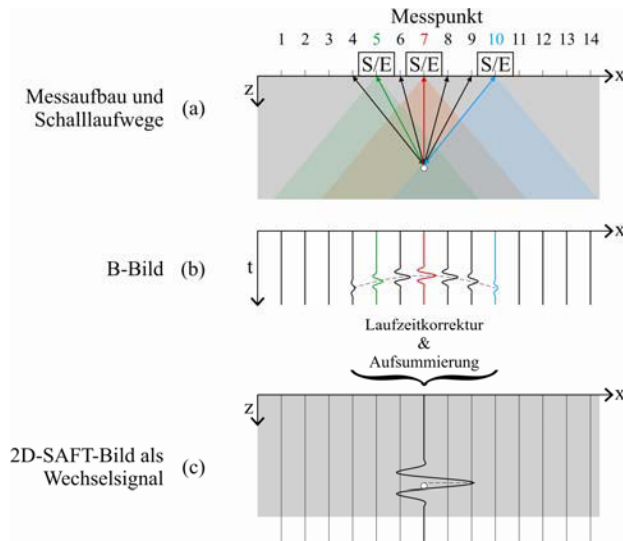


Abbildung 2.8

Prinzip der 2D-SAFT-Rekonstruktion (Rückwandecho ist ausgeblendet): Ein Prüfkopf wird entlang einer Linie über die Oberfläche eines Körpers bewegt, der einen kleinen innen liegenden Reflektor enthält. Der Prüfkopf sendet und empfängt in äquidistanten Abständen (a); man erhält ein B-Bild, in dem eine Reflexionsanzeige in Form einer Hyperbel auftritt (b); nach einer Laufzeitkorrektur der zu einem Pixel zugehörigen Signale werden diese aufsummiert; tut man dies für jedes Pixel, so erhält man ein rekonstruiertes 2D-SAFT-Bild als Wechselsignal (c)

Abbildung 2.8 zeigt auf anschauliche Weise das Prinzip der 2D-SAFT-Rekonstruktion bei Verwendung eines einzelnen Prüfkopfes. Für die 3D-SAFT-Rekonstruktion wird das Verfahren lediglich um die dritte Dimension erweitert. Es stehen dann wesentlich mehr Signale zur Überlagerung bereit, wodurch eine bessere Qualität des Rekonstruktionsbildes erreicht wird. Sind Sende- und Empfangsprüfkopf räumlich voneinander getrennt (Tandem statt Monostatisch), so muss die Rekonstruktion entsprechend angepasst werden.

Durch die 3D-SAFT Rekonstruktion wird eine nachträgliche digitale Fokussierung des Ultraschalls auf jedes Voxel (dreidimensionales Pixel) des 3D-Datenraumes vorgenommen, so als hätte man mit einem Prüfkopf gemessen, der variabel auf jede Stelle im Bauteil fokussiert. Eine wesentliche Verbesserung mit SAFT erhält man vor allem bei Prüfköpfen mit großen Schallöffnungswinkeln im Bauteil und einem engen Messraster, da hier eine große Anzahl von Signalen überlagert werden kann. Der Algorithmus funktioniert folgendermaßen: Das Volumen des abgetasteten Bauteiles wird in kleine Würfel, genannt Voxel, unterteilt. Für jedes einzelne Voxel werden nun für alle gemessenen Sender-Empfängerpaare, bei denen theoretisch ein Reflexions-echo am Voxel aufgrund des Öffnungswinkels auftreten könnte, die zugehörigen

Signalwerte nach einer Laufzeitkorrektur der Signale überlagert. Befindet sich an dem Voxel tatsächlich ein Reflektor, so findet eine konstruktive Interferenz statt, andernfalls ist sie destruktiv. Zur anschaulicheren Darstellung kann von den resultierenden Wechselsignalen noch die Einhüllende über die Hilbert-Transformierte gebildet werden (siehe Abschnitt 4.4.2). Allerdings geht dadurch die Phaseninformation verloren.

Ausführliche Literaturstellen zu SAFT findet man in [55], [45] und [52].

2.11 Common-Midpoint (CMP) und Geschwindigkeitsspektrum

In dieser Arbeit wird eine spezielle Messmethode aus der Seismik angewendet, die unter dem Namen Common-Midpoint (CMP) bekannt ist. Sie ist in der Ultraschallprüfung noch nicht allzu sehr verbreitet. Sender und Empfänger werden bei dieser Methode gleichmäßig entlang einer Körperoberfläche von einem Mittelpunkt M in entgegengesetzte Richtungen wegbewegt (siehe Abbildung 2.9 (a)). Dadurch kann ohne Kenntnis der Tiefe eines parallel zur Oberfläche liegenden Reflektors die Schallgeschwindigkeit c im Material bestimmt werden. Mit der Schallgeschwindigkeit lässt sich dann die Reflektortiefe berechnen.

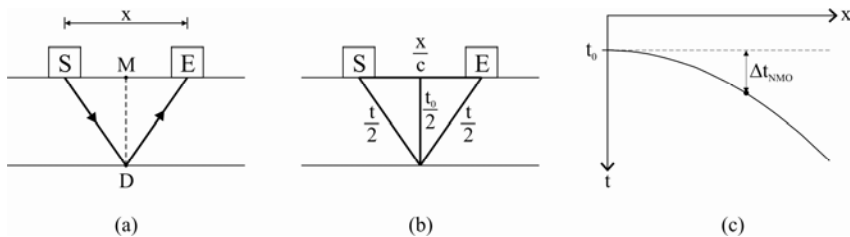


Abbildung 2.9 CMP-Prinzip: Messskizze (a); Skizze zur Herleitung von Gl. 2.17 (b); NMO-Korrektur: Reflexionshyperbel wird durch Abzug von Δt_{NMO} zu einer horizontalen Geraden durch t_0 (c)

Alle Sende-Empfangspaare haben dabei einen gemeinsamen Reflexionspunkt D auf der Grenzfläche. Es ändern sich nur die Wegstrecken, die der Schall vom Sender über den Reflexionspunkt zum Empfänger zurücklegen muss. Die Laufzeit der Grenzflächenreflexion im resultierenden x - t -Diagramm (Abbildung 2.9 (c)), das einem B-Bild entspricht, verläuft demzufolge hyperbolisch nach Gl. 2.17. Diese lässt sich mit dem Satz des Pythagoras aus Abbildung 2.9 (b) herleiten.

$$t = \sqrt{t_0^2 + \frac{x^2}{c^2}} \quad \text{Gl. 2.17}$$

Die Zeit t_0 ist dabei diejenige Zeit, die der Schall von M nach D und wieder zurück benötigt, was einer Messung in monostatischer Prüfkopfanzordnung über dem Reflexionspunkt D entspricht. Der Abstand von Sender zum Empfänger ist x .

Gl. 2.17 gilt ausschließlich für Reflexionen ohne Modenkonversion, also für die reine Longitudinalwellenreflexion 1.LL und die reine Transversalwellenreflexion 1.TT.

Eine Prüfkopfpanordnung mit $x \neq 0$ wird als normal moveout (NMO) bezeichnet. Die Differenz zwischen der Laufzeit, in welcher die Prüfköpfe einen Abstand x zueinander aufweisen (NMO-Position) zu derjenigen, in welcher sie theoretisch beide auf Messpunkt M liegen würden, wird entsprechend nach Gl. 2.18 als Δt_{NMO} bezeichnet.

$$\Delta t_{NMO} = t - t_0 \quad (\text{NMO} = \text{normal moveout}) \quad \text{Gl. 2.18}$$

Mit Hilfe der gewonnenen Daten der CMP-Messung in Form eines x - t -Diagramms, wie es in Abbildung 2.9 (c) dargestellt ist sowie Gl. 2.17 und Gl. 2.18 lässt sich nun auf folgende Weise die Schallgeschwindigkeit c bestimmen.

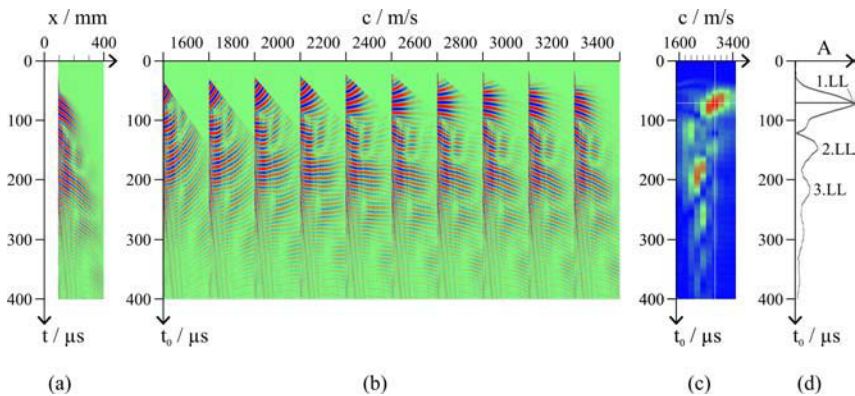


Abbildung 2.10 B-Bild bei bistatischer ACU-Messung (entspricht CMP) an einer 103 mm dicken Plexiglasplatte (a); x - t_0 -Diagramme für c von 1600 m/s bis 3400 m/s in Schritten von 200 m/s nebeneinander angeordnet (b); Einhüllende des Geschwindigkeitsspektrums von (b) (c); Schnitt durch das Geschwindigkeitsspektrum bei $c = 2800$ m/s (d)

Das x - t -Diagramm wird für eine gewählte konstante Schallgeschwindigkeit c in ein x - t_0 -Diagramm transformiert. Dafür wird eine äußere Schleife über x und eine innere Schleife über t_0 laufen gelassen und mit Gl. 2.17 für jedes x - t_0 -Wertepaar der Punkt $t(x, t_0)$ an der Stelle x berechnet, dessen Wert an die Stelle von x/t_0 des zu füllenden neuen x - t_0 -Diagramms geschrieben wird. Diese Prozedur wird als NMO-Korrektur bezeichnet. Dadurch soll eine hyperbolisch gekrümmte Reflexionsanzeige bei richtiger Wahl der Schallgeschwindigkeit in eine horizontale Gerade durch t_0 transformiert werden, so wie es in Abbildung 2.9 (c) dargestellt ist. Es handelt sich um ein iteratives Verfahren bezüglich der Schallgeschwindigkeit c , da diese sowohl die gesuchte als auch die Eingangsgröße ist.

Um die richtige Schallgeschwindigkeit zu bestimmen, können wie in Abbildung 2.10 (b) dargestellt, einzelne x - t_0 -Diagramme unterschiedlicher Schallgeschwindigkeiten nebeneinander dargestellt und verglichen werden.

2.11.1 Stapelung

Als Maß für die richtige Schallgeschwindigkeit c kann eine Mittelung oder Aufsummierung (Stapelung) der einzelnen NMO-korrigierten A-Bilder eines x - t_0 -Diagramms in x -Richtung durchgeführt werden. Bei demjenigen x - t_0 -Diagramm mit der richtigen Schallgeschwindigkeit führt die Stapelung zu einer konstruktiven Überlagerung der Reflexionsanzeigen, während sich andere Signalteile, wie z.B. Oberflächenwellen, destruktiv überlagern.

2.11.2 Wellenlängenänderung durch NMO-Korrektur

Durch die NMO-Korrektur kommt es zu einer Wellenlängenänderung, wie sie auch in Abbildung 2.10 (b) zu erkennen ist. Diese Pulsverzerrung ist umso größer, je größer der Abstand x , kleiner t_0 und kleiner die Schallgeschwindigkeit c ist.

Große Wellenlängenänderungen führen zu Störungen in der Stapelung. Deshalb ist es sinnvoll, vor der Stapelung eine obere prozentuale Grenze für die Wellenlängenänderung zu wählen. Alle NMO-korrigierten Datenpunkte oberhalb dieser Grenze werden dann auf Null gesetzt, so dass sie keinen Anteil an der Stapelung haben. In Abbildung 2.10 (b) ist solch ein Grenzwert definiert worden, weshalb die x - t_0 -Diagramme oben nur Nullwerte enthalten.

2.11.3 Geschwindigkeitsspektrum

Für eine Automatisierung dieses Verfahrens bietet sich die Bildung eines sogenannten Geschwindigkeitsspektrums an, bei dem die Zeit t_0 über die Schallgeschwindigkeit c aufgetragen wird (c - t_0 -Diagramm). Bei diesem werden die NMO-korrigierten und gestapelten Diagramme für jede Schallgeschwindigkeit vertikal nebeneinander angeordnet, z.B. in Form eines farbkodierten Intensitätsdiagramms, wie in Abbildung 2.10 (c). Wird die Einhüllende des Geschwindigkeitsspektrums gebildet, so sollte dessen Maximum bei dem gesuchten t_0 und c auftreten.

Das Geschwindigkeitsspektrum und die gestapelten Diagramme können auch dazu verwendet werden, andere Wellen als die direkte Reflexion zu identifizieren. So zeigt z.B. ein Schnitt durch das Geschwindigkeitsspektrums bei $c = 2800$ m/s (Abbildung 2.10 (d)) neben der ersten Longitudinalwellen-Rückwandreflexion 1.LL weitere Vielfachreflexionen 2.LL und 3.LL.

Vielfachreflexionen der reinen Longitudinalwelle und Vielfachreflexionen der reinen Transversalwelle treten bei der richtigen Schallgeschwindigkeit c auf und bei einem Vielfachen von t_0 . Alle anderen Wellen, wie z.B. Reflexionen mit Modenkonversion oder Oberflächenwellen, treten im Geschwindigkeitsspektrum in geschwächter Form als Artefakte bei einer falschen Schallgeschwindigkeit c und einer falschen Zeit t_0 auf.

Eine ausführlichere Erläuterung der CMP-Methode findet sich in [100].

2.11.4 Reflektortiefe

Die Tiefe des Reflektors d lässt sich bestimmen zu

$$d = \frac{c \cdot t_0}{2}. \quad \text{Gl. 2.19}$$

2.11.5 Vereinfachung zur bistatischen Prüfkopfanzordnung

Bei einer homogenen isotropen Platte mit parallelen ebenen Oberflächen kann statt einer CMP-Anordnung eine bistatische Prüfkopfanzordnung (siehe Abbildung 2.5 (d)) bei gleichem Messergebnis herangezogen werden. Dadurch vereinfacht sich die Messdurchführung, da nur noch einer der beiden Prüfköpfe bewegt werden muss. Von dieser Vereinfachung wird in dieser Arbeit Gebrauch gemacht.

3 Stand der Technik

3.1 Ultraschall

„Das Jahr 1929 kann als Geburtsjahr der Ultraschallwerkstoffprüfung betrachtet werden. In diesem Jahr schlug Sokolov [84] als erster das Schattenverfahren mit kontinuierlichen Schallwellen zur Feststellung von Materialfehlern vor“ ([52] S. 170).

Etwa seit 1950 beherrscht das Impulseecho-Verfahren die Ultraschallprüftechnik in vielen Bereichen, wie z.B. in der Metall-, Kunststoff-, Elektro- und chemischen Industrie, im Schiffs-, Stahl- und Maschinenbau, in Kraftwerken, Wissenschaft und Forschung ([52] S. 3).

3.2 Ultraschall für Beton

In den Anfängen der Ultraschallprüfung an Beton wurde der Forschungsschwerpunkt auf die Untersuchung von festkörperphysikalischen Zusammenhängen zwischen der Schallgeschwindigkeit, sowie der Intensitätsabnahme des Impulses und der Baustoffeigenschaften gelegt. Nach jahrzehntelanger erfolgloser Anstrengung konnte allerdings kein allgemeingültiger physikalischer Zusammenhang zwischen der Betondruckfestigkeit und der Schallgeschwindigkeit gefunden werden [62]. Das Ultraschallverfahren wurde auch zur Detektion von Rissen, Hohlräumen und Konstruktionsfugen in Betonbauteilen, zur Dickenmessung von geschädigten Betonschichten oder zur Ortung von mangelndem Verbund zwischen Bewehrung und Beton eingesetzt [25]. Hauptsächlich wurde die Transmissionsanordnung angewendet. Erst etwa 1990 widmete man sich verstärkt dem Impulseecho-Verfahren, das bis dahin für Beton noch nicht anwendbar war.

Etwa 1991, also vergleichsweise spät, gelang es, die Echotechnik für die Prüfung von Betonbauteilen anzupassen. Der Grund dafür besteht in dem inhomogenen Gefüge von Beton. Die Gesteinskörner selbst wirken wie eine Vielzahl kleiner Streuer, wodurch es zu einem Rauschuntergrund im Empfangssignal kommt, den man als „Kornrauschen“ bezeichnet. Dieses Kornrauschen erschwert die Messung gesuchter Reflektorechos, wie z.B. von einer Rückwand oder einer Ablösung, erheblich.

Hinzu kommt die Tatsache, dass es zu dieser Zeit nur schmalbandige Niederfrequenzprüfköpfe gab, und der Puls infolgedessen viele Nachschwingungen aufwies. Vor allem der störende Einfluss der amplitudenstarken Rayleighwelle, die an der Oberfläche vom Sender zum Empfänger läuft, verhinderte durch ihre Überlagerung mit den Nutzsignalen (Reflexionen aus dem Bauteilinneren oder von der Rückwand) eine Identifikation dieser Reflexionen und damit auch das Auffinden des Ersteinsatzes zur Laufzeitbestimmung.

Die Adaption gelang unter anderem durch den Einsatz spezieller Niederfrequenzprüfköpfe zwischen 25 kHz und 200 kHz und extrem rauscharmer Empfangsverstärker, sowie der zeitlichen Mittelung.

1992 wendeten Krause et al. [51] erstmalig das Prinzip der laufzeitkorrigierten Überlagerung zur Dickenmessung von Betonbauteilen an, wodurch eine deutliche Qualitätsverbesserung des Signal-zu-Rausch-Verhältnisses erreicht wurde.

Mit der Zeit kamen immer breitbandigere Prüfköpfe auf den Markt, die ab einer bestimmten Reflektortiefe zu einer zeitlichen Trennung von Nutz- und Störsignalen führten.

1997 wurden von Müller [49] erstmals Rekonstruktionsalgorithmen (SAFT, siehe Abschnitt 2.10) für Betonmessungen angewendet und in Zusammenarbeit mit der BAM weiterentwickelt. Seitdem wird an verschiedensten Rekonstruktionsalgorithmen für unterschiedliche Prüfkopfanordnungen und Bauteilgeometrien gearbeitet [55]. Auf der Seite der digitalen Bearbeitung tragen sie seitdem zu einer wesentlichen Verbesserung des Signal-zu-Rausch-Verhältnisses linear und flächig gemessener Daten bei. Zudem erhält man durch sie annähernd ein Abbild des Körperinneren.

Ein wichtiger Schritt zu automatisiert flächig scannenden Messungen gelang durch die Entwicklung von Transversalwellen-Punktkontaktprüfkopffarrays der Firma ACSYS [82] (vorgestellt 1998 [81]). Sie funktionieren allein über Trockenankopplung, also ohne Koppelmittel, wie z.B. Vaseline, Gel oder Wasser. Dadurch wurde es erstmals möglich, das Verfahren für die Messung am Bauwerk automatisiert anzuwenden. Derartige automatisierte Messungen von mehreren Quadratmetern Größe wurden außerhalb des Labors erstmals 2004 von der BAM an einer Spannbetonbrücke durchgeführt [39]. Mittels eines Scanners wird dabei der Prüfkopf pneumatisch an die Betonoberfläche angedrückt, gemessen, der Prüfkopf wieder abgehoben und zum nächsten Messpunkt verfahren, wo sich der Ablauf wiederholt [90]. Seitdem entwickelt die BAM mit der Forschergruppe FOR384 und mit Unterstützung von ACSYS das Ultraschallecho-Verfahren ständig weiter. Unterschiedliche Prüfkopfanordnungen, wie z.B. die multistatische Prüfkopfanordnung, werden dabei auf ihre Tauglichkeit hin untersucht. Neben Ultraschall werden parallel auch andere Verfahren, wie Radar und Impakt-Echo kombiniert eingesetzt, um die jeweiligen Vorteile jedes Verfahrens nutzen zu können [99]. Die Daten können dann vor oder nach einer Rekonstruktion zu einem einzelnen Abbild (3D-Datenraum) des untersuchten Bauteils fusioniert (Datafusion) werden ([46],[57],[93]).

Neben der Dickenmessung, Bewehrungs- und Spanngliedortung können heutzutage auch unter bestimmten Randbedingungen durch Ultraschallecho-Messungen Aussagen über den Verpresszustand von Spanngliedern gemacht werden [50].

Bisher sind Ultraschallecho-Messungen von einigen Quadratmetern Größe an allen möglichen frei zugänglichen Stellen eines Betonbauwerkes, wie z.B. Stegen, Fahrbahnböden oder über Kopf an Decken, an einem Tag möglich.

Die benötigende Zeit für den Scanneraufbau konnte jüngst durch die Entwicklung eines sogenannten „Saugscanners“, der über Saugfüße an der Betonwand oder -decke gehalten wird, minimiert werden [94].

Die effektive Messgeschwindigkeit bei einem 2 cm x 2 cm großen Messraster von $\sim 0,6 \text{ m}^2/\text{h}$ wurde durch den Einsatz von zwei parallel laufenden Prüfkopffarrays auf $\sim 1,2 \text{ m}^2/\text{h}$ verdoppelt [94].

Wegen der Ankopplung der Prüfköpfe an das Bauteil konnten jedoch bisher keine Flächen von mehreren 100 Quadratmetern untersucht werden, weil zuviel Zeit für das Umsetzen und pneumatische Anpressen des Prüfkopfes benötigt wird.

Da es mehr oder weniger in allen Bereichen der ZfP mit Ultraschall eine Vielzahl von Anwendungsfällen gibt, bei denen die aufwendige aber dafür schnellscannende

Tauchtechnik (Ultraschallprüfung im Wasserbecken) nicht anwendbar ist, führte dies zu der Entwicklung von luftgekoppelten Ultraschallprüfköpfen (air-coupled ultrasound = ACU). Da sie keinen Kontakt zum Bauteil haben, können sie während des Sendens und Empfangens von Pulsen in Schrittgeschwindigkeit über die Bauteiloberfläche verfahren werden. Die Messgeschwindigkeit richtet sich dabei nach der Puls wiederholte Frequenz, so dass ca. 20 bis 80 Messpunkte/s aufgezeichnet werden können. Dies bedeutet im Vergleich zu Messungen mit Punktkontaktprüfkopffarrays eine 50- bis 200-fach höhere Messgeschwindigkeit für Betonbauteile.

Insgesamt gibt es vier grundsätzlich unterschiedliche Arten der berührungslosen Ultraschallanregung oder des –empfangs, die in Tabelle 3.1 aufgeführt sind [31]. Hinzu kommen alle möglichen Mischkombinationen dieser vier Prüfkopfarten.

Art	physikalisches Prinzip	S / E	S/R-Verhältnis	Frequenzband	Öffnungswinkel im Festkörper	Sensorkosten in €(ca.)	Bemerkungen
luftgekoppelter Ultraschallprüfkopf (ACU)	piezoelektrisch	S & E	groß	schmal, wenn ungedämpft	klein	3000	
	elektrostatisch (kapazitiv)	S & E	mittel bis groß	breit	klein		
Nd:YAG-Laser	fotoakustischer Effekt: schockartige Erwärmung durch Laserlichtimpuls führt zu thermoelastischen Effekt	S	mittel	breit	groß	35.000	leichter Oberflächenabtrag (Ablation)
Laser-vibrometer (Interferometer)	elastooptisch; Doppler-Effekt	E	klein	breit	groß	15.000	retroreflektierende Folie auf Oberfläche aufkleben
elektromagnetischer Akustikprüfkopf (EMAT)	elektromagnetisch	S & E	klein				Körper muss elektrisch leitend sein; Prüfkopf-abstand zum Körper möglichst ≤ 1 mm

Tabelle 3.1 Berührungslose Ultraschallprüfköpfe; Nd:YAG-Laser = Neodym-dotierter Yttrium-Aluminium-Granat-Laser; S = Sender, E = Empfänger; S/R-Verhältnis = Signal-zu-Rausch-Verhältnis

3.3 ACU-Prüfköpfe

Im Folgenden wird auf die Entwicklung, die unterschiedlichen Bauweisen, sowie die zu überwindenden physikalischen Hürden von luftgekoppelten Ultraschallprüfköpfen eingegangen. Außerdem werden noch Entwicklungen fokussierender ACU-Prüfköpfe gezeigt.

3.3.1 Bauweisen von ACU-Prüfköpfen

In der Regel basieren luftgekoppelte Ultraschallprüfköpfe auf dem piezoelektrischen oder den elektrostatischen (kapazitiven) Effekt. Während piezoelektrische ACU-Prüfköpfe leistungsstark, aber dafür relativ schmalbandig (lange Pulse) sind, weisen elektrostatische ACU-Prüfköpfe ein sehr breitbandiges Verhalten (kurze Pulse) bei eher geringerer Schallintensität auf [79]. Allerdings sind seit Kürzerem auch schon sehr breitbandige piezoelektrische ACU-Prüfköpfe bei nur geringen Intensitätseinbußen auf dem Markt, wie z.B. von der Firma Ultrason.

Piezoelektrische ACU-Prüfköpfe bestehen aus einem piezoelektrischen Kristallelement, das auf Vorder- und Rückseite eine elektrisch leitende Schicht besitzt. Da sich die akustische Impedanz vom piezoelektrischen Kristall stark von derjenigen der Luft unterscheidet, sind sogenannte Anpassungsschichten (meistens 3 Schichten) bestimmter Dicke und akustischer Impedanz notwendig. Sie sind auf der Vorderseite des Wandlers aufgeklebt und verringern die Intensitätsverluste vom Piezokristall in die Luft [5].

Elektrostatische (kapazitive) ACU-Prüfköpfe bestehen hingegen aus einer dünnen flexiblen Membran, die auf einer leitfähigen steifen Rückwandplatte (engl.: backplate) liegt. Die Membran ist auf ihrer Vorderseite metallisiert und geerdet. Wird kurzzeitig eine Spannung zwischen der vorderseitigen Elektrode und der steifen Rückwand angelegt, so wird die Membran in Schwingungen versetzt. Umgekehrt tritt eine messbare Ladungsänderung an der Rückwandplatte auf, wenn bei einer angebrachten Gleichspannung eine Ultraschallwelle die flexible Membran erreicht [79].

Ein spezieller mikromaschinell hergestellter kapazitiver ACU-Prüfkopf dieser Art wurde 1994 von Schindel und Hutchins [78] patentiert. Dieser besteht aus einer Rückwandplatte aus Silizium und einer dünnen Polymermembran. Zur Erhöhung der Prüfkopfempfindlichkeit ist die Rückwandplatte in regelmäßigen Abständen mit kleinen Gruben versehen, die als Resonanzluftpolster wirken. Die Oberfläche der Rückwand zwischen den Gruben ist metallisiert. Wird eine Gleichspannung angelegt, so zieht sie die Membran zur Rückwandplatte und erzeugt so eine Ladekapazität [79].

Kürzlich wurde durch Bovtun et al. [10] (2006) auch das Einsatzpotenzial von ferroelektrischen Polypropylen-Folien (cellular polypropylene ferroelectret films = EMFIT) als ACU-Prüfkopf nachgewiesen. Dies wurde durch dünne, auf die Folie aufgedampfte Au oder Al Elektroden erreicht, ohne die elektromagnetischen Eigenschaften der EMFIT-Folie zu reduzieren.

ACU-Prüfköpfe für die Werkstoffprüfung wurden erstmals 1971 von Luukkala et al. [56] eingesetzt, wobei kapazitive ACU-Prüfköpfe von Kuhl et al. [44] verwendet wurden.

Dennoch besitzen ACU-Prüfköpfe erst seit etwa zehn Jahren eine für die Werkstoffprüfung befriedigend hohe Leistungsfähigkeit.

3.3.2 Intensitätsverluste bei luftgekoppeltem Ultraschall

Das Problem von Ultraschallprüfköpfen bei Ankopplung über Luft liegt in den enormen Intensitätsverlusten, die der Schall allein an den vier Grenzflächen Wandler/Luft, Luft/Bauteil, Bauteil/Luft und Luft/Wandler erfährt. Hinzu kommen die stark frequenzabhängigen Intensitätsverluste durch die Luftschicht selbst. Im Megahertz-Bereich fallen sie recht hoch aus, weshalb die Prüfköpfe nah am Körper positioniert werden müssen. Im Niederfrequenzbereich für Beton bei 100 kHz spielen sie hingegen nur eine untergeordnete Rolle. Aufgrund dieser Frequenzabhängigkeit sind Frequenzen bei normalem Luftdruck auf maximal ~ 3 MHz begrenzt. Für Messungen unter künstlich hergestelltem hohem Luftdruck wurden aber auch schon 10 MHz ACU-Prüfköpfe eingesetzt [6].

Die Intensitätsverluste an den Grenzflächen Luft/Bauteil und Bauteil/Luft sind aufgrund des großen Impedanzunterschiedes von Luft und einem Bauteil mit hoher Impedanz (z.B. Beton) extrem hoch. So ergibt sich für die Grenzfläche Luft/Beton (bzw. Beton/Luft) nach Gl. 2.15 ein Transmissionsfaktor bezogen auf die Intensität von $T_{J,\text{Luft/Beton}} = T_{J,\text{Beton/Luft}} = 1,85 \cdot 10^{-4} = -75$ dB. Da man bei der Ultraschallprüfung eine dem Schalldruck entsprechende Spannung misst, sind vor allem die Schalldruckverluste von Interesse.

Da $T_{p,\text{Luft/Beton/Luft}} = T_{p,\text{Luft/Beton}} \cdot T_{p,\text{Beton/Luft}} = T_{J,\text{Luft/Beton}}$ ist, bedeutet dies, dass die Schalldruckamplitude bei dem Übergang von Luft in Beton und wieder zurück in Luft auf $1,85 \cdot 10^{-4}$ ihres ursprünglichen Wertes abnimmt. Dieser Verlustanteil kann nicht verhindert werden, es sei denn, die Dichte der Luft wird durch Überdruck erhöht ($Z = \rho \cdot c$), wodurch der Impedanzsprung an den Grenzflächen verringert wird und dadurch die Intensitätsverluste entsprechend verringert werden. Dies ist zwar im Labor für kleine Bauteile machbar, aber am Bauwerk wahrscheinlich nicht zu realisieren.

Hingegen können die Intensitätsverluste an der Grenzfläche Wandler/Luft bzw. umgekehrt durch einen optimalen Prüfkopfaufbau gering gehalten werden. Bei Prüfköpfen, die den piezoelektrischen Effekt ausnutzen, ergibt sich das Problem, dass Piezokristalle eine wesentlich größere akustische Impedanz als die der Luft aufweisen. Man behilft sich durch mehrlagige Anpassungsschichten, die auf die Vorderseite des Wandlers aufgeklebt werden.

So gelang 1995 dem Unternehmen Ultran durch eine spezielle Frontschicht aus zusammengepresster Faser, die auf einer mehrlagigen Anpassungsschicht auf dem piezoelektrischen Wandler aufgeklebt ist, eine wesentliche Verbesserung des Schallübergangs vom Wandler in die Luft. Nach einer Optimierung des Aufbaus führte dies 1997 zu ACU-Prüfköpfen von 50 kHz bis 5 MHz mit einem Transmissionsfaktor von bis zu $T_{J,\text{Wandler/Luft}} = 0,018 = -35$ dB (im Jahr 2001 US-Patent #6311573 [5]) ([4],[6]).

Insgesamt ergibt sich dadurch für alle zu durchlaufenden Grenzflächen ein Transmissionsfaktor des Schalldrucks von $T_{p,\text{Wandler/Luft/Beton/Luft/Wandler}} = 3,33 \cdot 10^{-6} = -110$ dB.

Um weitere Schalldruckverluste klein zu halten, werden piezoelektrische ACU-Prüfköpfe meistens noch in ungedämpfter Bauweise ausgeführt. Der Prüfkopf besitzt dann ein schmales Frequenzspektrum (schmalbandig) und schwingt hauptsächlich mit seiner Resonanzfrequenz. Die Konsequenz ist ein relativ langer Puls (wie z.B. in Abbildung 5.1 (c) zu sehen) verglichen mit den Pulsen von Kontaktprüfköpfen, die man vorzugsweise für die Betonprüfung einsetzt.

Elektrostatische ACU-Prüfköpfe weisen hingegen generell ein breites Frequenzband auf, weshalb sie gerne verwendet werden. Die Intensitätsverluste dieser Prüfköpfe sind jedoch höher als die der neuen piezoelektrischen ACU-Prüfköpfe von Ultran.

3.3.3 Fokussierende ACU-Prüfköpfe

Neben den planaren wurden bereits auch eine Reihe fokussierender ACU-Prüfköpfe und laufzeitgesteuerter ACU-Gruppenstrahler entwickelt. Durch sie lässt sich durch monostatische Messung und Fokussierung auf die Körperoberfläche, diese hochaufgelöst abbilden ([40],[61],[69],[75],[76],[77]). Zur Messung von körperinnenliegenden Strukturen wurden fokussierende ACU-Prüfköpfe nur in Transmissionsanordnung ([8],[60]) oder aber zur Anregung von Lamb-Wellen in der Transmissions- oder Echoanordnung ([85],[87],[88]) angewendet. Von fokussierenden Prüfköpfen in monostatischer Anordnung zur Detektion von körperinnenliegenden Reflektoren in Materialien hoher Impedanz ist dem Autor bisher nichts bekannt.

3.3.4 Verwendung von Chirp-Signalen

Breitbandige ACU-Prüfköpfe ermöglichen die Verwendung von Chirp-Signalen. Dies sind generierte Signale aus sinusförmigen Schwingungen, deren Frequenz sich fließend vom Signalanfang bis zum Signalende ändert. Gan et al. [26] zeigten 2001, dass durch die Verwendung von Chirps in Verbindung mit Korrelationsalgorithmen eine Verbesserung des Signal-zu-Rausch-Verhältnisses erreicht wird. Dies wurde anhand von Transmissionsmessungen mit kapazitiven ACU-Prüfköpfen an dünnen Metallen und Kohlenstofffaserverbundmaterialien gezeigt.

3.4 Stand der Technik berührungsloser Ultraschall-Verfahren

Es kommen die in Tabelle 3.1 aufgelisteten berührungslosen Prüfkopfarten bzw. Mischformen zum Einsatz. Elektromagnetische Akustikprüfköpfe (EMATs) können nur an elektrisch leitfähigen Bauteilen angewendet werden, weshalb sie für die Betonprüfung nicht in Frage kommen und hier nicht weiter auf sie eingegangen wird. Es verbleiben die Sende/Empfangsprüfkopf-Kombinationen

- ACU/ACU,
- Laser/ACU,
- ACU/Laservibrometer und
- Laser/Laservibrometer.

Untersuchungen zur teuren Laser/Laservibrometer-Kombination an Beton existieren nur vereinzelt [21]. Sie hat den Nachteil, dass sie eine geringe Empfindlichkeit im Niederfrequenzbereich unter 100 kHz aufweist, was mit einer hohen zeitlichen Mittelung kompensiert werden muss. Und/oder es muss eine retroreflektierende Folie für das Laservibrometer aufgeklebt werden, die nach der Messung nur schwer entfernbar ist. Im Folgenden soll auf die ersten drei Prüfkopfkombinationen eingegangen werden, die mindestens einen ACU-Prüfkopf beinhalten.

Veröffentlichungen zu luftgekoppeltem Ultraschall an Beton in Echo- als auch in der unkomplizierteren Transmissionsanordnung [67] gibt es bisher kaum. Aufgrund des hohen Sicherheitsstandards in der Luftfahrt wurde in den letzten Jahren schwerpunktmäßig in diesem Bereich geforscht. Folglich waren und sind noch immer die Untersuchungen auf Materialien wie Aluminium und vor allem die neuerdings eingesetzten anisotropen Verbundwerkstoffe ausgerichtet. Da an Flugzeugen oftmals nur eine einseitige Prüfung von Ablösungen, Klebefehlern oder Strukturfehlern durch z.B. Schläge, praxistauglich ist, finden vor allem in diesem Bereich Untersuchungen mit luftgekoppeltem Ultraschallecho statt. Dennoch gibt es auch eine Vielzahl von Anwendungsgebieten für Transmissionsmessungen, wie z.B. für die Materialherstellung, Materialcharakterisierung oder wenn ein Flugzeugteil ausgebaut werden kann oder von zwei Seiten zugänglich ist.

Um die Intensitätsverluste bei luftgekoppelten Transmissions- und Echo-Messungen gering zu halten, bedient man sich gerne der Lamb-Wellen (siehe Abschnitt 2.2) ([85],[88]). Sie regt man unter einem bestimmten Einfallswinkel an, der sich nach dem Brechungsgesetz (Gl. 2.16) ergibt. Zwar gibt es unendlich viele Lamb-Wellen Moden, aber in der Regel ist die asymmetrische Mode 0. Ordnung aufgrund ihrer großen Schwingungsamplitude aus der Ebene heraus am geeignetsten. Lamb-Wellen entstehen nur in akustisch dünnen Platten, weshalb optimalerweise $k_T d \leq 1$ sein sollte. Dabei ist $k_T = 2\pi / \lambda_T$ die Wellenzahl der Transversalwelle und d die Plattendicke. Für $k_T d \sim (5-10)$ kann die Überlagerung der Moden 0. Ordnung als Oberflächenwelle betrachtet werden [87]. Im Vergleich zur Transmissionsmessung mit senkrechtem Schalleinfall lässt sich durch die Verwendung von Lamb-Wellen eine mehr als zehnfach größere Signalverstärkung erreichen [85].

3.4.1 Luftgekoppelte Transmissionsmessungen

Für die Untersuchung mit luftgekoppeltem Ultraschall bei zweiseitiger Zugänglichkeit des Bauteils sind bisher eine Reihe von Veröffentlichungen erschienen. Sehr ausführlich geht Stöbel [91] (2004) in seiner Dissertation auf das Einsatzpotenzial von luftgekoppeltem Ultraschall in Transmissionsanordnung als zerstörungsfreies Prüfverfahren zur Qualitätssicherung für verschiedenste Materialien ein. Werkstoffe wie z.B. Polymere, Holz [33], Keramik, glas- und kohlenstofffaserverstärkte Verbundwerkstoffe oder andere Composite, können auf ihre Struktur, fehlerhafte Verklebungen, Ablösungen, Risse, Lufteinschlüsse, Porosität oder andere Inhomogenitäten hin überprüft werden. Auch an pharmazeutischen Stoffen, Getränken oder Nahrungsmitteln, wie Fleisch, Schokolade oder Käse können Transmissionsmessungen durchgeführt werden, um sie z.B. auf ihre Inhaltsstoffe hin zu überprüfen [6]. Mittlerweile lassen sich auch Materialien mit sehr hoher akustischer Impedanz, wie z.B. Stahl, bis zu einer gewissen Dicke durchschallen. Um im Vergleich zu Ultraschallmessungen über Kontakt oder im Tauchbecken, Einbußen im Signal-zu-Rausch-Verhältnis teilweise zu kompensieren oder überhaupt möglich zu machen, kann oder muss man niedrigere Frequenzen einsetzen, was jedoch auf Kosten der Ortsauflösung geht [9].

Hillger et al. [38] zeigten 2004, dass mit piezoelektrischen 100 kHz ACU-Prüfköpfen in Transmission ein Kiesnest in einer 200 mm dicken Betonplatte durch 20 dB Amplitudenabnahme detektiert werden kann. Auch Betondicken von bis zu ~1 m sollen durchschallbar sein.

Weitere Untersuchungen in Transmission an Beton finden sich in [35] und [97].

Neben der klassischen Transmissionsanordnung mit senkrechtem Einfallswinkel z.B. zur Schweißpunktprüfung bei Stahlblechen [66] werden gerne zur Erhöhung der Schallintensität auch Transmissionsanordnungen eingesetzt, die Lamb-Wellen verwenden und bei denen der Einfallswinkel ungleich Null ist (siehe Solodov et al. ([85],[87],[88]) und Gélébart et al. [29]). Neben den bereits genannten Defekten können so auch durch einen Rotationsscan der Prüfkopfanzordnung um die Flächennormale des Körpers die elastischen Materialeigenschaften, wie z.B. die richtungsabhängige Steifigkeit in anisotropen Materialien, visualisiert werden [20].

Auch Methoden, die nichtlineare Wechselwirkungen zwischen niedrig- und hochfrequenten Ultraschallwellen ausnutzen, wurden bereits zur Schadensdetektion (z.B. in kohlenstofffaserverstärktem Polymer (CFRP = Carbon Fibre Reinforced Polymer) ([3],[89],[91])) angewendet. Dabei werden höher Harmonische der Wellengrundfrequenz dargestellt.

3.4.2 Luftgekoppeltes Ultraschallecho

Während schon 1997 durch Jones et al. [41] gezeigt werden konnte, dass luftgekoppeltes Ultraschallecho in der monostatischen Prüfkopfanzordnung (Impuls-Echo) in der Medizin z.B. zur Evaluierung von verbrannter Haut und entzündetem Untergrund bei Brandopfern eingesetzt werden kann, war dies in der Werkstoffprüfung aufgrund der größeren Impedanzen der Materialien in dieser Prüfkopfanzordnung bei normalem Luftdruck nicht möglich. Hier bedient man sich der Echoanordnungen mit getrenntem Sende- und Empfangsprüfkopf.

1997 wendeten z.B. Schindel et al. [79] erstmals die ACU-Tandemanordnung mit Lamb-Wellen (siehe Abschnitt 2.2) (Einfallswinkel = $\sim 7^\circ$; Mittenfrequenz = 600 kHz) zur Detektion von Bindefehlern bei zwei verklebten, sich überlappenden Aluminiumblechen von jeweils 1,5 mm Dicke an. Dabei kamen breitbandige kapazitive Prüfköpfe zum Einsatz. Mit einer mittig zwischen Sender und Empfänger angebrachten Abschirmung wurde dabei die an der Oberfläche reflektierte Luftwelle und die direkt vom Sender zum Empfänger laufende Luftwelle vom Empfänger ferngehalten. Untersuchungen in dieser Anordnung wurden auch 2006 von Siddiolo und Maev [83] an historischen Kunstgemälden durchgeführt.

1999 stellten Baldwin et al. [2] ein Echo-Messsystem für Faser-Verbundwerkstoffe vor, das aus einem Nd:YAG-Laser als Sender und einem ACU-Empfangsprüfkopf besteht. Ein normal zum Körper ausgerichteter Laserstrahl wird durch eine konkave Linse aufgefächert, der nachfolgend ein Gitter beleuchtet. Dies führt zu Linienquellen auf dem Körper, welche eine schmalbandige Oberflächenwelle erzeugen. Ein unter dem optimalen Einfallswinkel ausgerichteter ACU-Prüfkopf empfängt die Oberflächenwelle. Oberflächennahe Fehler im Körper beeinflussen die Oberflächenwelle und können somit lokalisiert werden.

Sehr interessant ist der 1999 von Gebhardt ([27],[28]) vom Fraunhofer IZFP-Saarbrücken vorgestellte Ansatz. Der ACU-Prüfkopf ist bei diesem in eine Druckkammer eingebaut, die zum Körper hin geöffnet ist. Die Luft in der Druckkammer wird auf ungefähr 10 bar komprimiert, wodurch eine 10-fach höhere akustische Impedanz der Druckluft erreicht wird und folglich der Energietransfer in den Körper um den Faktor 100 zunimmt (jeweils Faktor 10 an den beiden Grenzflächen Wandler/Druckluft und Druckluft/Körper). Durch Ausnutzen des

"hydrodynamischen Paradoxons" gleitet der Schuh auf einem wenige zehntel Millimeter dicken Luftpolster. In die Druckkammer wird fortlaufend Luft eingeleitet, um den Druck aufrecht zu erhalten. Entstehende Luftverwirbelungen in der Druckkammer führen allerdings zu einer Störung des Luftschallfeldes, dessen Probleme bisher nicht gelöst werden konnten.

2000 erwähnte Haufler [35] den theoretischen Ansatz, mittels Stapelung durch die Common-Midpoint-Methode Ultraschallreflexionen in Beton mit luftgekoppeltem Ultraschall zu empfangen.

Arbeiten mit der bistatischen Prüfkopfanzordnung mit zwei kapazitiven ACU-Prüfköpfen (Mittelfrequenz 300 kHz) wurden 2001 von Castaings und Hosten [13] zur Untersuchung von Plattenwellen (Lamb-Wellen und geführte horizontal polarisierte Transversalwellen) an 3,2 mm dickem anisotropen Verbundmaterial (Glasfasern in Epoxidharzmatrix) durchgeführt. Dabei wurden erstmals die gemachten Experimente mit numerischen Lösungen verglichen.

Unter hohem Gasdruck sind hingegen auch monostatische Ultraschallecho-Messungen leicht möglich. Bhardwaj [7] zeigte z.B. 2004, dass bei Verwendung eines piezoelektrischen 3 MHz ACU-Prüfkopfes und bei einem Luftdruck von 50 bar mehr als 10 Vielfachreflexionen in einem 10 mm dicken Stahlprobekörper bei monostatischer Messung auftreten. Selbst bei weniger als 7 bar sollen sie noch erkennbar sein [53].

Hillger et al. [38] konnten 2004 die einseitige Prüfung mit Ankopplung über Luft an einer Lavabasaltplatte vorzeigen. Die piezoelektrischen 100 kHz ACU-Prüfköpfe wurden V-förmig als Tandem angeordnet und automatisiert über die Platte verfahren. Innen liegende Risse zeichneten sich durch eine Absenkung des Transversalwellen-Rückwandechos um 8 dB ab. Ein Prüfkopfwagen wurde für vor Ort Messungen vorgestellt. Dieser Ansatz sowie die Ergebnisse waren die Grundlage für die vorliegende Arbeit.

Dass auch Schweißnähte in Aluminiumblechen mit Lamb-Wellen geprüft werden können, haben Arone et al. [1] 2006 nachgewiesen. Die Lamb-Welle wurde durch einen senkrecht auf die Oberfläche des 4,4 mm dicken Aluminiumblechs ausgerichteten Nd:YAG Laserstrahl erzeugt und nach Durchlaufen der Schweißnaht von einem kapazitiven ACU-Prüfkopf unter einem bestimmten Einfallswinkel empfangen.

2006 stellten Kažys et al. ([42],[43]) eine neue ACU-Echoanordnung zur Detektion und Visualisierung von Inhomogenitäten in Kompositen vor. Der Sendeprüfkopf wird so ausgerichtet, dass er Lamb-Wellen im Material generiert. Der Empfangsprüfkopf erhält denselben Einfallswinkel gleicher Orientierung wie der Sender. Trifft die Lamb-Welle auf eine Störstelle im Material, so wird sie unter anderem reflektiert und strahlt Wellen in die Luft in Richtung des Empfängers ab. Von Vorteil ist, dass der Empfänger durch diese Anordnung wesentlich unempfindlicher gegen die Luftwellen von den Rändern des Senders und die Oberflächenreflexionen ist, als wenn der Empfänger zum Sender ausgerichtet wäre.

Ebenfalls 2006 zeigten Pietroni und Revel [63] Untersuchungen in Echoanordnung an kohlenstofffaserverstärkten Polymer-Lamellen für die Luftfahrt. Dabei haben sie neben der Tandemanordnung mit gleichen Einfallswinkeln von Sende- und Empfangsprüfkopf auch als erste die Delta-Konfiguration für luftgekoppelten Ultraschall angewendet. Die Delta-Konfiguration entspricht der Tandemanordnung,

bei der der Einfallswinkel des Sendeprüfkopfes 0° und der des Empfangsprüfkopfes ungleich 0° ist.

Zur Untersuchung der Materialeigenschaften einer Platte können fokussierte luftgekoppelte Ultraschallwellen verwendet werden. Dazu regt nach Solodov et al. (2006) [86] ein fokussierender ACU-Prüfkopf kontinuierliche Oberflächen- oder Lamb-Wellen in einem Bauteil an. Ein Laservibrometer tastet die Oberfläche ab. Man visualisiert dadurch das Wellenfeld an der Oberfläche des Bauteils, das wiederum Rückschlüsse auf die Materialeigenschaften zulässt.

Im Rahmen des Projektes der DFG Forschungsgruppe FOR384, in der auch die vorliegende Arbeit mit eingebunden ist, zeigten Schickert et al. [74] 2006 eine automatisierte flächige Tandemmessung (100 kHz) an einer 60 mm dicken Bürgersteigplatte. Eine innenliegende luftgefüllte Plastikröhre mit einem Durchmesser von 17 mm und 23 mm Überdeckung konnte visualisiert werden.

3.5 Fazit

Der Stand der Technik zeigt, dass luftgekoppelter Ultraschall durch die Entwicklung neuer leistungsfähiger ACU-Prüfköpfe in den letzten paar Jahren vor allem in der Luftfahrt zu einem wichtigen Werkzeug heranwächst.

In der ZfP von Betonbauteilen gibt es bisher nur wenige Untersuchungen mit luftgekoppeltem Ultraschall, obwohl das Einsatzpotenzial durchaus vorhanden ist. Wo eine beidseitige Zugänglichkeit des Betonbauteils gegeben ist (z.B. Stützen oder Unterzüge), bietet die Transmissionsanordnung aufgrund ihrer einfachen Handhabung vielversprechende Möglichkeiten.

Ein funktionierendes luftgekoppeltes Ultraschallecho-Verfahren für Betonbauteile existiert bisher jedoch noch nicht. Der 1999 von Gebhardt ([27],[28]) gemachte Ansatz eines Druckluftgleitschuhs für Betonmessungen in der monostatischen Anordnung hat bisher zu keinem Erfolg geführt. Folglich bleibt nur die Prüfkopf-anordnung mit getrenntem Sende- und Empfangsprüfkopf. Prinzipiell kommen dabei je nach Einfallswinkel unterschiedliche Wellenarten in Frage, nämlich Lamb-Wellen, Longitudinalwellen oder Transversalwellen.

Die erste Möglichkeit wäre Lamb-Wellen (Plattenwellen) einzusetzen, wie es z.B. 1997 Schindel et al. [79] an Aluminium zeigten. Mit diesen Wellen dürfte man auch an Beton die höchste Signalamplitude erhalten. Sie würden sich allerdings nur für sehr dünne Platten eignen, bei denen die Plattendicke in der Größenordnung der Wellenlänge liegt. Nach den Ausführungen in Abschnitt 3.4 sollte z.B. für eine optimale Lamb-Wellen-Anregung bei einer angenommenen Mittenfrequenz von $f = 85 \text{ kHz}$ und einer Schallgeschwindigkeit der Transversalwelle in Beton von $c_T = 2500 \text{ m/s}$ die Plattendicke $d \leq 4,7 \text{ mm}$ sein. Da jedoch Betonplatten normalerweise um ein Vielfaches dicker sind, ist im Regelfall ausgeschlossen, dass sich Lamb-Wellen in einem Betonbauteil ausbilden. Nachteilig ist auch, dass die Betondicke näherungsweise bekannt sein muss, damit die richtige Mittenfrequenz und der richtige Prüfkopf gewählt werden kann. Hinzu kommt die Komplexität der Lamb-Wellen. Auf diese wurde bereits in Abschnitt 2.2 und 3.4 eingegangen. So weisen Lamb-Wellen besonders im niederfrequenten Bereich ein ausgesprochen dispersives Verhalten auf, das heißt, dass die Phasengeschwindigkeit stark von der Frequenz abhängt. Von der Schallgeschwindigkeit ist wiederum der Einfallswinkel zur

Erzeugung der Lamb-Welle abhängig. Außerdem ist mit Lamb-Wellen keine absolute Dickenmessung möglich.

Es verbleibt der Ansatz mit Hilfe von Longitudinalwellen oder Transversalwellen Rückwandechos oder Reflexionen aus dem Inneren zu erhalten. Bei Transversalwellen muss eine Modenkonzersion an der Körperoberfläche auftreten, wo der Schall in das Betonbauteil eindringt und wieder austritt. Prinzipiell besteht noch die Möglichkeit, dass auch Wellenkombinationen verwendet werden, bei denen am Reflektor eine Modenkonzersion auftritt oder aber, dass man Vielfachechos auswertet.

Diesem Ansatz kommt die 2004 gezeigte Untersuchung von Hillger et al. [38] an einer Lavabasaltplatte am nächsten. Dort wurde ein Transversalwellen-Rückwandecho erzeugt. An den Stellen der innenliegenden Nuten zeichnete sich eine Amplitudenabnahme ab. Zur Erzeugung der Transversalwelle musste der Sendee- und der Empfangsprüfkopf in einem bestimmten Einfallswinkel zur Platte schräg positioniert werden. Zwischen die beiden Prüfköpfe wurde eine Schallabschirmung angeordnet.

Aufbauend auf dem Ansatz von [38], ist das Ziel der vorliegenden Arbeit mit Hilfe systematischer Untersuchungen zu zeigen, ob dieses Verfahren auch für Betonbauteile geeignet ist. Dies soll vor allem durch die Visualisierung der Wellenausbreitung in Abhängigkeit der verschiedenen Einflussparameter erreicht werden, um die auftretenden Wellenarten zuzuordnen zu können.

Abgrenzung vom luftgekoppelten Ultraschallecho- zum Radarecho-Verfahren bezüglich der Prüfaufgaben

Bisher ist es nur möglich, große Bauteilflächen von mehreren 100 m² mit dem Radar-Verfahren in Echoanordnung zu untersuchen. Die physikalischen Zusammenhänge der elektromagnetischen Radarwellen sind jedoch andere als die der akustischen Ultraschallwellen. Somit ist es nicht verwunderlich, dass die beiden Verfahren auch für unterschiedliche Prüfaufgaben geeignet sind.

Der Bereich der Anwendungsgebiete für ein funktionierendes Ultraschallecho-Verfahren über Luftankopplung wird deutlich, wenn einem die Grenzen des ebenfalls störungsfreien Radar-Echo-Verfahrens bekannt sind. Während bei akustischen Wellen die akustische Impedanz $Z = c \cdot \rho$ zweier angrenzender Materialien für den Reflexionsfaktor R entscheidend ist, ist dies bei Radarwellen die elektrische Impedanz. Der Reflexionsfaktor einer Radarwelle, die in Medium 1 senkrecht auf ein Medium 2 auftrifft, berechnet sich zu

$$R = \frac{\sqrt{\epsilon_{r1}} - \sqrt{\epsilon_{r2}}}{\sqrt{\epsilon_{r1}} + \sqrt{\epsilon_{r2}}}, \quad \text{Gl. 3.1}$$

wobei ϵ_{r1} und ϵ_{r2} die relativen Dielektrizitätszahlen in Medium 1 und Medium 2 sind. Somit eignet sich Radar optimal, um metallische Bewehrung zu orten, da diese die Wellen total reflektiert. Andererseits verhindert eine engmaschige Bewehrung mit einem Maschenabstand $\leq \sim 80$ mm tiefer liegende Reflexionen von Radarwellen. Der Einfluss von Bewehrung auf tiefer liegende Ultraschallreflexionen ist hingegen gering, obwohl auch die Bewehrung detektiert wird.

Während Ultraschallwellen selbst an dünnen Luftschichten von $1\ \mu\text{m}$ (z.B. bei Ablösungen) nahezu total reflektiert werden, sind diese für Radar praktisch unsichtbar. Auch dünne Luftschichten von einigen Millimetern führen nur unter bestimmten Randbedingungen zu einem detektierbaren Echo.

Eine Dickenbestimmung einer Betonplatte gelingt mit einer praxistypischen 1,5 GHz Radarantenne ($\lambda \approx 67\ \text{mm} - 82\ \text{mm}$) unter günstigen Bedingungen (keine engmaschige Bewehrung, trockener Beton, nur Luft und kein Gründungsmaterial unter der Platte (z.B. Decke)) bis maximal $\sim 500\ \text{mm}$. Optimal wäre eine unter der Betonplatte liegende Metallplatte, um die Dicke zu messen – ein Fall, der jedoch selten in der Praxis vorkommt. Ist die Platte auf Sand, Erde, Schotter, etc. gegründet, kann eine Dickenbestimmung auch bei dünnen Platten von wenigen Zentimetern sogar unmöglich werden. Dies hängt stark von der Feuchtigkeit in den angrenzenden Materialien ab. Sie hat einen großen Einfluss auf die relative Dielektrizitätszahl des Materials.

Die Eindringtiefe von Radar vermindert sich bei feuchtem Beton. In den ersten paar Tagen an frisch betoniertem Beton dringt Radar aufgrund der Feuchtigkeit kaum in den Beton ein [15]. Auf Ultraschall ist der Einfluss der Feuchtigkeit wesentlich geringer.

Praxisbeispiele

Einige Praxisbeispiele sollen mögliche Anwendungen von luftgekoppeltem Ultraschallecho zeigen, wo es bisher keine Möglichkeiten für eine zerstörungsfreie Prüfung gibt. Dies sind Anwendungen, wo das Radar-Echo-Verfahren nicht geeignet ist und die Messfläche für bisherige Ultraschallecho-Verfahren zu groß ist.

Häufig sind Bauwerkspläne nicht auffindbar. Vor einer Nutzungsänderung eines Gebäudes gilt es die Bauwerksgeometrie zu erfassen. Die Dicke der Fundamentplatten soll gemessen und die Fundamentstreifen lokalisiert werden.

Weitere Prüfaufgaben wären beispielsweise:

- Lokalisierung von Minderdicken z.B. vor der Abnahme eines Bauwerkes
- Lokalisierung von unterseitigen Rissen in Fundamentplatten
- Ermittlung des Verpresszustandes von Vorspanngliedern
- Detektion von Ablösungen von z.B. Spritzbetonschichten zum Schutze von tragenden Betonbauteilen
- Baubegleitende Ermittlung der Verteilung der Beton- oder Verdichtungsqualität

Neben Beton könnten auch die mehrschichtigen Asphaltsschichten von Autobahnen auf Hohlräume und Ablösungen untersucht werden. Beim Überfahren dieser Stellen durch den laufenden Verkehr kommt es leicht zum Herausreißen von Asphaltstücken. Dadurch bilden sich in der Fahrbahn große, tiefe Krater, die die Verkehrssicherheit gefährden, bzw. zu Sperrungen von Autobahnabschnitten führen.

Ein besonderes Gefahrenpotential diesbezüglich liegt auf Flugzeuglandebahnen vor. Asphaltstücke, die von den Reifen gegen das Flugzeug geschleudert werden, können verhängnisvolle Unfälle hervorrufen.

Durch frühzeitiges Lokalisieren solcher Stellen könnten dann rechtzeitig Restaurierungs- und Instandhaltungsmaßnahmen getroffen werden.

Zudem stellt solch ein Verfahren ein wertvolles Hilfsmittel für eine genauere Straßenzustandsbewertung nach objektiven Kriterien dar.

Anhand eines einzelnen Verfahrens ist oftmals keine eindeutige Beurteilung der Messdaten möglich. In diesem Zusammenhang bietet die Verfahrenskombination von Ultraschall mit Radar eine erhöhte Aussagekraft.

4 Messapparaturen, Messunsicherheiten und Allgemeines zur Ergebnisdarstellung

4.1 Allgemeiner Aufbau einer Luftultraschallapparatur

Im Folgenden wird der allgemeine Aufbau einer Messapparatur für luftgekoppelten Ultraschall, wie er in Abbildung 4.1 dargestellt ist, erläutert.

Zunächst wird ein Puls mit einer gewählten Form erzeugt. Dies kann z.B. mit Hilfe eines Funktionsgenerators geschehen. Mit einem Leistungsverstärker wird der Puls auf die gewünschte Sendespannung gebracht. Der Sendeprüfkopf wandelt die ankommenden elektrischen Spannungen mittels eines Ultraschallwandlers (z.B. durch ein Piezokristall) in mechanische Spannungen um. Die abstrahlenden Schallwellen durchdringen den Körper und werden an den Grenzflächen reflektiert. Sie erreichen den Empfangsprüfkopf, an dem die mechanischen Spannungen zurück in elektrische Spannungen umgewandelt werden. Aufgrund des großen Spannungsverlustes muss das Signal vor der Digitalisierung durch einen Analog/Digital-Wandler (ADC) mit einem rauscharmen Empfangsverstärker angehoben werden. Der Empfangsverstärker wird oftmals zweistufig ausgeführt. So wird möglichst direkt nach dem Empfangsprüfkopf ein Vorverstärker verwendet, der das Signal um einen festen Betrag verstärkt, um weitere Störungen durch lange Kabel zum Rest der Apparatur zu vermeiden. Ein nachträglich variabel einstellbarer Hauptverstärker kann dann z.B. im PC-Gehäuse untergebracht sein. Sofern notwendig, wird das Signal noch vor dem A/D-Wandler analog gefiltert. Das digitalisierte Signal wird abschließend im PC gespeichert, bearbeitet und dargestellt.

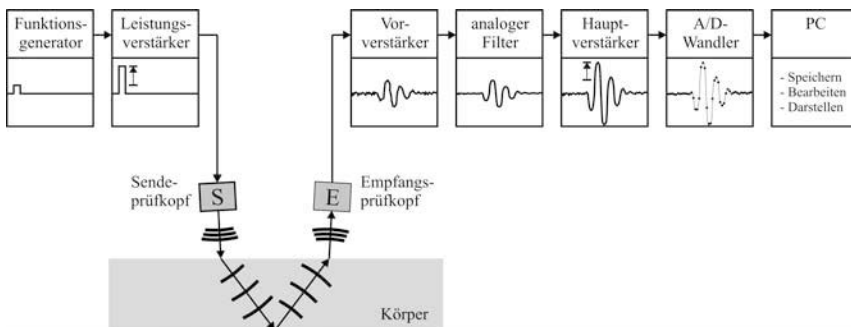


Abbildung 4.1 Allgemeiner Aufbau einer Apparatur für luftgekoppelten Ultraschall

4.2 Verwendete Messapparaturen und Auswertesoftware

Für die in dieser Arbeit gezeigten Untersuchungen wurden zwei verschiedene Messapparaturen verwendet, die im Folgenden vorgestellt werden. Ihr Aufbau entspricht dem in Abbildung 4.1.

Die erste Messapparatur setzt sich aus Einzelkomponenten zusammen und wird für den ersten Teil der Untersuchungen (Abschnitt 5, 6 und 7) verwendet. Sie enthält zwei Variationen:

Bei der ersten Variante (Messapparatur „Manuell“) kommen als Sender und Empfänger ACU-Prüfköpfe desselben Typs zum Einsatz, die manuell von Messpunkt zu Messpunkt bewegt werden.

Bei der zweiten Variante (Messapparatur „LVIB“) wird als Empfänger statt einem ACU-Prüfkopf ein Laservibrometer (abgekürzt LVIB) mit Spiegelscanner und zugehörigen Controllern verwendet.

Die zweite Messapparatur „Luftscanner“ ist eine Weiterentwicklung der ersten Messapparatur „Manuell“ und kommt für die in Abschnitt 8 durchgeführten automatisierten Messungen mit luftgekoppelten Ultraschallprüfköpfen in bistatischer Anordnung und Tandemanordnung zum Einsatz.

Auswertesoftware

Mit Ausnahme der 3D-SAFT-Rekonstruktionen erfolgt die Signalbearbeitung, Darstellung und Auswertung der Messdaten über ein eigens in LabVIEW entwickeltes Analyseprogramm namens „US-Analyse“. Neben all den notwendigen Bearbeitungsschritten bietet es zusätzlich den Vorteil sehr große Datensätze direkt miteinander vergleichen zu können sowie mehrere relevante Schnittbilder gleichzeitig zu betrachten. Das Programm ist im Anhang A.1 näher erläutert.

Die in Abschnitt 8.3.2.2 berechneten 3D-SAFT-Rekonstruktionen nach dem in Abschnitt 2.9 erläuterten Prinzip sowie deren Darstellungen werden mit dem vom Fraunhofer „Institut Zerstörungsfreie Prüfverfahren“ (IZFP) in Saarbrücken von der „Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V.“ (FhG) entwickelten Programm „Muse-BAM (Version 1.5)“ vorgenommen. Es ist speziell auf die Besonderheiten der zerstörungsfreien Prüfung an Beton angepasst. Nach Durchführung der Rekonstruktion bietet das Programm unter anderem die Möglichkeit, statt der rekonstruierten Schnittbilder Projektionen von diesen zu berechnen und darzustellen. Eine Projektion sei hier als eine gemittelte Summe von Schnittbildern innerhalb eines Bereiches in eine der drei Raumrichtungen x , y oder z zu verstehen (räumliche Mittelung).

4.2.1 Messapparatur „Manuell“ und „LVIB“

Abbildung 4.2 zeigt die Messapparatur „Manuell“ und „LVIB“ mit ihren Komponenten. Der Name, der Hersteller und die wichtigsten Merkmale der Komponenten sind in Tabelle 4.1 zusammengefasst. Der Empfangsverstärker „VV2“ (Eigenbau BAM) wurde nur bei starker Signalschwächung zusätzlich zum Vorverstärker „AirTech 4027-100“ eingesetzt.

Das Laservibrometer misst über einen Helium-Neon-Laser die Geschwindigkeit der Teilchenschwingung (Schnelle) an einer Oberfläche in Richtung des Laserstrahls. Dazu wird intern das Prinzip der Dopplerfrequenzverschiebung ausgenutzt. Bei dieser entsteht durch Überlagerung von Messstrahl und Referenzstrahl eine Intensitätsmodulation, deren Frequenz proportional der Schwinggeschwindigkeit des Messpunktes auf dem Messobjekt ist [64].

Über einen Spiegelscanner kann der Laserstrahl zum gewünschten Messpunkt hingelenkt werden. Für beide Einheiten werden Controller benötigt, die über ein LabVIEW-Programm ebenfalls namens „LVIB“, das an der BAM entwickelt wurde, gesteuert werden. Mit Hilfe des Programms kann eine ebene Messfläche automatisiert mit zueinander äquidistanten Messpunkten abgerastert werden. Zur Messung von anderen Schwingungskomponenten, wie z.B. zur Visualisierung von Wellenfronten in Abschnitt 7, kann das Laservibrometer auch schräg zur Körperoberfläche ausgerichtet werden [59]. Dabei werden die Messpunkte weiterhin so angesteuert, dass sie äquidistant zueinander sind. Bei der schrägen Messung an Beton ist zur Rückstreuung des Laserstrahls zusätzlich eine auf der Messfläche aufgeklebte retroreflektierende Folie notwendig.



Abbildung 4.2

Komponenten der verwendeten Messapparaturen „Manuell“ und „LVIB“

Komponente	Name	Hersteller	Merkmale
Funktions-generator	HP 33120A	Hewlett Packard	beliebige Pulsform generierbar
Leistungsverstärker	Model 700 A1	Amplifier Research	stufenlose Verstärkung der Sendespannung
ACU-Prüfkopf	NCG100-S63	Ultran	leistungsstark, nominal 100 kHz, Mittenfrequenz = 85 kHz, Bandbreite (-6 dB) = 22 kHz (25 %)
Laservibrometer	OFV-303	Polytec	berührungsloses Messen, Prinzip: Doppler-Effekt
Controller für Laservibrometer	OFV-3001	Polytec	Geschwindigkeitsdecoder zur Messung der Geschwindigkeit an einer Oberfläche, E = 5 mm/s/V, Bandbreite: 0-250 kHz
Spiegelscanner		Polytec	Winkelbereich = $\pm 20^\circ$
Controller für Spiegelscanner	OFV-042	Polytec	Winkelauflösung = $0,01^\circ$ (12 Bit)
Vorverstärker	AirTech 4027-100	Dr.-Hillger	extrem rauscharmer Vorverstärker speziell für 100 kHz Prüfköpfe mit Bandpassfilter von 73 – 133 kHz (bei -3 dB), Verstärkung wahlweise 26 oder 46 dB, Stromversorgung über AirTech 4090
Empfangsverstärker	VV2	BAM	extrem rauscharm, Verstärkung 750 bis 10000 fach
Oszilloskop	TDS 420	Tektronix	4-Kanal, A/D-Wandler mit je nach Einstellung min. 12 Bit Amplitudenauflösung, averages
PC			Portable, Pentium III, Laservibrometersteuerung und Datenaufnahme über LabVIEW

Tabelle 4.1 Messapparatur „Manuell“ und „LVIB“; zusätzliche Komponenten für die Messapparatur „LVIB“ sind gelb hinterlegt

In Abbildung 4.3 ist das gemessene Echoschallfeld in Luft an einer Kugel der verwendeten ACU-Prüfköpfe NCG100-S63 der Firma „Ultran“ [6] zu sehen. Es handelt sich bei diesen Prüfköpfen um ungedämpfte Planarprüfköpfe (natürliche Fokussierung). Der Wandler hat eine quadratische Fläche mit einer Kantenlänge von 63 mm. Nach Abbildung 4.3 ergeben sich folgende Fokussdurchmesser B und halbe Öffnungswinkel zur Schallachse γ bei -6 dB bzw. -12 dB Amplitudenabnahme für das Echo und das Freifeld:

$$\begin{aligned}
 B_{-6\text{dB}(\text{Echo})} &= 18 \text{ mm}, & \gamma_{-6\text{dB}(\text{Echo})} &= 1,9^\circ \\
 B_{-12\text{dB}(\text{Echo})} &= B_{-6\text{dB}(\text{Freifeld})} = 43 \text{ mm}, & \gamma_{-12\text{dB}(\text{Echo})} &= \gamma_{-6\text{dB}(\text{Freifeld})} = 4,6^\circ
 \end{aligned}$$

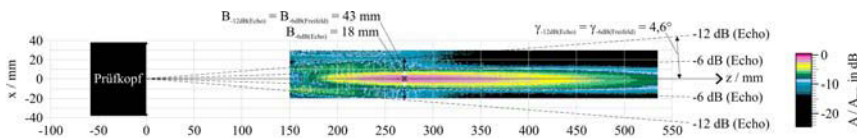


Abbildung 4.3 Gemessenes Schallfeld der verwendeten Luftultraschallprüfköpfe NCG100-S63 der Firma Ultran [6] in Luft für Echo an einer Kugel; Fokusspunkt bei $z = 270 \text{ mm}$; Die Messung wurde von der Firma „Ing. Büro Dr. W. Hillger“ durchgeführt.

Der Fokuspunkt liegt bei ungefähr $z = 270$ mm. Die Prüfköpfe wurden mit einer Nominalfrequenz von 100 kHz ausgeliefert. Die Resonanzfrequenz der Prüfköpfe liegt allerdings bei ~ 85 kHz mit einer Bandbreite von ~ 22 kHz. Das Frequenzspektrum ist in Abbildung 5.1 (d) abgebildet.

4.2.2 Messapparatur „Luftscanner“

Um luftgekoppelten Ultraschall automatisiert an Beton anzuwenden, wurde das auf PC-Karten basierende Messsystem „USPC 4000 AirTech“ vom Ing. Büro Dr. W. Hillger ([38],[12]) im Rahmen eines Großgerätes beschafft. Um diese Apparatur für die Messungen an Beton zu nutzen, wurde ein an der BAM entwickelter „Saugscanner“ für Echomessungen mit ACU-Prüfköpfen umgebaut. Im Rahmen der Arbeit wurde eine spezielle Prüfkopfhalterung entwickelt. Das Gesamtsystem ist in Abbildung 4.4 dargestellt und trägt den Namen Messapparatur „Luftscanner“.

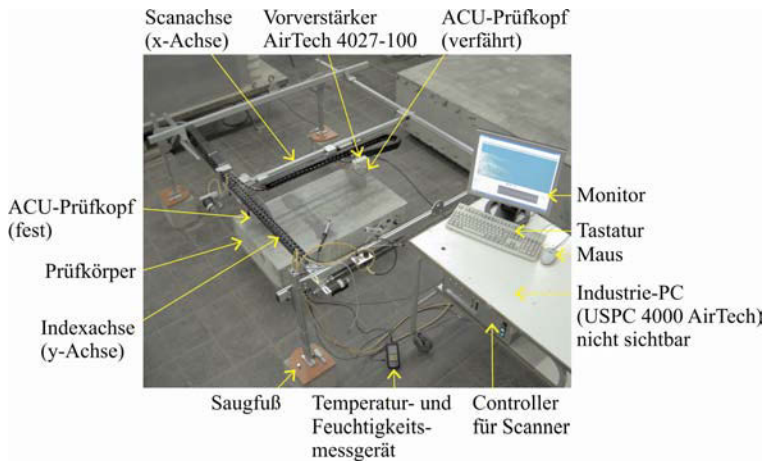


Abbildung 4.4 Messapparatur „Luftscanner“

4.2.2.1 Messsystem „USPC 4000 AirTech“

Das Messsystem „USPC 4000 AirTech“ besteht aus einem Industrie-PC, in dem alle notwendigen Ultraschallkomponenten als PC-Karten eingebaut sind (Abbildung 4.5 links). Die zwei 85 kHz ACU-Prüfköpfe und der Vorverstärker „AirTech 4027-100“ aus der Messapparatur „Manuell“ (siehe Tabelle 4.1) werden auch für diese Apparatur verwendet. Über die Software „Hillgus for Windows“ wird die gesamte Apparatur gesteuert (Abbildung 4.5 rechts).



Abbildung 4.5 „USPC 4000 AirTech“ vom Ing. Büro Dr. W. Hillger: Industrie-PC mit PC-Karten (links), Steuersoftware „Hillgus for Windows“ (rechts), Bild entnommen aus [38]

Über „Hillgus for Windows“ kann eine Messfläche definiert werden, die dann von dem Scanner in einer kontinuierlichen Fahrt abgetastet wird. Es können selbst definierte Rechteckpulsfolgen generiert werden. Bei den hier vorgestellten Messungen wird ein einzelner Rechteckpuls verwendet. Vor- und Hauptverstärker lassen eine Gesamtverstärkung von bis zu 90 dB zu. Für die Digitalisierung des verstärkten Empfangssignals kommt eine 12 Bit ADC-Karte mit einer maximalen Abtastfrequenz von 10 MHz zum Einsatz. In dieser Arbeit wurde eine Abtastfrequenz von 2 MHz eingestellt, das entspricht einer Zeitschrittweite von $\Delta t_{\text{sample}} = 0,5 \mu\text{s}$. Alle Einstellungen werden zusätzlich zu den Messdaten in der Messdatei als Header abgespeichert. Das Programm „Hillgus for Windows“ bietet weitere Möglichkeiten, wie z.B. FFT, digitale Filterung und Blendenfunktionen zur Laufzeit- und Amplitudenmessung.

4.2.2.2 Saugscanner

An den Industrie-PC sind ein ISEL-Controller und ein speziell von der BAM entwickelter 2-Achsen-Saugscanner angeschlossen. Der „Saugscanner“ wurde an der BAM entwickelt, um Messungen an Betonflächen von einigen Quadratmetern auf der Baustelle schnell durchführen zu können. Er kann an horizontalen wie auch an Wänden und Decken über Kopf angebracht werden. Mittels eines Kompressors wird über Unterdruck an den vier Saugfüßen der Scanner an der Betonfläche gehalten. Das System erwies sich bereits bei Messungen mit zwei parallel laufenden koppelmittelfreien Transversalwellen-Punktkontaktprüfkopffarrays A1220 von der Firma ACSYS [82] als äußerst effektiv [39]. Der Scanner verfügt über zwei unabhängige Achsen. Diejenige Achse, an der die Prüfköpfe angebracht sind, wird als Scanachse bezeichnet, da die Prüfköpfe durch sie quasi kontinuierlich verfahren werden. Die Scanachse ist an der Indexachse angebracht und wird bei einer flächigen Messung schrittweise auf der Indexachse verfahren. In der vorliegenden Arbeit ist die Scanachse immer die x-Achse und die Indexachse die y-Achse.

4.2.2.3 Prüfkopfhalterung (Verstell- und Kalibriereinheit)

Eine wesentliche Rolle kommt der im Rahmen der Arbeit speziell für die ACU-Prüfköpfe neu entwickelten Prüfkopfhalterung am „Saugscanner“ zu, die einer komplexen Konstruktion bedarf. Da sie eine ganze Reihe fein verstellbarer Freiheitsgrade zulässt, die für die automatisierten Messungen in Abschnitt 8 unerlässlich sind, wird sie im Folgenden auch als Verstell- und Kalibriereinheit bezeichnet. Die Untersuchungen mit Hilfe der Messapparatur „Manuell“ und „LVIB“ in Abschnitt 5, 6 und 7 waren unter anderem dazu notwendig die Anforderungen an

die Verstell- und Kalibriereinheit definieren zu können, die in Tabelle 4.2 zusammengefasst sind.

Anforderungen an die Verstell- und Kalibriereinheit	Begründung
wenig Masse	damit sich die Achsen des Saugscanners nicht tordieren und verbiegen
kleine Verstell- und Kalibrierkörper	aufgrund des Platzmangels des Aufbaus; für die Bewegungsfreiheit und für den Zugang zu den Verstell- und Kalibrierkörpern
deformationsarm	wegen der Anfälligkeit des Verfahrens bei kleinen ungewollten Positionsänderungen der Prüfköpfe
mehrere verstellbare Freiheitsgrade der Kalibrierkörper mit Ablesemöglichkeit	um die Prüfköpfe exakt und variabel zueinander positionieren und ausrichten zu können
Kalibrierkörper dürfen sich während einer Scannfahrt nicht verstellen	
Kalibrierkörper dürfen nur ein minimales Spiel aufweisen	um eine diesbezügliche Messunsicherheit gering zu halten; Reproduzierbarkeit
Kalibrierkörper müssen jederzeit zugänglich und verstellbar sein	um ohne Umbauten die Prüfköpfe in ihrer Position und Ausrichtung zu ändern und somit zusätzliche Messunsicherheiten auszuschließen
Schallabschirmungen klein, schmal, unabhängig voneinander, verstell- und abnehmbar	schmal, damit sich beide Prüfköpfe dicht aneinander fahren lassen
bistatische Prüfkopfanzordnung	zur Messung der parameterabhängigen Wellenausbreitung
Tandemanordnung	für Anwendungsmessungen

Tabelle 4.2 Anforderungen an die Verstell- und Kalibriereinheit (Prüfkopfhalterung) für den Saugscanner

Aufgrund der zahlreichen Anforderungen bestand die Schwierigkeit darin, sie miteinander abzuwägen und einen Kompromiss für die bestmögliche Konstruktion zu finden. Das Resultat ist die in Abbildung 4.6 dargestellte Verstell- und Kalibriereinheit, welche alle Anforderungen aus Tabelle 4.2 erfüllt. Die Konstruktion ist aus Aluminium, leicht und sehr steif. Alle Einstellungen werden manuell vorgenommen.

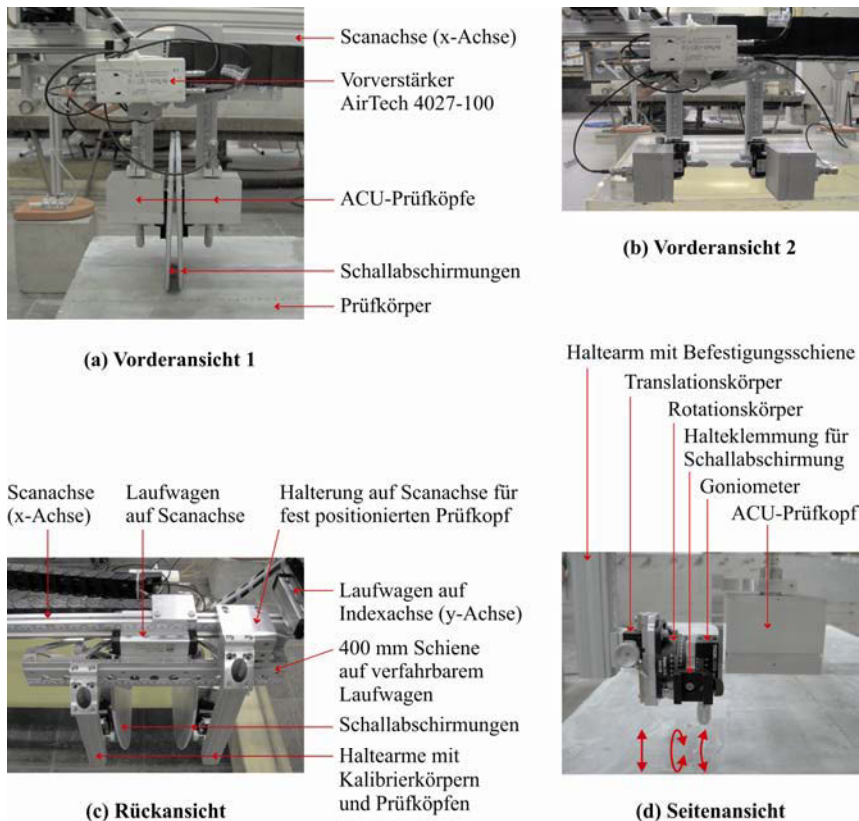


Abbildung 4.6 Ansichten der Verstell- und Kalibriereinheit der luftgekoppelten Ultraschallprüfköpfe für automatisierte Messungen mit der Messapparatur „Luftscanner“: Vorderansicht 1 (a), Vorderansicht 2 (Prüfköpfe zueinander gedreht für bistatische Transmissionsmessung durch Luft, um die Gesamtvorlaufzeit des Systems zu messen) (b), Rückansicht (hier bei bistatischer Prüfkopfanzordnung) (c), Seitenansicht (d)

Freiheitsgrade

Ein Teil der Freiheitsgrade jedes Prüfkopfes ergibt sich aus dem in Abbildung 4.6 (d) gezeigten Translations- und Rotationskörper sowie dem Goniometer. Die Prüfköpfe sind so über dem jeweiligen Goniometer platziert, dass dessen Rotationspunkt mit dem Zentrum auf der Außenoberfläche der Anpassungsschicht des Prüfkopfes zusammenfällt. Dieser Punkt ist auch der gemeinsame Rotationspunkt eines Prüfkopfes von Rotationskörper und Goniometer. Der Vorteil dieser Konstruktion liegt darin, dass bei Änderung des Einfallswinkels der zur Körperoberfläche senkrechte Abstand vom Prüfkopf zur Körperoberfläche und der Abstand vom Sendezum Empfangsprüfkopf immer derselbe bleibt. Lediglich der Schalleintritts- und Schallaustrittspunkt auf der Grenzfläche Luft/Beton verschiebt sich, wodurch sich auch der Luftweg und dessen Länge ändern. Diese sind jedoch über einfache trigonometrische Beziehungen zu berechnen.

Ablesegenauigkeiten

Der Translationskörper hat eine Ablesegenauigkeit von 0,1 mm. Das Goniometer ist hochfein einstellbar. Der Rotationskörper lässt jeden Winkel zu. Aufgrund seiner geringen Abmessungen besitzt er nur eine Ablesegenauigkeit von $0,5^\circ$ und hat ein Spiel von ebenfalls $0,5^\circ$.

Tandemanordnung

Für die Tandemanordnung werden beide Prüfköpfe über Haltearme an der 400 mm langen Schiene angebracht, die wiederum auf dem Laufwagen der Scanachse befestigt ist. Der Abstand beider Prüfköpfe ist variabel und kann maximal 360 mm betragen.

Bistatische Prüfkopfanordnung

Für die bistatische Prüfkopfanordnung bleibt der zu verfahrenende Prüfkopf an der 400 mm langen Schiene. Der andere Prüfkopf wird über einen etwas längeren Haltearm an der Scanachse fest montiert, wie in Abbildung 4.6 (c) zu sehen.

Messung der Vorlaufzeit des Messsystems

Die Prüfköpfe können mit Hilfe des Rotationskörpers um 360° gedreht werden. Dadurch ist es auch möglich die Vorlaufzeit des Messsystems über eine bistatische Transmissionsmessung durch Luft zu bestimmen, indem - wie in Abbildung 4.6 (b) zu sehen - beide Prüfköpfe zueinander ausgerichtet werden.

Schallabschirmkonstruktion

Wie sich aus den Messungen in Abschnitt 5, 6 und 7 herausstellen wird, erweist es sich als unablässig, den direkt übersprechenden Luftschall vom Sende- zum Empfangsprüfkopf und die direkten Reflexionen an der Körperoberfläche abzuschirmen. Diese beiden Luftschallwellen werden im Folgenden mit A (für air) abgekürzt. Die für den Scanner gebaute Schallabschirmkonstruktion bewirkt keine Eliminierung des Luftschalls, jedoch durch Beugung des Luftschalls an den Abschirmkanten eine Laufwegverlängerung und damit eine Laufzeitverschiebung zu unter Umständen späteren Zeiten als ein Reflektorecho.

Die Schallabschirmkonstruktion besteht aus zwei zwischen den Prüfköpfen positionierten voneinander unabhängigen Schallabschirmungen (wie in Abbildung 4.6 (a) und (c) zu sehen). Jede Schallabschirmung ist wiederum jeweils aus einem 1 mm und einem 0,5 mm dicken Aluminiumblech aufgebaut. Beide Bleche sind auf einer 5 mm dünnen akustischen Schallabsorptionsplatte aus fein- und offenzelligem Schaumstoff aus Melamin aufgeklebt. Die Schallabsorptionsplatte hat eine akustische Impedanz ähnlich wie Luft, ist extrem leicht und elastisch und dient vornehmlich dazu, die beiden Aluminiumbleche ohne Schallbrücken miteinander zu verbinden. An den mehrfach auftretenden Grenzflächen Luft/Aluminium und umgekehrt wird der Luftschall durch die großen akustischen Impedanzwechsel am Durchlaufen gehindert. Eine einzelne Schallabschirmung, bestehend aus zwei Aluminiumblechen, minimiert die Amplitude eines transmittierenden Signals schon soweit, dass es nur bei extrem

hoher zeitlicher Mittelung noch erkennbar ist. Da sowohl auf der Sende- als auch auf der Empfangsseite solch eine Schallabschirmung angebracht ist, wird der Luftschall am direkten Übersprechen vom Sende- zum Empfangsprüfkopf gehindert. Die Schallabschirmung wird über eine Halteklemmung neben dem Prüfkopf befestigt. Sie steht in einem Winkel von 2° zur akustischen Achse des Prüfkopfes. In diesem Winkel kann sie verschoben oder auch ganz abgenommen werden. Die Schallabschirmung wird nach Möglichkeit so nah wie möglich an die Körperoberfläche herangeführt, ohne diese zu berühren.

Bei der in Abschnitt 8.3 vorgestellten Tandemmessung wird die Abschirmkonstruktion noch durch eine Erweiterung verbessert, wodurch eine effektive Unterdrückung des Luftschalls erreicht wird.

4.3 Messunsicherheiten

4.3.1 Allgemeines

Jede Messung ist grundsätzlich mit einer Messunsicherheit behaftet, die wiederum aus mehreren voneinander abhängigen und/oder unabhängigen Anteilen bestehen kann. Die Angabe der Messunsicherheit zu einem Messwert dient als quantitatives Genauigkeitsmaß, d.h. als Ausmaß der möglichen Abweichung des Messergebnisses vom wahren Wert der Messgröße ([34],[95]).

Grundlage für die Ermittlung und Angabe der Messunsicherheit ist die Vornorm DIN V (ENV 13005) „Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen“ [19] vom Juni 1999. Sie stellt die deutsche Übersetzung des bei der ISO 1993 (Korrekturblatt 1995) erschienenen „Guide to the expression of uncertainty in measurement“ (GUM) dar.

Mit der Richtlinie „Ermittlung und Angabe der Unsicherheit bei quantitativen Prüfergebnissen (Messunsicherheit)“ (RLB – 2.7.2.1) [68] vom 2004-03-11 aus dem Richtlinienband der BAM folgt die Bundesanstalt für Materialforschung BAM dem GUM.

Zur näheren Beschreibung und Erklärung der Verfahrensweisen in dieser Richtlinie hat die BAM ebenfalls am 2004-03-11 die 1. Fassung des „BAM-Leitfaden zur Ermittlung von Messunsicherheiten bei quantitativen Prüfergebnissen“ [34] veröffentlicht.

Bei der Ultraschallmessung treten eine Vielzahl von Messunsicherheitsanteilen auf. Verglichen mit Kontaktultraschallprüfköpfen ergeben sich bei luftgekoppeltem Ultraschall durch die Luftschicht zusätzliche Messunsicherheiten. Die Berechnung der (erweiterten) Standardunsicherheit der Ergebnisgröße geschieht durch Kombination der einzelnen (erweiterten) Standardunsicherheiten nach dem Fehlerfortpflanzungsgesetz. Beispielhaft wird in Anhang A.2 eine Fehlerfortpflanzungsrechnung nach [34] zur Ermittlung der Messunsicherheit der gemessenen Betondicke in Abschnitt 8.2 gezeigt.

Der folgende Abschnitt 4.3.2 soll die wesentlichen Ursachen für die Empfindlichkeit von luftgekoppeltem Ultraschall aufzeigen. Dessen Verständnis ist notwendig für die Konstruktion des Scanners in Abschnitt 4.2.2.2 und der Verstell- und Kalibriereinheit der Prüfköpfe in Abschnitt 4.2.2.3, sowie der Durchführung genauer Messungen und der Interpretation der Messdaten.

4.3.2 Luftultraschalltypische Messunsicherheiten

Mit der Laufzeit des Schalls von der Körperoberfläche zu einem Reflektor und wieder zurück, kann bei Kenntnis der zugehörigen Schallgeschwindigkeit die Reflektortiefe ermittelt werden. Da das Signal nicht direkt an der Körperoberfläche beginnt, sondern zuvor andere Komponenten des Messsystems durchläuft, müssen allerdings zuvor die entsprechenden Zeitanteile (Vorlaufzeiten) von jedem Empfangssignal subtrahiert werden, um ausschließlich die Laufzeit für den Schall im Körper zu erhalten. Die Gesamtvorlaufzeit $t_{\text{Vorlauf,ges}}$ setzt sich aus verschiedenen Anteilen zusammen, die von folgenden Komponenten hervorgerufen werden:

- 1.) Triggereinsatz (Aufzeichnungszeitpunkt relativ zum Sendeeinsatzpunkt)
- 2.) elektrische Geräte wie Funktionsgenerator, Prüfköpfe, Verstärker, Filter, ADC-Karte und Oszilloskop, sowie elektrische Kabel; (Diese Vorlaufzeiten sind bis auf diejenige des Filters ($\sim 1 \mu\text{s}$) vernachlässigbar gering.)
- 3.) Anpassungsschichten der Ultraschallprüfköpfe
- 4.) Vorlaufschicht (bei luftgekoppeltem Ultraschall ist dies die Schalllaufweglänge in der Luft)

Die letzte Komponente ist luftultraschalltypisch und hat eine große Auswirkung auf das Messergebnis und die Messunsicherheit, weshalb sie im Folgenden näher erläutert wird.

4.3.2.1 Auswirkung einer Änderung der Schalllaufweglänge in der Luft

Bei luftgekoppeltem Ultraschall bewirken schon kleine Änderungen der Schalllaufweglänge in der Luft relativ große zeitliche Verschiebungen des Pulses am Empfänger. Ursache dafür ist der kleine Brechungsindex an der Grenzfläche Luft/Beton, also das Verhältnis der Schallgeschwindigkeit in Luft c_A zu der Schallgeschwindigkeit der Longitudinalwelle in Beton $c_{L,\text{Beton}}$ von

$$\frac{c_A}{c_{L,\text{Beton}}} = \frac{346 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{\sim 4000 \frac{\text{m}}{\text{s}}} \approx \frac{1}{12} \quad \text{Gl. 4.1}$$

bzw. zu der Schallgeschwindigkeit der Transversalwelle in Beton $c_{T,\text{Beton}}$ von

$$\frac{c_A}{c_{T,\text{Beton}}} = \frac{346 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{\sim 2500 \frac{\text{m}}{\text{s}}} \approx \frac{1}{7} \quad \text{Gl. 4.2}$$

Aufgrund der Beziehung

$$c = \frac{x}{t} = \lambda \cdot f \quad \text{Gl. 4.3}$$

verhalten sich die Laufwege x und die Wellenlängen λ wie die Schallgeschwindigkeiten c . Die Laufzeiten t in Luft (t_A) und in Beton ($t_{L,\text{Beton}}$ bzw. $t_{T,\text{Beton}}$) bei gleichen Laufweglängen x verhalten sich hingegen umgekehrt wie die Schallgeschwindigkeiten. Daraus folgt:

$$\frac{c_A}{c_{L,Beton}} = \frac{x_A}{x_{L,Beton}} = \frac{\lambda_A}{\lambda_{L,Beton}} = \frac{t_{L,Beton}}{t_A} \approx \frac{1}{12} \quad \text{Gl. 4.4}$$

und

$$\frac{c_A}{c_{T,Beton}} = \frac{x_A}{x_{T,Beton}} = \frac{\lambda_A}{\lambda_{T,Beton}} = \frac{t_{T,Beton}}{t_A} \approx \frac{1}{7} \quad \text{Gl. 4.5}$$

Vergleich der Wellenlängen in Luft und Beton

Für die Resonanzfrequenz der verwendeten ACU-Prüfköpfe von $f = 85 \text{ kHz}$ ergibt sich mit einer Schallgeschwindigkeit von $c_A = 346 \text{ m/s}$ eine Wellenlänge in der Luft von $\lambda_A = c_A / f = 4,1 \text{ mm}$. Die Wellenlänge der Longitudinalwelle in Beton beträgt nach Gl. 4.4 $\lambda_{L,Beton} = c_{L,Beton} / f \approx 12 \cdot \lambda_A = 49,2 \text{ mm}$. Entsprechend erhält man für die Wellenlänge der Transversalwelle in Beton nach Gl. 4.5 $\lambda_{T,Beton} = c_{T,Beton} / f \approx 7 \cdot \lambda_A = 28,7 \text{ mm}$.

Tabelle 4.3 zeigt welche Laufzeit t eine Welle für 1 mm in der Luft oder im Beton benötigt und welchen Laufweg x eine Welle innerhalb $1 \mu\text{s}$ zurücklegt (Annahme: $c_A = 346 \text{ m/s}$, $c_{L,Beton} = 4000 \text{ m/s}$, $c_{T,Beton} = 2500 \text{ m/s}$).

	in Luft (Long.-Welle) für $c_A = 346 \text{ m/s}$	in Beton (Long.-Welle) $c_{L,Beton} = 4000 \text{ m/s}$	in Beton (Transv.-Welle) $c_{T,Beton} = 2500 \text{ m/s}$
$x = 1 \text{ mm}$	$t_A = 2,89 \mu\text{s}$	$t_{L,Beton} = 0,25 \mu\text{s}$	$t_{T,Beton} = 0,4 \mu\text{s}$
$t = 1 \mu\text{s}$	$x_A = 0,346 \text{ mm}$	$x_{L,Beton} = 4 \text{ mm}$	$x_{T,Beton} = 2,5 \text{ mm}$

Tabelle 4.3 Wertepaare nach der Formel $c = x / t$ für Ultraschallwellen in Luft und Beton

Beispiel

Ein Fehler des Laufweges in der Luft auf der Sende- und Empfangsseite von jeweils $\Delta x_A = 1 \text{ mm}$ (also insgesamt 2 mm) würde bei einem Einfallswinkel von 0° einen Laufzeitfehler von

$$\Delta t = \frac{2 \cdot \Delta x_A}{c_A} = \frac{2 \cdot 1 \text{ mm}}{0,346 \frac{\text{mm}}{\mu\text{s}}} = 5,8 \mu\text{s} \quad \text{Gl. 4.6}$$

bewirken, wodurch die Dicke d des Betons bei Annahme von $c_{L,Beton} = 4000 \text{ m/s}$ um

$$\begin{aligned} \Delta d_{L,Beton} &= \frac{\Delta t \cdot c_{L,Beton}}{2} && \text{Gl. 4.7} \\ &= \frac{5,8 \mu\text{s} \cdot 4,000 \frac{\text{mm}}{\mu\text{s}}}{2} = \underline{\underline{12 \text{ mm}}} \quad (= 12 \cdot \Delta x_A) \end{aligned}$$

zu groß bzw. zu klein gemessen werden würde.

Bezieht man den absoluten Fehler auf z.B. eine 200 mm dicke Betonplatte, so ergibt sich ein relativer Fehler von 6% , welcher verglichen mit anderen noch hinzukommenden Messunsicherheiten von insgesamt ungefähr 5% bis 10% , den Hauptanteil darstellen würde.

Aufgrund dieses anfälligen Verhaltens gilt es, solche Fehler infolge ungenauen Messens des Luftweges durch geeignete Maßnahmen minimal zu halten.

4.3.2.2 Ermittlung der Schalllaufzeit in der Luft

Die Schalllaufzeit für den Luftweg muss im allgemeinen Fall sowohl für die Sende- als auch für die Empfangsprüfkopfseite ermittelt werden. Deren Summe ergibt die Laufzeit für den gesamten Luftweg. Die Berechnung der Laufzeit für den Luftweg auf einer Prüfkopfseite wird im Folgenden erläutert und kann indirekt oder direkt bestimmt werden. Je nach Art der Bestimmung werden unterschiedliche physikalische Größen herangezogen, die wiederum alle mit Messunsicherheiten behaftet sind.

Indirekte Vorlaufzeitbestimmung und deren Messunsicherheiten

Bei der indirekten Vorlaufzeitbestimmung für den Luftweg wird der Prüfkopfabstand entlang des Schallstrahls zur Körperoberfläche x_A - z.B. mit einem Messschieber - abgegriffen und die Lufttemperatur ϑ gemessen. Mit der Lufttemperatur lässt sich mit Gl. 2.11 die Schallgeschwindigkeit $c_A(\vartheta)$ berechnen, deren Zusammenhang in Abbildung 4.7 (a) dargestellt ist. Der Quotient aus Prüfkopfabstand und Schallgeschwindigkeit $x_A / c_A(\vartheta)$ ergibt die gesuchte Vorlaufzeit für den Luftweg

$$t_{A,\text{indirekt}} = \frac{x_A}{c_A(\vartheta)} = \frac{x_A}{331,4 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot \sqrt{1 + \frac{\vartheta}{273,15^\circ\text{C}}}} \quad \text{Gl. 4.8}$$

Hierbei gehen die Messunsicherheiten für x_A und ϑ ein. Aus Gl. 2.11 erkennt man, dass mit steigender Temperatur ϑ die Schallgeschwindigkeit in Luft $c_A(\vartheta)$ zunimmt. Für einen in der Regel praxisrelevanten Temperaturbereich von -20°C bis 60°C (Außentemperaturen) nimmt $c_A(\vartheta)$ annähernd geradlinig um $0,59 \text{ m/s}/^\circ\text{C}$ ($\pm 0,04 \text{ m/s}/^\circ\text{C}$) zu (siehe Abbildung 4.7 (a) roter Bereich).

Wie sich jeweils ein Messfehler Δx_A und $\Delta \vartheta$ bei unterschiedlichen Luftwegen x_A und unterschiedlichen Lufttemperaturen ϑ auf den Laufzeitfehler $\Delta t_{A,\text{indirekt}}$ und folglich auf einen Betondickenfehler $\Delta d_{L,\text{Beton}}$ auswirkt, ist in Abbildung 4.7 (b), (c) und (d) grafisch dargestellt. Der Betondickenfehler nach Gl. 4.7 wird dabei unter Annahme einer mittleren Schallgeschwindigkeit der Longitudinalwelle in Beton von $c_{L,\text{Beton}} = 4000 \text{ m/s}$ angegeben.

Aus den Diagrammen wird ersichtlich, dass sowohl kleine Messfehler des Luftweges Δx_A von wenigen Millimetern als auch Messfehler der Lufttemperatur $\Delta \vartheta$ von wenigen Grad einen erheblichen Fehler in der Laufzeit und der daraus ermittelten Betondicke verursachen.

Neben den Messfehlern Δx_A und $\Delta \vartheta$ haben auch die entsprechenden absoluten Größen x_A und ϑ einen Einfluss auf den Laufzeitfehler, sofern nicht $\Delta x_A = 0$ und $\Delta \vartheta = 0$ sind. Der Einfluss von ϑ ist für vorkommende Außenlufttemperaturen von -20°C bis 60°C bei Messfehlern $\Delta x_A \neq 0$ und/oder $\Delta \vartheta \neq 0$ eher gering (siehe Abbildung 4.7 (b) und (c)). Hingegen ist die absolute Größe x_A für $\Delta \vartheta \neq 0$ ganz entscheidend für die Größe des Laufzeitfehlers (siehe Abbildung 4.7 (d)).

Ein Laufzeitfehler $\Delta t_{A,\text{indirekt}}$ infolge eines Lufttemperaturfehlers $\Delta \vartheta$ kann somit klein gehalten werden, wenn ein kleiner Luftweg x_A gewählt wird, wie z.B. anhand der grünen Kurve in Abbildung 4.7 (d) zu sehen.

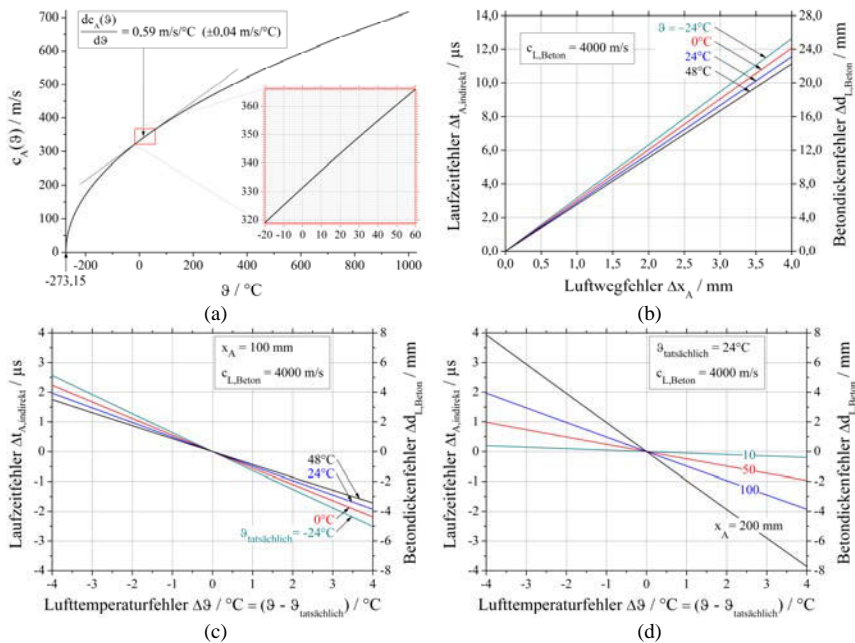


Abbildung 4.7

Auswirkung eines Messfehlers:

Größe des Laufzeitfehlers $\Delta t_{A,\text{indirekt}} = \Delta x_A / c_A(\vartheta)$ und

Betondickenfehlers $\Delta d_{L,\text{Beton}} = \Delta t_{A,\text{indirekt}} \cdot c_{L,\text{Beton}} / 2$ in Abhängigkeit eines Luftwegfehlers Δx_A (a) und in Abhängigkeit eines Lufttemperaturfehlers $\Delta \vartheta$ (b)

Letztendlich gilt, dass der Luftweg x_A und die Lufttemperatur $\Delta \vartheta$ mit Instrumenten gemessen werden sollten, die auf zehntel Millimeter bzw. 0,3 Grad genau arbeiten, um eine möglichst kleine Messunsicherheit der Vorlaufzeit infolge des Luftweges zu erhalten.

Direkte Vorlaufzeitbestimmung und deren Messunsicherheiten

Bei der direkten Vorlaufzeitbestimmung für den Luftweg wird die Schalllaufzeit für den Prüfkopfabstand senkrecht zur Körperoberfläche $t_A(\alpha_A=0^\circ)$ über eine Laufzeitmessung in monostatischer Prüfkopfpanordnung (ein Prüfkopf als Sender und Empfänger mit einem Einfallswinkel $\alpha_A = 0^\circ$, siehe Abbildung 2.5 (b)) des an der Vorderseite der Körperoberfläche reflektierten Schalls bestimmt. Die Gesamtvorlaufzeit des Systems ohne Luftschicht $t_{\text{Vorlauf,ohne_Luft}}$, bestehend aus den Komponenten 1.), 2.) und 3.) in Abschnitt 4.3.2 muss dabei vom monostatisch gemessenen Empfangssignal t_{mono} abgezogen werden. Die Laufzeit ($t_{\text{mono}} - t_{\text{Vorlauf,ohne_Luft}}$) entspricht dem doppelten Prüfkopfabstand zur Körperoberfläche, weshalb diese mit 0,5 multipliziert werden muss, um die Laufzeit $t_A(\alpha_A=0^\circ)$ zu erhalten:

$$t_A(\alpha_A = 0^\circ) = 0,5 \cdot (t_{\text{mono}} - t_{\text{Vorlauf, ohne_Luft}}) \quad \text{Gl. 4.9}$$

Die entsprechende Schalllaufzeit t_A für einen Einfallswinkel ungleich Null kann dann durch Division des Kosinus des Einfallswinkels $\cos(\alpha_A)$ berechnet werden zu

$$t_{A,\text{direkt}} = \frac{t_A(\alpha_A = 0^\circ)}{\cos(\alpha_A)} = \frac{0,5 \cdot (t_{\text{mono}} - t_{\text{Vorlauf, ohne_Luft}})}{\cos(\alpha_A)} \quad \text{Gl. 4.10}$$

Bei der Berechnung nach Gl. 4.10 muss der Drehpunkt des Prüfkopfes mittig auf der Anpassungsschicht der Wandleroberfläche liegen (siehe Abbildung 4.8 (a)).

Für die Messunsicherheit von $t_{A,\text{direkt}}$ gehen die Messunsicherheiten von $t_A(\alpha_A=0^\circ)$ und α_A ein. Die Laufzeit $t_A(\alpha_A=0^\circ)$ kann auch durch die Beziehung

$$t_A(\alpha_A = 0^\circ) = \frac{x_A(\alpha_A = 0^\circ)}{c_A(\vartheta)} \quad \text{Gl. 4.11}$$

ausgedrückt werden, wodurch deutlich wird, dass die gemessene Laufzeit $t_A(\alpha_A=0^\circ)$ wiederum von der Messunsicherheit von $x_A(\alpha_A=0^\circ)$ und ϑ abhängig ist, wie dies auch bei der indirekten Vorlaufzeitbestimmung der Fall ist.

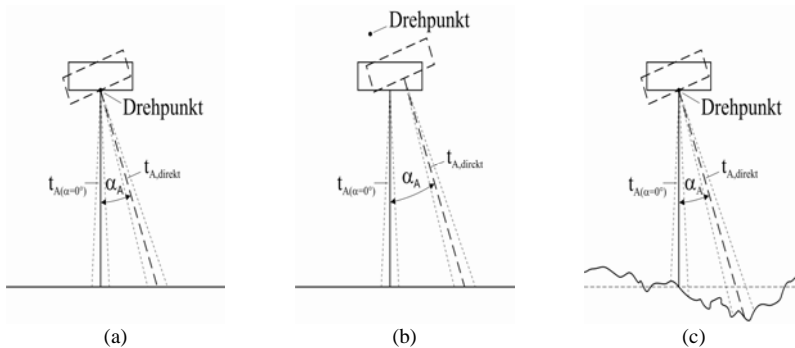


Abbildung 4.8 Direkte Bestimmung der Laufzeit für die Wegstrecke des Luftschalls: bei genauer Platzierung des Drehpunktes und idealer Körperoberfläche (a); Messunsicherheit wegen falsch platziertem Drehpunkt des Prüfkopfes (b); Messunsicherheit aufgrund von Oberflächenkrümmung und -rauigkeit (c)

Abbildung 4.9 (a), (b) und (c) zeigen die Abhängigkeit eines Laufzeitfehlers $\Delta t_{A,\text{direkt}}$ von den abhängigen Größen, sowie den aus dem Laufzeitfehler resultierenden Betondickenfehler nach Gl. 4.7 unter Annahme von $c_{L,\text{Beton}} = 4000$ m/s.

Ein Messfehler $\Delta x_A(\alpha_A=0^\circ)$ ist die Folge eines instabilen Scanneraufbaus. Die Auswirkung von $\Delta x_A(\alpha_A=0^\circ)$ auf den Laufzeitfehler kann, wie in Abbildung 4.9 (a) zu sehen, schon für wenige Millimeter beträchtlich sein. Die Größe des Einfallswinkels der Tandemanordnung α_A ist dabei für die bei Beton auftretenden kleinen Winkel vernachlässigbar klein, wie dem Diagramm zu entnehmen ist.

Durch schwankende Temperaturen $\Delta\vartheta$ kann ebenfalls ein Laufzeitfehler entstehen. Für die bei Beton auftretenden kleinen Einfallswinkel α_A ist der Einfluss von $\Delta\vartheta$ auf

den Laufzeitfehler näherungsweise wie in Abbildung 4.7 (c) und (d) dargestellt, da $\cos(\alpha_A) \approx 1$. Entscheidend ist hier weniger die absolute Temperatur (Abbildung 4.7 (c)) als vielmehr die Länge des Luftweges x_A (Abbildung 4.7 (d)), so dass auch hier - wie schon bei der indirekten Vorlaufzeitbestimmung - ein möglichst kurzer Prüfkopfabstand zur Betonoberfläche für einen geringen Laufzeitfehler besonders von Vorteil ist.

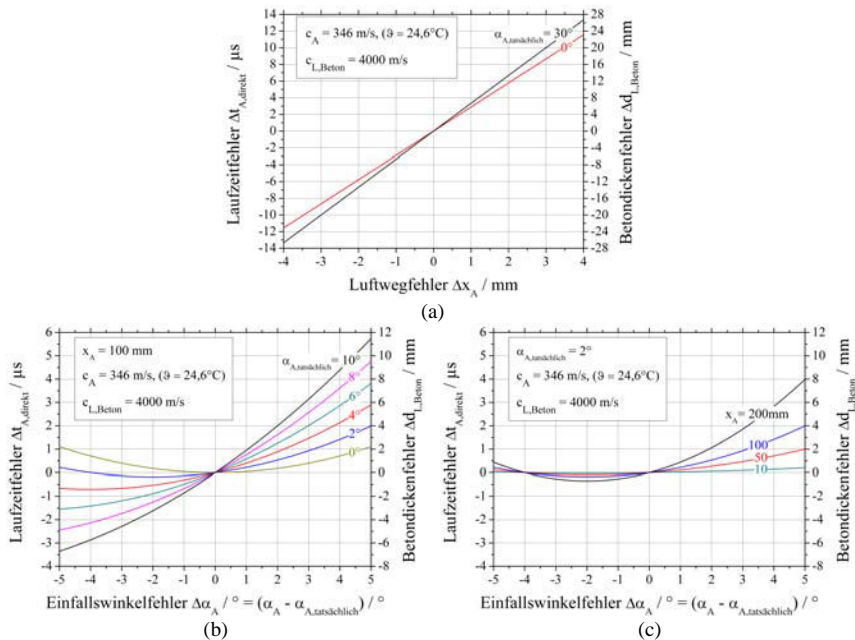


Abbildung 4.9 **Abhängigkeit des Laufzeitfehlers $\Delta t_{A,direkt}$ und des Betondickenfehlers $\Delta d_{L,Beton}$ von dem Luftwegfehler Δx_A und Einfallswinkel α_A (a), dem Einfallswinkelfehler $\Delta \alpha_A$ und Einfallswinkel α_A (b) und dem Einfallswinkelfehler $\Delta \alpha_A$ und Luftweg x_A (c); der Betondickenfehler $\Delta d_{L,Beton} = \Delta t_{A,direkt} \cdot c_{L,Beton} / 2$ ist unter Annahme einer Schallgeschwindigkeit der Longitudinalwelle in Beton von $c_{L,Beton} = 4000 \text{ m/s}$ angegeben.**

Ein Einfallswinkelfehler $\Delta \alpha_A$ entsteht z.B. infolge eines Spiels, eines ungenauen Laufes oder durch grobe Ableseungenauigkeit des Rotationskörpers. Oder aber er ergibt sich durch eine falsche Winkelkalibrierung des Prüfkopfes, d.h., dass die akustische Achse in der Luft bei einem Einfallswinkel $\alpha_A = 0^\circ$ von der Oberflächennormalen des Körpers abweicht. Der Abbildung 4.9 (b) und (c) kann die Größe des Laufzeitfehlers $\Delta t_{A,direkt}$ infolge eines Einfallswinkelfehlers $\Delta \alpha_A$ entnommen werden. Mit größer werdendem Einfallswinkel α_A und Luftweg x_A steigt auch der Laufzeitfehler $\Delta t_{A,direkt}$ stark an. Auch hier ist demzufolge ein kurzer Prüfkopfabstand x_A zur Betonoberfläche empfehlenswert.

Neben den drei genannten Messfehlern können noch weitere Messfehler auftreten, so z.B., wenn der Drehpunkt des Prüfkopfes nicht mittig auf der Anpassungsschicht der Wandlerfläche auf der akustischen Achse liegt (Abbildung 4.8 (b)) wie nach Gl. 4.10

gefordert. Weiterhin kann ein Messfehler infolge der Oberflächenkrümmung und Oberflächenrauigkeit des Körpers entstehen, wie in Abbildung 4.8 (c) zu sehen. Es ist jedoch möglich diesen Messfehler größtenteils zu eliminieren, indem der Prüfkopf bei der monostatischen Messung direkt oberhalb des Schalleintrittspunktes Luft/Festkörper der Tandemanordnung platziert wird.

Welcher Art der Vorlaufzeitbestimmung der Vorzug gegeben werden sollte, hängt davon ab, welche Methode eine geringere Gesamtmessunsicherheit ergibt. Diese lässt sich aus den Einzelmessunsicherheiten ermitteln.

Soll eine Vorlaufzeitbestimmung für eine Tandemanordnung mit einem Einfallswinkel von $\alpha_A = 0^\circ$ vorgenommen werden, so bietet sich vor allem die direkte Vorlaufzeitbestimmung an, da der Winkel des Prüfkopfes von der monostatischen Prüfkopfanzordnung zur Tandemanordnung nicht verstellt werden muss und die Vorlaufzeit auf direktestem Wege sehr genau bestimmt werden kann. Die Kenntnis der Teilvorlaufzeiten der elektrischen Geräte, Kabel und der Prüfköpfe (Abschnitt 4.3.2 Punkt 1.) und 2.)) ist dabei nicht erforderlich. Es genügt zu wissen, zu welchem Zeitpunkt der Sendeimpuls auftritt.

4.3.2.3 Vorlaufzeitbestimmung an großen nicht ebenen Messflächen

In Abschnitt 4.3.2.2 wurde gezeigt, auf welche Weise sich die Vorlaufzeit infolge der Luftschicht an einer Messposition ermitteln lässt. In der Regel möchte man allerdings nicht nur an einer Stelle messen, sondern eine Vielzahl von Messungen an verschiedenen Positionen durchführen. Für alle diese Messpositionen muss die Laufzeit für den Luftweg des Schalls bekannt sein, da er als Vorlaufzeit vom entsprechenden Signal abgezogen werden muss.

Ideale (ebene, glatte) Körperoberfläche

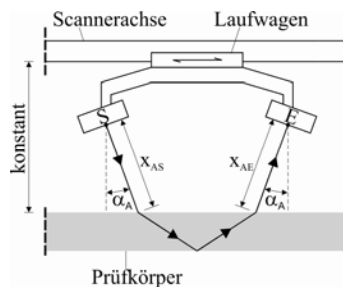


Abbildung 4.10 Skizzierung der Tandemanordnung an einem Körper mit ebener, glatter Oberfläche; die Scannerachse ist parallel zur Oberfläche des Körpers, weshalb die Luftweglängen x_{AS} und x_{AE} unabhängig von der Position des Laufwagens konstant bleiben

Für Messungen an einer Platte mit ebener, glatter Körperoberfläche genügt es die Scannerachsen parallel zur Oberfläche auszurichten und die Vorlaufzeit infolge der

Luftschicht lediglich an einer Stelle für den Sende- und Empfangsprüfkopf zu messen. Die ermittelte Vorlaufzeit ist - wie in Abbildung 4.10 skizziert - unabhängig von der Messposition der Tandemanordnung, weshalb sie für alle Messungen herangezogen werden kann.

Sofern die Körperoberfläche leicht uneben ist – und das ist der Regelfall - ändert sich der Prüfkopfabstand zur Körperoberfläche und damit auch die Vorlaufzeit. Um dieses Problem zu lösen, kommen prinzipiell zwei unterschiedliche Ansätze in Frage.

Tandem an Scannerachse

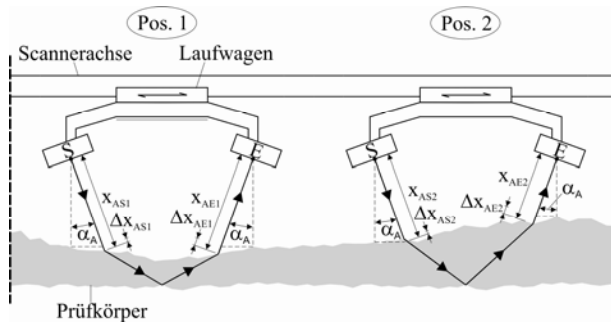


Abbildung 4.11 Tandem an Scannerachse (Ansatz 1, Skizze): Ein Tandem läuft entlang einer Scannerachse; bei einer Messung an einem Körper mit unebener, rauer Oberfläche sind die Luftweglängen x_{AS} und x_{AE} positionsabhängig

Bei der ersten Möglichkeit sind, wie schon zuvor in Abbildung 4.10 gezeigt, die Prüfköpfe der Tandemanordnung über eine Prüfkopfhalterung an einem Laufwagen einer Scannerachse angebracht. Die Schallwege und Schallwegdifferenzen infolge der Unebenheit des Körpers sind für zwei Messpositionen in Abbildung 4.11 skizziert. Aufgrund der Beziehung $t = x / c$ gilt Abbildung 4.11 auch für die Laufzeiten t der Schallwege x . Zur Ermittlung der Vorlaufzeit wird die in Abschnitt 4.3.2.2 erläuterte direkte Vorlaufzeitbestimmung für alle Ein- und Ausschallpunkte der Messpositionen der Tandemanordnung durchgeführt. Um Laufwegdifferenzen Δx_{ASi} und Δx_{AEi} (Index i = Messposition) zu vermeiden, müssen die monostatischen Messungen genau an den Ein- und Austrittspunkten auf der Grenzfläche Luft/Festkörper der Tandemanordnung durchgeführt werden (wie bereits in Abschnitt 4.3.2.2 beschrieben). Unter Umständen ist jedoch zwecks Zeiteinsparung der Vorlaufzeitmessung auch ein größeres Messraster mit nachträglicher Interpolation zwischen den Messpunkten ausreichend. Von den Empfangssignalen der eigentlichen Messungen in Tandemanordnung müssen dann die nach Gl. 4.10 ermittelten Vorlaufzeiten abgezogen werden.

Tandem parallel zur Körperoberfläche

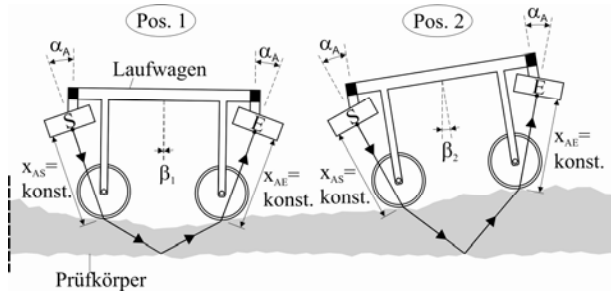


Abbildung 4.12 Tandem parallel zur Körperoberfläche (Ansatz 2, Skizze): Ein Laufwagen sorgt für einen konstanten positionsunabhängigen Luftweg des Tandems an einem Körper mit unebener, rauer Oberfläche; die Vorlaufzeit bleibt dadurch konstant

Der zweite Ansatz zielt darauf ab, die Luftvorlaufstrecke an jeder Messposition konstant zu halten, wodurch auch die Vorlaufzeit konstant bleibt. Dies kann dadurch erreicht werden, indem der Prüfkopfpfadbau in einem Wagen hängend über die Körperoberfläche gerollt wird, wie dies in Abbildung 4.12 skizziert ist. Die Wagenrollen sollten dabei in Scanrichtung möglichst auf Höhe des Schalleintritts- und Schallaustrittspunktes platziert werden.

Dieser Ansatz hat den wesentlichen Vorteil, dass eine einzige und einmalige Kalibrierung der Prüfköpfe genügt und keine zusätzlichen Vorlaufzeitmessungen anfallen. Auch für spätere Messungen mit einer anderen Temperatur ϑ und einem anderen Einfallswinkel α_A ist eine Vorlaufzeitmessung nicht mehr notwendig. Es genügt ϑ und α_A zu messen und die Vorlaufzeit mit Hilfe von Gl. 2.11 über

$$\begin{aligned}
 t_A(\vartheta, \alpha_A) &= \frac{x_A(\alpha_A)}{c_A(\vartheta)} = \frac{x_A(\alpha_A = 0^\circ)}{c_A(\vartheta) \cdot \cos(\alpha_A)} \\
 &= \frac{x_A(\alpha_A = 0^\circ)}{\left(331,4 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot \sqrt{1 + \frac{\vartheta}{273,15^\circ\text{C}}} \right) \cdot \cos(\alpha_A)}
 \end{aligned}
 \tag{Gl. 4.12}$$

zu berechnen, wobei $x_A(\alpha_A = 0^\circ)$ der durch die Kalibrierung ermittelte Luftschallweg bei einem Einfallswinkel von $\alpha_A = 0^\circ$ ist. Unter Umständen müssen abhängig von α_A die vier Rollen auf Höhe des Ein- und Ausschallpunktes platziert werden. Mögliche Schwierigkeiten könnte es geben, wenn aufgrund der Unebenheit der Körperoberfläche eines der vier Räder in der Luft steht, was zu einem Messfehler führen würde.

Vereinfachende Annahme für die Messungen in dieser Arbeit

Für alle in dieser Arbeit dargestellten Messungen wird eine ebene glatte Körperoberfläche angenommen, wie in Abbildung 4.10 dargestellt. Diese Annahme

führt hier zu teilweise größeren Messunsicherheiten der Vorlaufzeit von bis zu $\pm 12 \mu\text{s}$, da die Körperoberflächen je nach Probekörper bis zu $\pm 2 \text{ mm}$ von der Bezugsebene abweichen. Für die Identifikation der unterschiedlichen Wellen ist dies allerdings nicht von Bedeutung. Für genauere Messungen (z.B. der Plattendicke) sollte jedoch einer der beiden im Abschnitt 4.3.2.2 erläuterten Ansätze angewendet werden.

4.4 Begriffserläuterungen und Allgemeines zur Ergebnisdarstellung

4.4.1 Einfallswinkel

Als Einfallswinkel des Sendeprüfkopfes α_{AS} wird hier der Winkel zwischen der akustischen Achse des Sendeprüfkopfes in der Luft und der Normalen der Körperoberfläche bezeichnet.

Als Einfallswinkel des Empfangsprüfkopfes α_{AE} wird hier der Winkel zwischen der akustischen Achse des Empfangsprüfkopfes in der Luft und der Normalen der Körperoberfläche bezeichnet.

Die Einfallswinkel bei der bistatischen oder der Tandemanordnung sind positiv in Richtung des jeweils anderen Prüfkopfes.

Ist der Einfallswinkel des Empfangsprüfkopfes α_{AE} gleich dem Einfallswinkel des Sendeprüfkopfes α_{AS} , so wird der Einfachheit halber lediglich vom Einfallswinkel α_A geredet.

4.4.2 Wechselspannungssignal und Einhüllende über die Hilbert-Transformation

Die Empfangssignale sind vor ihrer Bearbeitung (Rohdaten) immer Wechselspannungssignale. In den meisten Fällen werden in dieser Arbeit die Wechselspannungssignale dargestellt, da anhand von ihnen sehr gut Interferenzen verschiedener Wellenzüge in den Schnittbildern zu identifizieren sind.

Unter bestimmten Umständen ist es dennoch sinnvoll eine Hüllkurve der Wechselspannungssignale zu bilden, um eine anschaulichere Darstellung der Daten zu erhalten. So wird in dieser Arbeit auch häufig von jedem Wechselspannungssignal eines Datensatzes die Einhüllende mit Hilfe der Hilbert-Transformierten gebildet und diese Hüllkurve - die nur noch positive Werte aufweist - dargestellt. In dieser Arbeit ist unter der Einhüllenden $E(t)$ eines Signals immer diejenige gemeint, die nach Gl. 4.13 mit dem Satz des Pythagoras vom Wechselspannungssignal $A(t)$ und dessen Hilbert-Transformierten $H\{A(t)\}$ berechnet wird:

$$E(t) = \sqrt{A(t)^2 + H\{A(t)\}^2} . \quad \text{Gl. 4.13}$$

4.4.3 Intensitätsgraphen und Farbskala

Die Schnitt- und Projektionsbilder werden in Form von Intensitätsgraphen dargestellt. Jede Farbe an einem Punkt des Graphen steht dabei für einen bestimmten Signalwert. In dieser Arbeit werden infolge verschiedener Auswerteprogramme unterschiedliche

Farbskalen verwendet. Um sie miteinander vergleichen zu können und nicht bei jeder Messung erneut abzubilden, sind alle Grauwert- und Farbskalen in Abbildung 4.13 dargestellt. Unterer und oberer Grenzwert sind von Messung zu Messung unterschiedlich groß und hängen auch davon ab, ob das Wechsellspannungssignal (\pm Grenzwert), der Betrag (0 bis +Grenzwert) oder die Einhüllende (0 bis +Grenzwert) dargestellt wird.

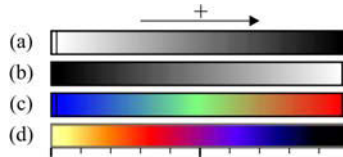


Abbildung 4.13 Grauwert- und Farbskalen der verwendeten Intensitätsgraphen (Schnitt- und Projektionsbilder)

4.4.4 Laufzeit

Für die Laufzeitermittlung eines Pulses stehen mehrere Möglichkeiten zur Verfügung. Wird sie wie in dieser Arbeit direkt aus dem Zeitsignal abgegriffen, so muss ein Bezugspunkt definiert werden. Bei luftgekoppeltem Ultraschall an Beton hat man es in der Regel mit einem längeren Puls mit mehreren bis vielen Perioden zu tun, der nur teilweise aus dem Rauschen heraustritt. Es wird deshalb als Bezugspunkt immer das Maximum der Einhüllenden des Pulses herangezogen.

Dieses Maximum tritt hier für die verwendeten Prüfköpfe bei Durchschallung einer Luftschicht (hohes Signal-zu-Rausch-Verhältnis) bei $38 \mu\text{s}$ ($\pm 3 \mu\text{s}$) später als der eigentliche Pulseinsatzpunkt (Austritt des Pulses aus dem Rauschen = Ersteinsatz) auf.

Zur Berechnung der Laufzeiten in dem jeweiligen Festkörper muss von den Empfangssignalen eine Vorlaufzeit subtrahiert werden, die folgende Anteile enthält:

- Zeit bis zum Ersteinsatz des Sendesignals
- Zeit vom Ersteinsatz bis zum Maximum der Einhüllenden des Pulses nach Transmission durch eine Luftschicht. Der Zeitanteil beträgt $38 \mu\text{s}$ ($\pm 3 \mu\text{s}$).
- Vorlaufzeit der Apparatur inklusive der Vorlaufzeit der Prüfköpfe
- Laufzeit für den Luftweg (hier vereinbarungsgemäß entlang der akustischen Achse des Prüfkopfes - hier gleich der Prüfkopfachse - vom Sendeprüfkopf bis zur Körperoberfläche und vom Empfangsprüfkopf bis zur Körperoberfläche)

Der Nullpunkt der Zeitachse in den Geschwindigkeitsspektren, in den B-Bildern nach NMO-Korrektur und in allen Bildern in Abschnitt 8.3 einschließlich aller SAFT-Bilder, bezieht sich auf das Maximum der Einhüllenden über die Hilbert-Transformation.

Für die Darstellung der restlichen A-, B- und C-Bilder wird in dieser Arbeit allerdings der Nullpunkt der Zeitachse auf den Ersteinsatz statt auf das Maximum der Einhüllenden gelegt und ist somit um $38 \mu\text{s}$ verschoben. Dies ist beim Abgreifen der Laufzeit über das Maximum der Einhüllenden unbedingt zu berücksichtigen.

4.4.5 Bezug des Prüfkopfaufbaus zur x-Achse

Der Ursprung der x-Achse in den B-Bildern der bistatischen Messungen wird auf den festliegenden Schalleintritts- oder Schallaustrittspunkt auf der Grenzfläche Luft/Festkörper gelegt, so dass mit x immer der Abstand vom Schallein- zum Schallaustrittspunkt gemeint ist.

Bei der Tandemanordnung wird der Bezugspunkt für x auf den Mittelpunkt des Tandems gelegt.

5 Voruntersuchungen an einer Plexiglasplatte

5.1 Einleitung

Es gibt unterschiedliche Echo-Prüfkopfanordnungen, die in Abschnitt 2.6 erläutert sind. Die monostatische Prüfkopfanordnung ist bezüglich ihrer Handhabbarkeit am einfachsten, weshalb sie für erste Messungen an unterschiedlichen Betondicken (210, 330, 451 und 571 mm) herangezogen wurde. Die Messungen ergaben, dass eine Rückwanddetektion mit der monostatischen Prüfkopfanordnung an Beton bei normalem Atmosphärendruck nicht realisierbar ist. Dies liegt vor allem an der starken Reflexion des Luftschalls an der Grenzfläche Luft/Beton. Diese Reflexion überdeckt aufgrund ihrer langen Pulsdauer das schwache Rückwandecho. Außerdem werden Rückwandreflexionen von den Nachschwingungen des Wandlers im Empfangsbetrieb infolge der starken Anregung des Wandlers im Sendebetrieb überdeckt.

Es sollte deshalb die wesentlich empfindlichere Tandemanordnung auf ihre Tauglichkeit hin überprüft werden. Bei dieser können theoretisch, wie in Abbildung 2.2 gezeigt, je nach Einfallswinkel des Luftschalls und Öffnungswinkel des Schallbündels unterschiedliche Modenkonversionen und unter Umständen Interferenzen der Wellen auftreten. Eine optimale Messanordnung bedingt die Kenntnis der geometrischen Einstellparameter wie Einfallswinkel und Abstand vom Sende- zum Empfangsprüfkopf. Aus diesem Grunde sollten zunächst die Wellenausbreitungsvorgänge in Abhängigkeit der Einstellparameter sichtbar gemacht und die erschwerenden Eigenschaften von Beton (inhomogen, Kornrauschen und daraus folgend ein kleines Signal-zu-Rausch-Verhältnis) vernachlässigt werden. Dazu werden Voruntersuchungen an einem Probekörper mit möglichst idealen Eigenschaften (homogen, isotrop) durchgeführt. Als Probekörper dient eine 103 mm (± 1 mm) dicke Plexiglasplatte. Anfangs wird ein Laservibrometer als Empfänger eingesetzt, um scannend und punktgenau messen zu können und um die Wellenausbreitung zu visualisieren.

Folgende Fragen gilt es zu beantworten:

- Sind Rückwandechos detektierbar und wenn ja, welche ist die optimale einzusetzende Wellenart und welcher Einfallswinkel und Abstand vom Sende- zum Empfangsprüfkopf muss dazu gewählt werden?
- Welches ist die optimale Mittenfrequenz und Pulsform (siehe Abschnitt 5.2)?
- Welchen Einfluss haben der Einfallswinkel, der Abstand vom Sende- zum Empfangsprüfkopf und der Abstand vom Prüfkopf zur Körperoberfläche?
- Welche Wellenarten treten bei welchem Einfallswinkel auf?

Die gewonnenen Erkenntnisse werden bei den Messungen an Beton in Abschnitt 6 und 7 sowie bei dem Aufbau der Scannerapparatur in Abschnitt 4.2.2 und der mit ihr gemachten Messungen in Abschnitt 8 berücksichtigt.

5.2 Mittenfrequenz und Pulsform

Es soll geklärt werden, welche Mittenfrequenz und Pulsform für Messungen mit den vorhandenen ACU-Prüfköpfen geeignet ist.

Für die Prüfköpfe kann mit Hilfe einer Messung in Luft an einem ebenen Reflektor in monostatischer Prüfkopfpanordnung (siehe Abbildung 2.5) der Einfluss des Prüfkopfes auf den Anregungspuls beobachtet werden.

Abbildung 5.1 zeigt solch eine Messung an einer 103 mm dicken Plexiglasplatte bei Anregung des Prüfkopfes mit einem Rechteckpuls (Abbildung 5.1 (a)) und mit einem Schwingungspuls (Abbildung 5.1 (e)). Die Anregungspulse werden mit einer Mittenfrequenz von 100 kHz generiert. Durch die Verstärkung kommt es zu einer Pulsverzerrung. Unterscheiden tun sich die beiden Anregungspulse in ihrem Frequenzgehalt. Während der Rechteckpuls ein breites Frequenzband aufweist (Abbildung 5.1 (b)), ist der Schwingungspuls schmalbandig (Abbildung 5.1 (f)).

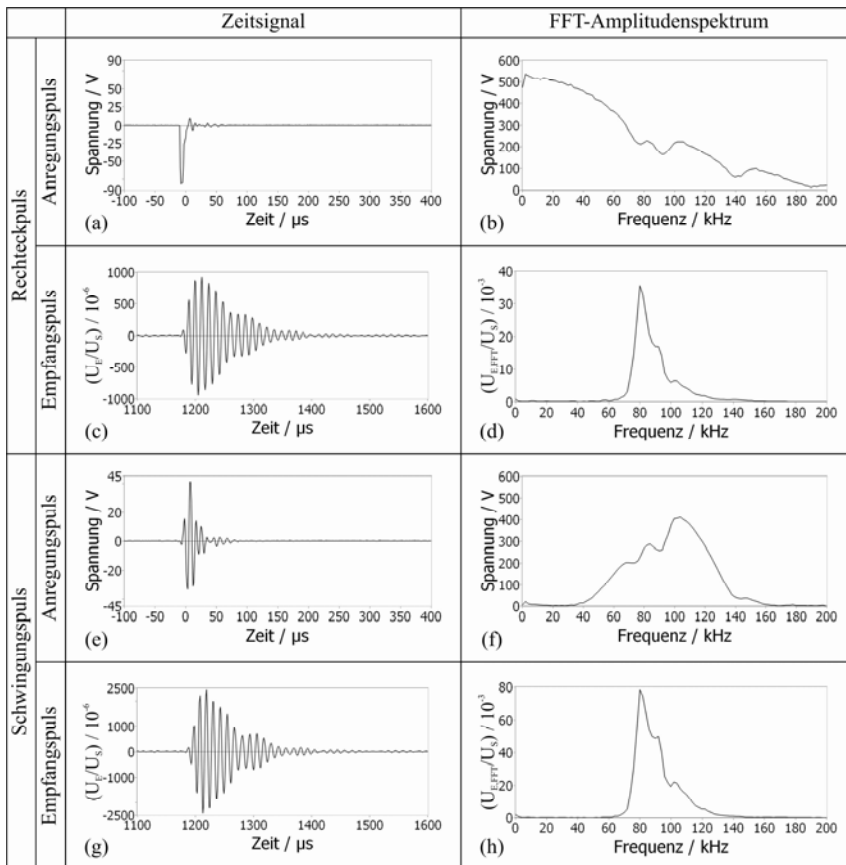


Abbildung 5.1

Änderung des Anregungspulses (Rechteckpuls, Schwingungspuls; 100 kHz Mittenfrequenz) durch den ACU-Prüfkopf (NCG100-S63, Ser.-Nr.: 270306); Prüfkopf schwingt unabhängig von der Pulsform des Anregungssignals mit seiner Resonanzfrequenz; U_E = Spannung des Empfangssignals, $U_{E,FFT}$ = Spannung des Empfangssignals nach der Fast-Fourier-Transformation (FFT), U_S = Spannung des Sendesignals

Die laut Herstellerangabe ungedämpften Prüfköpfe zeigen trotz der unterschiedlichen Anregung keinen signifikanten Unterschied der entsprechenden Empfangssignale (Abbildung 5.1 (c) und (g)). Dies zeigt sich auch bei einem Vergleich der zugehörigen FFT-Amplitudenspektren (FFT = Fast-Fourier-Transformation), die in (Abbildung 5.1 (d) und (h)) dargestellt sind. Die Bandbreite beträgt 22 kHz bei -6 dB. Das Nachschwingen des Prüfkopfes resultiert aus dessen Schmalbandigkeit.

Für den anderen ACU-Prüfkopf gleicher Bauart ergibt sich qualitativ dasselbe Messergebnis wie in Abbildung 5.1. Er weist allerdings neben dem Hauptpeak bei 80 kHz einen stärker ausgeprägten zweiten Peak bei 90 kHz auf.

Die Prüfköpfe schwingen hauptsächlich mit ihrer eigenen Resonanzfrequenz. Es zeigt sich, dass die Maximalamplitude des Empfangspulses bei einer Mittenfrequenz des Anregungspulses zwischen 80 kHz und 85 kHz auftritt. Für diese Frequenz sind die Prüfköpfe optimal ausgelegt.

Da bei den nun folgenden bistatischen Messungen anfangs mit der vom Hersteller angegebenen Nominalfrequenz von 100 kHz gearbeitet wurde, werden aus Gründen der Vergleichbarkeit so gut wie alle Messungen mit dieser Frequenz durchgeführt. Dies hat lediglich eine geringere Empfangssignalamplitude zur Folge. Die automatisierten Messungen in Abschnitt 8 werden hingegen mit einer Mittenfrequenz von 85 kHz vorgenommen, um ein optimales Ergebnis zu erhalten.

Verlängert man den jeweiligen Anregungspuls um weitere Schwingungsperioden, so erreicht man eine wesentliche Amplitudenanhebung des Empfangspulses. Die Pulslänge verlängert sich hingegen nur geringfügig. Die Priorität bei den Messungen in dieser Arbeit wird dennoch auf einen kurzen Empfangspuls gelegt, weshalb nur die beiden kurzen Anregungspulse aus Abbildung 5.1 zum Einsatz kommen.

5.3 Bistatische Messungen an Plexiglas mit Laservibrometer

5.3.1 Messaufbau

Zur Klärung, welche Wellenarten bei der Tandemanordnung in Abhängigkeit des Einfallswinkels und des Abstandes vom Sende- zum Empfangsprüfkopf bei Verwendung der ACU-Prüfköpfe auftreten, werden Messungen an der 103 mm (± 1 mm) dicken Plexiglasplatte durchgeführt.

Zum Einsatz kommt die bistatische Prüfkopfanordnung, wie sie in Abbildung 2.5 (d) erläutert ist. Es wird die in Abschnitt 4.2.1 dargestellte Messapparatur „LVIB“ verwendet. Der Messaufbau ist in Abbildung 5.2 dargestellt. Ein ACU-Prüfkopf ist als Sender unter dem Einfallswinkel α_{AS} fest positioniert. Als Empfänger fungiert ein optisch messendes Laservibrometer mit Spiegelscanner, das in einem Abstand von 1,668 m zur Messoberfläche positioniert ist. Der annähernd senkrecht ($\pm 9^\circ$) auf die Plexiglasplatte stehende Laserstrahl tastet automatisiert und punktgenau eine horizontale Messlinie in der Höhe des Senders ab. Die Messung wird mit verschiedenen Einfallswinkeln des Sendeprüfkopfes α_{AS} wiederholt (0° , 2° , 4° , 6° , $7,3^\circ$, 9° , 10° , 12° und 13° ($\pm 1^\circ$)). Angeregt wird der Sendeprüfkopf mit dem Schwingungspuls aus Abbildung 5.1 (e) mit 100 kHz Mittenfrequenz und 200 VPP (VPP = Volt von Peakminimum zu Peakmaximum). Die Messfläche erhält für eine bessere Rückstreuung des Lasers eine aufgeklebte retroreflektierende Folie. Die zeitliche Mittelung der Empfangssignale beträgt 500 Signale/Messpunkt und der Messpunktabstand 2,5 mm.

Wie in Abbildung 5.2 eingezeichnet, befindet sich eine Schallabschirmung neben dem ACU-Prüfkopf. Die Schallabschirmung ist praktisch schallundurchlässig, was durch eine Sandwichbauweise erreicht wird. Sie beinhaltet drei 1 mm dicke Aluminiumbleche, die durch dünne Luftschichten voneinander getrennt sind. Luftschall, der die Abschirmung durchdringen möchte, stößt somit auf sechs große Impedanzsprünge. Die Schallabschirmung ist insofern unerlässlich, da der Prüfkopf mehr oder weniger stark in alle Richtungen Schall aussendet. Dadurch gelangen Luftschallwellen auf direktem Wege und indirekt über Reflexion an der Körperoberfläche vom Sender zum Empfänger. Der Laserstrahl wird durch diese Luftwellen beeinflusst. Durch die Schallabschirmung wird der Laufweg dieser Luftwellen vom Sender zum Empfänger verlängert. Beide Luftwellen müssen um die Abschirmung herumlaufen, weshalb sie annähernd denselben Laufweg aufweisen, weshalb diese im Folgenden als eine einzelne Luftwelle A betrachtet werden. Da sich Schall in Luft langsamer ausbreitet als in Plexiglas, erfolgt schon nach einer kurzen Entfernung x auf der Messlinie eine zeitliche Trennung der Luftschallwelle von den Schallwellen im Plexiglas.

Die Schallgeschwindigkeit der Longitudinalwelle in der Plexiglasplatte c_L wurde durch eine Transmissionsmessung und durch Messungen in monostatischer Prüfkopfanzordnung von beiden Seiten an der Plexiglasplatte bestimmt zu $c_L = 2610$ m/s. Für die gegebene Lufttemperatur von $\vartheta = \sim 24$ °C beträgt die Schallgeschwindigkeit in Luft nach Gl. 2.11 $c_A = 346$ m/s. Der 1. kritische Winkel wird zwischen $\alpha_{1kr} = 7^\circ$ und 8° erwartet. Der 2. kritische Winkel ergibt sich nach Gl. 2.16 zu $\alpha_{2kr} = 15^\circ$.

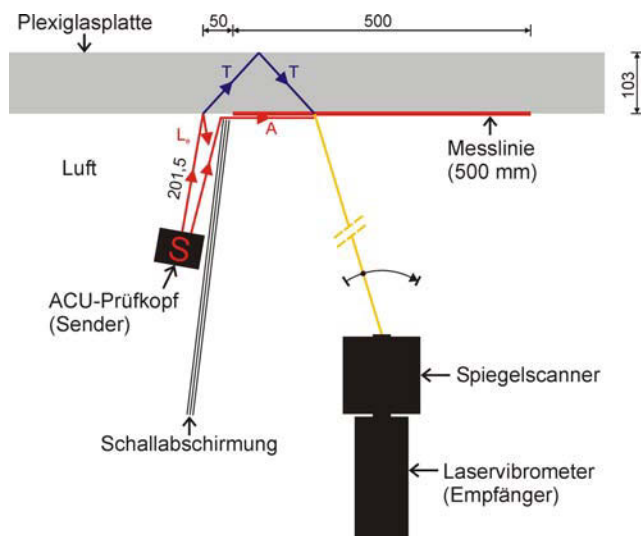


Abbildung 5.2

Messaufbau für Voruntersuchungen an Plexiglas; Bistatische Messung mit ACU-Sendeprüfkopf und scannendem Laservibrometer; Für jeden Einfallswinkel des Senders α_{AS} wird eine Messlinie aufgenommen (hier beispielhaft für $\alpha_{AS} = 10^\circ$ mit zugehörigem theoretischen Wellenverlauf nach dem Strahlenmodell)

5.3.2 Bearbeitung und Auswertung der Messdaten

In Abbildung 5.3 bis Abbildung 5.5 sind auf der linken Seite die Rohdaten in Form von B-Bildern (Abbildung 2.5) dargestellt. Die Zeitachse ist bereits durch die Gesamtvorlaufzeit einschließlich der Laufzeit für den Luftweg korrigiert. Der Koordinatenursprung des Graphen $t = 0 \mu\text{s}$ und $x = 0 \text{ mm}$ entspricht somit dem Schalleintrittspunkt des Pulses (Pulsbeginn) auf der Plexiglasoberfläche.

Für die Bezeichnung der Wellenarten und Wellenartkombinationen werden die Abkürzungen aus Abbildung 2.3 verwendet. Bis auf die Luftwelle A sind immer die Wellenarten im Körper gemeint. Sie werden durch eine Longitudinalwelle in der Luft auf der Sendeseite erzeugt und strahlen auf der Empfängerseite eine Longitudinalwelle in die Luft ab. Folgende Abkürzungen für die Wellenarten werden in der vorliegenden Arbeit verwendet:

- A : Luftwelle
- R : Rayleighwelle
- K : Kriechwelle
- 1.LL, 2.LL, 3.LL : Longitudinalwellen-Rückwandecho 1.LL und deren Vielfachechos 2.LL, 3.LL, usw.
- 1.LL_{th} : theoretisch (über das Brechungsgesetz) bestimmtes Longitudinalwellen-Rückwandecho (schwarzes Kreuz im B-Bild)
- 1.TT, 2.TT, 3.TT : Transversalwellen-Rückwandecho 1.TT und deren Vielfachechos 2.TT, 3.TT, usw.
- 1.TT_{th} : theoretisch (über das Brechungsgesetz) bestimmtes Transversalwellen-Rückwandecho (weißes Kreuz im B-Bild)
- LT \wedge TL : Longitudinalwelle zur Rückwand und durch Modenkonzersion reflektierte Transversalwelle und/oder umgekehrt
- 1?, 2? : nicht identifizierte Wellenarten (vermutlich wird es sich hierbei um Vielfachreflexionen mit Modenkonzersion handeln)

Aus der Form und dem zeitlichen wie örtlichen Auftreten der Wellenzüge in den B-Bildern zu jedem Einfallswinkel des Senders α_{AS} können nun Rückschlüsse auf die Wellenausbreitung getroffen werden. Zunächst fällt auf, dass sich eine Reihe von Wellenanzeigen kreuzen und überlagern. Es entstehen Interferenzmuster. Konstruktive und destruktive Überlagerungen wechseln sich in gewissen Abständen ab. Bei allen Einfallswinkeln des Senders α_{AS} treten immer mindestens zwei geradlinige Wellenzüge auf. Anhand ihrer Steigung sind sie leicht identifizierbar. Dies ist erstens die Rayleighwelle R, die unter dem 2. kritischen Winkel entsteht (siehe Abbildung 2.2 (d)) und zweitens die Luftwelle A, die an der Schallabschirmung gebeugt wird und von dort aus durch die Luft direkt in den Laserstrahl wandert. Aus der Steigung der Rayleighwelle lässt sich deren Geschwindigkeit sehr genau bestimmen zu:

$$c_R = 1254 \text{ m/s.}$$

Der Laufweg der Luftwelle A ist gleich dem kürzesten Weg von der Beugungsstelle an der Abschirmung bis zum Laserstrahl. Da der Laserstrahl in einer Entfernung von 1,668 m von der Messfläche geschwenkt wird, steht er auch in unterschiedlichen Winkeln zur Oberfläche. Für die Luftwelle ergibt sich folglich ein Laufweg, der geringfügig von der x-Achse abweicht. Die Luftwelle A im B-Bild ist somit nur annähernd geradlinig. Deren Steigung würde eine Schallgeschwindigkeit von $c_A \approx 349$ m/s gegenüber der tatsächlichen von 346 m/s ergeben.

5.3.2.1 Unterdrückung der Rayleighwelle und der gebeugten Luftwelle

Zusätzlich zur Rayleighwelle R und der direkten Luftwelle A treten weitere Wellen auf. Um sie besser identifizieren zu können, werden die Daten einem Algorithmus in Anlehnung an [32] unterzogen, mit deren Hilfe sich Wellenzüge aus einem B-Bild trennen und unterdrücken lassen. Die einfache Form dieses digitalen Filters wird z.B. gerne dazu verwendet aus einem Radar-Profileschnitt das Oberflächenecho zu unterdrücken, um Reflexionsanzeigen durch flach unter der Oberfläche liegende Objekte oder sonstige Inhomogenitäten innerhalb der „Totzone“ sichtbar zu machen.

Dieser digitale Filter funktioniert wie folgt: Die innerhalb eines in x-Richtung verschobenen Fensters der Breite N liegenden A-Bilder werden gemittelt und vom aktuellen A-Bild in der Mittenposition des Fensters subtrahiert [24]. In x-Richtung gleich bleibende Signalanteile werden dadurch unterdrückt. Um diesen Algorithmus für möglichst beliebige Wellen zu verwenden - wie z.B. hier zum Unterdrücken der Rayleighwelle R und anschließend auch zur Unterdrückung der Luftwelle A - müssen in einem vorhergehenden Schritt die A-Bilder im B-Bild zeitlich so zueinander verschoben werden, dass die Welle in jedem A-Bild zum gleichen Zeitpunkt auftritt. Außerdem müssen deren Amplituden auf möglichst gleiche Werte gebracht werden. Der Ausgleich in Zeit- und in Amplitudenrichtung geschieht durch so genannte Ausgleichsfunktionen $t(x)$ und $A(x)$, die vorher bestimmt werden müssen.

Die Funktionsweise und Anwendung des Algorithmus wird am Beispiel der in Abbildung 5.5 dargestellten Messung unter einem Einfallswinkel des Senders von $\alpha_{AS} = 12^\circ$ zur Unterdrückung der Rayleighwelle in Anhang A.1.3 gezeigt. Diese Prozedur wird für alle auf der linken Seite in Abbildung 5.3 bis Abbildung 5.5 dargestellten B-Bilder mit dem Programm „US-Analyse“ durchgeführt.

In einem zweiten Schritt wird die an der Abschirmung gebeugte Luftwelle A aus den bearbeiteten B-Bildern unterdrückt. Für die Zeitausgleichsfunktion wird der Einfachheit halber eine Geradenfunktion gewählt, weshalb die Luftwellenanzeige A nicht vollständig beseitigt wird.

Die von der Rayleighwelle R und der Luftwelle A annähernd bereinigten B-Bilder sind in Abbildung 5.3 bis Abbildung 5.5 rechts dargestellt. Die hohe Leistungsfähigkeit des angewendeten Algorithmus wird bei der Gegenüberstellung der gefilterten mit den ungefilterten B-Bildern deutlich. Verdeckte Wellen werden sichtbar und können nun wesentlich besser einer bestimmten Wellenart zugeordnet werden.

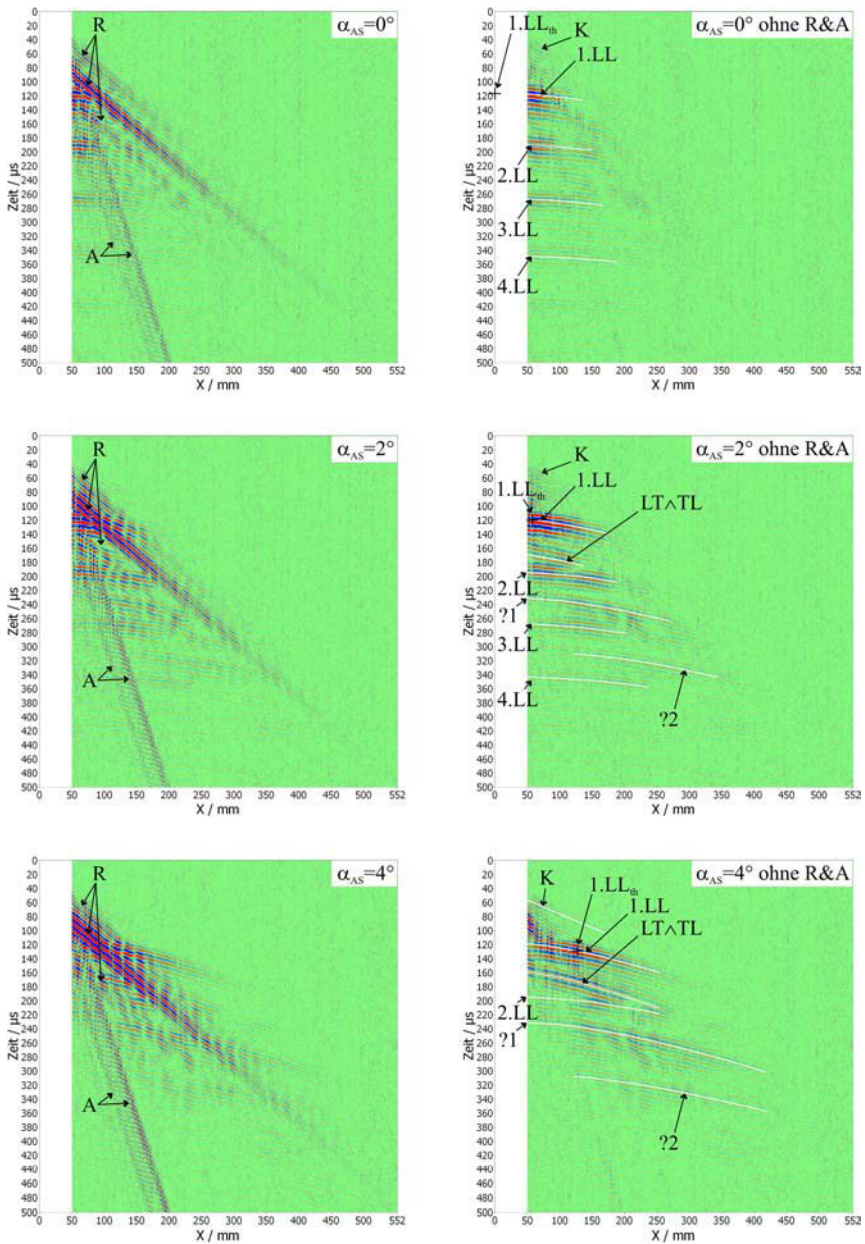


Abbildung 5.3

Bistatische ACU-Messung an Plexiglas bei verschiedenen Einfallswinkeln des Senders α_{AS} ; linke Seite = B-Bild der Rohdaten, rechte Seite = wie linke Seite, jedoch mit digital unterdrückter Rayleigh-R und Luftwelle A; schwarzes Kreuz = theor. erwartetes 1.LL

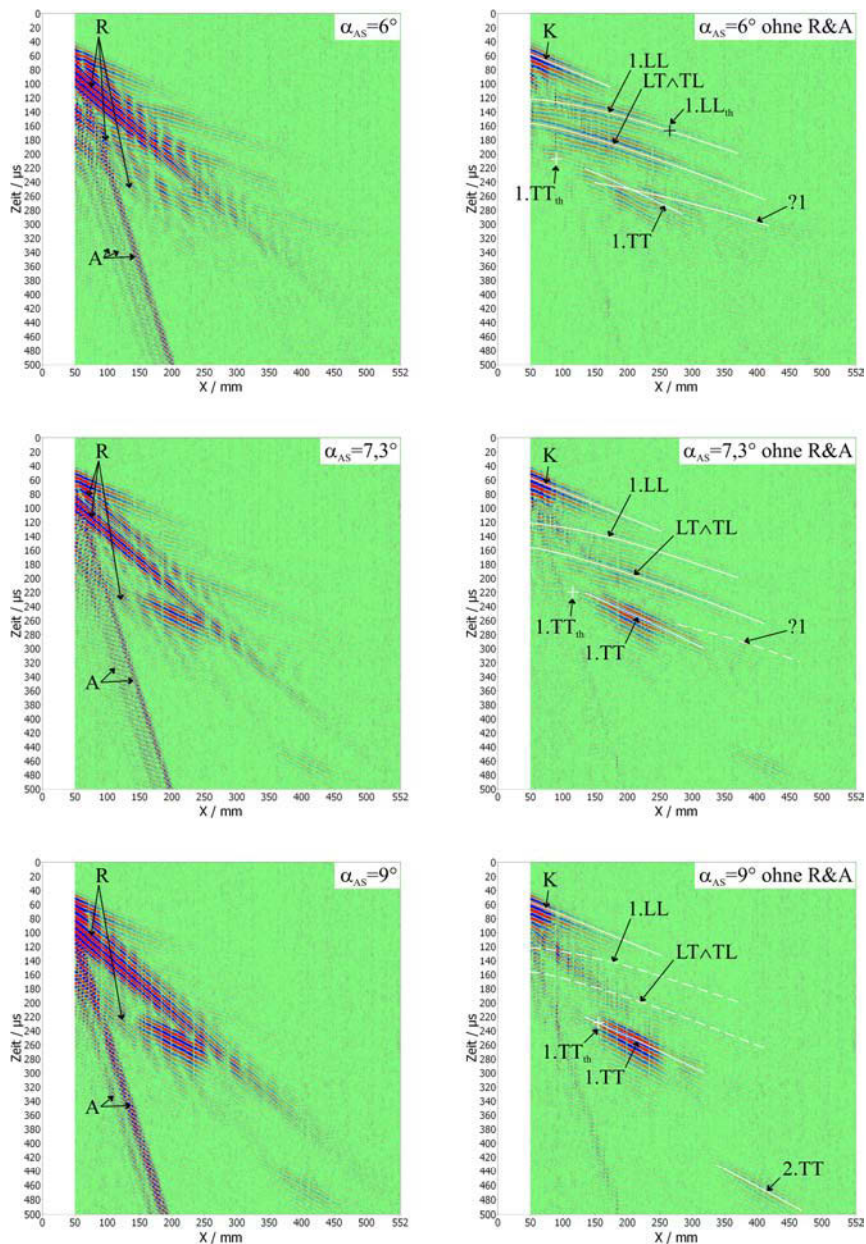


Abbildung 5.4

Bistatische ACU-Messung an Plexiglas bei verschiedenen Einfallswinkeln des Senders α_{AS} ; linke Seite = B-Bild der Rohdaten, rechte Seite = wie linke Seite, jedoch mit digital unterdrückter Rayleigh-R und Luftwelle A; schwarzes Kreuz = theor. erwartetes 1.LL; weißes Kreuz = theor. erwartetes 1.TT; (Fortsetzung von Abbildung 5.3)

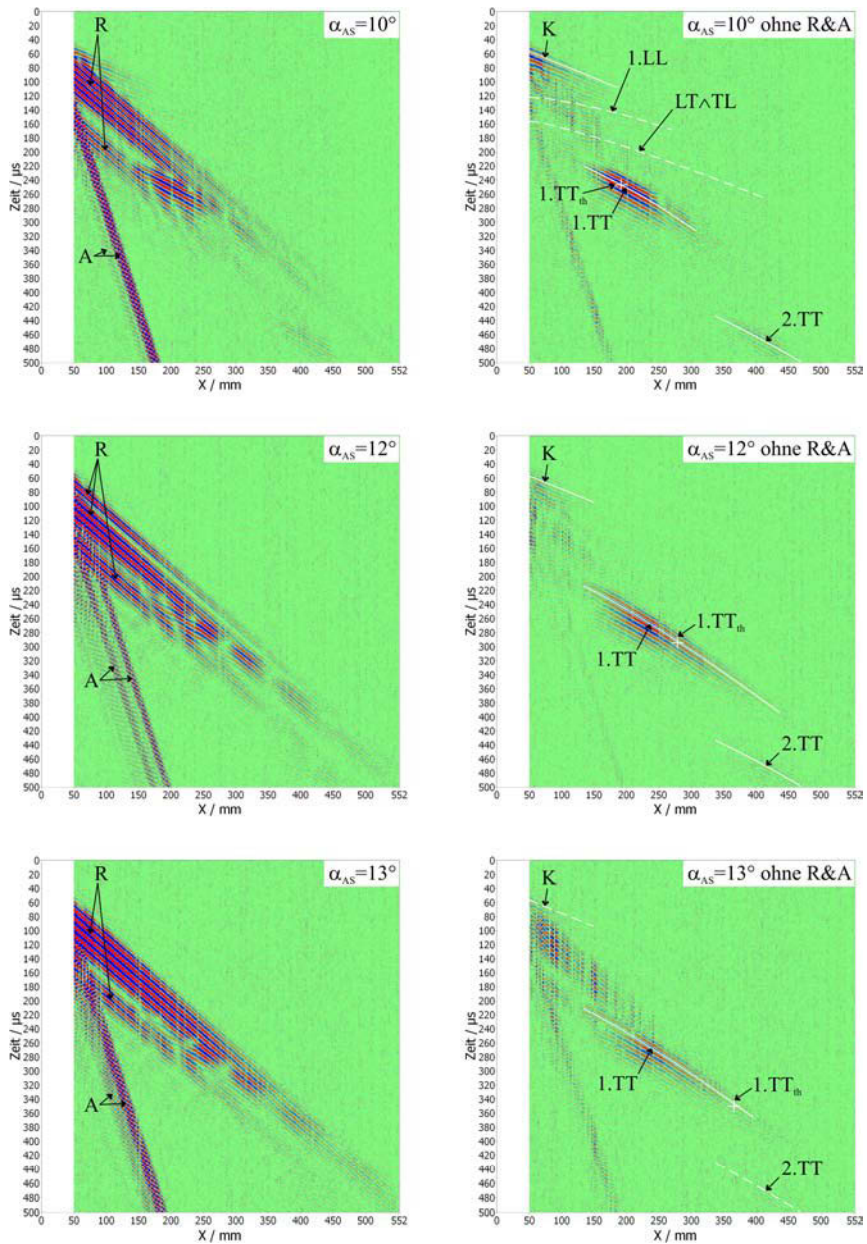


Abbildung 5.5

Bistatische ACU-Messung an Plexiglas bei verschiedenen Einfallswinkeln des Senders α_{AS} ; linke Seite = B-Bild der Rohdaten, rechte Seite = wie linke Seite, jedoch mit digital unterdrückter Rayleigh-R und Luftwelle A; schwarzes Kreuz = theor. erwartetes 1.LL; weißes Kreuz = theor. erwartetes 1.TT; (Fortsetzung von Abbildung 5.4)

5.3.2.2 Wellenartzuordnung über Geschwindigkeitsspektren

Um die auftretenden Wellenarten in den gefilterten B-Bildern in Abbildung 5.3 bis Abbildung 5.5 besser identifizieren zu können, werden Geschwindigkeitsspektren nach Abschnitt 2.11 von den ungefilterten und gefilterten B-Bildern gebildet. Dazu muss zunächst die Gesamtvorlaufzeit wie in Abschnitt 5.3.2 von den Signalen abgezogen werden. Hier bezieht man sich allerdings nicht auf den Ersteinsatz Pulsbeginn, sondern auf das Maximum der Einhüllenden des vom Prüfkopf ausgesandten Pulses. Die Zeitnull wird deshalb um diesen Abstand, der für die ACU-Prüfköpfe $38 \mu\text{s}$ ($\pm 3 \mu\text{s}$) beträgt, verschoben.

Die Geschwindigkeitsspektren der ungefilterten Datensätze unterscheiden sich von den Geschwindigkeitsspektren der gefilterten Datensätze lediglich in den zusätzlichen Anzeigen, die den unterdrückten Wellen R und A zuzuordnen sind. Diese Tatsache bestätigt die erfolgreiche Unterdrückung dieser beiden Wellen im vorhergehenden Abschnitt 5.3.2.1.

Für einen Einfallswinkel des Senders von 4° und 10° sind die Geschwindigkeitsspektren in Abbildung 5.6 links dargestellt. Rechts davon ist jeweils ein NMO-korrigiertes B-Bild für diejenige Schallgeschwindigkeit, die zum lokalen Maximum des Rückwandechos im Geschwindigkeitsspektrum gehört: bei $\alpha_{AS} = 4^\circ$ für $c_{1,LL} = 2730 \text{ m/s}$ und bei $\alpha_{AS} = 10^\circ$ für $c_{1,TT} = 1340 \text{ m/s}$.

Die dabei gemachte Wellenzuordnung vom Geschwindigkeitsspektrum zum B-Bild funktioniert wie folgt:

Dem Geschwindigkeitsspektrum wird für ein lokales Maximum die zugehörige Zeit t_0 und die Schallgeschwindigkeit c entnommen. Für c wird das NMO korrigierte B-Bild erzeugt, in dem auf der Höhe von t_0 der zugehörige Wellenzug horizontal erscheint, wie in Abbildung 5.6 zu sehen. Wie bereits in Abschnitt 2.11.3 erwähnt, sei noch einmal betont, dass nur diejenigen Wellen richtig NMO-korrigiert werden und im Geschwindigkeitsspektrum an der richtigen Stelle mit der maximal möglichen Amplitude auftreten, die aus einer inneren Reflexion oder Vielfachreflexion im Probekörper ohne Modenkonzersion herrühren. Alle anderen Wellen, wie die Rayleigh- (R), Kriech- (K) und gebeugte Luftwelle (A) erscheinen deshalb, wenn überhaupt, nur als Artefakte im Geschwindigkeitsspektrum (also nicht an der richtigen Stelle t_0/c).

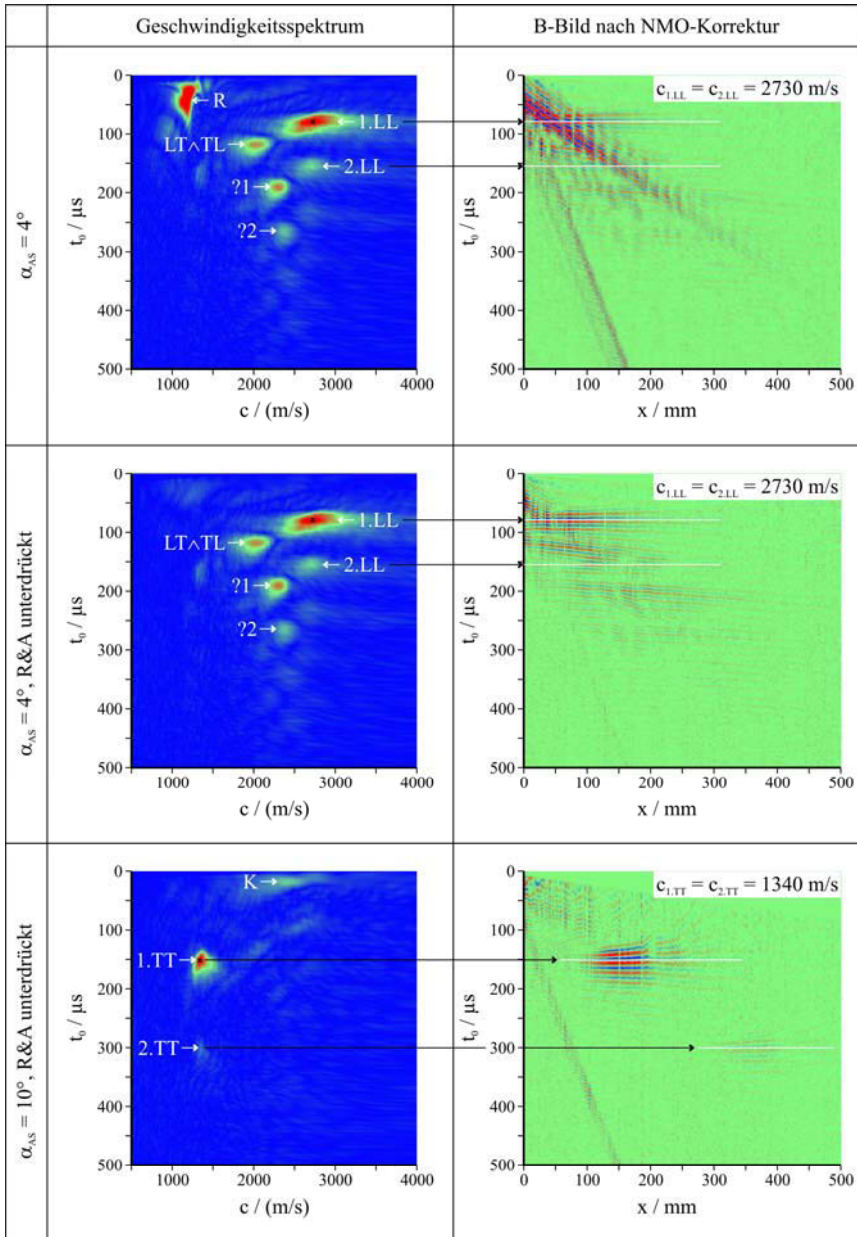


Abbildung 5.6

Geschwindigkeitsspektrum (Einhülle) von Abbildung 5.3 (4°), ($\alpha_{AS} = 4^\circ$ ohne R&A) und Abbildung 5.5 ($\alpha_{AS} = 10^\circ$ ohne R&A) sowie zugehörige NMO-korrigierte B-Bilder einer bestimmten Geschwindigkeit; $x = 0$ mm ist Beginn Messlinie

5.3.2.3 Longitudinalwellen-Rückwandecho

Unter $\alpha_{AS} = 4^\circ$ erhält man mehrere ausgeprägte Longitudinalwellen-Vielfachechos (2.LL und 3.LL). Weitere Reflexionen sind erkennbar, die womöglich durch eine oder mehrfache Modenkonzersion von einer Longitudinal- in eine Transversalwelle oder umgekehrt hervorgerufen werden. Die Reflexion, die zeitlich nach dem ersten Longitudinalwellen-Rückwandecho 1.LL auftritt, müsste eine Longitudinalwelle sein, die an der Rückwand in eine Transversalwelle umgewandelt wird und/oder umgekehrt. Sie wird mit $LT \wedge TL$ abgekürzt. Vor dem 1. kritischen Winkel ähneln sich die Geschwindigkeitsspektren in der Anordnung ihrer Maxima. Ab ungefähr dem 1. kritischen Winkel ändert sich das Geschwindigkeitsspektrum fließend in dasjenige, das in Abbildung 5.6 für $\alpha_{AS} = 10^\circ$ dargestellt ist.

Die Longitudinalwellengeschwindigkeit c_L lässt sich aus zwei verschiedenen Wellen bestimmen: aus der Kriechwelle K (siehe Abbildung 5.4 ($\alpha_{AS} = 6^\circ$ ohne R&A) oder ($\alpha_{AS} = 7,3^\circ$ ohne R&A)) und dem Longitudinalwellen-Rückwandecho 1.LL. Für beide Wellen gibt es wiederum mehrere Möglichkeiten die Geschwindigkeit zu ermitteln, die jedoch alle auf die Form des Wellenzuges im B-Bild zurückgreifen. Hier wird für beide Wellen die Geschwindigkeit über das Geschwindigkeitsspektrum bestimmt. Für die Kriechwelle K muss dazu eine veränderte NMO-Korrektur für im x-t-Diagramm (B-Bild) geradlinig erscheinende Wellen vorgenommen werden. Die sich ergebenden Geschwindigkeiten inklusive derjenigen aus der Transmissionsmessung sind in Tabelle 5.1 aufgelistet:

$c_{L, \text{Transmission}}$	c_K (für $6^\circ - 9^\circ$)	c_{1LL} (für 4°)
2610 m/s	2630 – 2680 m/s	2730 m/s

Tabelle 5.1 Vergleich der Longitudinalwellengeschwindigkeiten c_L bestimmt über Transmissionsanordnung, Kriechwelle K und 1. Longitudinalwellen-Rückwandecho 1.LL

5.3.2.4 Transversalwellen-Rückwandecho

In der Umgebung um $\alpha_{AS} = 10^\circ$ bis 12° entsteht ein ausgeprägtes Transversalwellen-Rückwandecho 1.TT. Zusätzlich erscheint ein Transversalwellen-Vielfachecho 2.TT, das im Geschwindigkeitsspektrum direkt unterhalb von 1.TT bei derselben Geschwindigkeit von $c_T = 1340$ m/s auftritt. Diese Geschwindigkeit würde sich auch ergeben, wenn man Gl. 2.10 bemüht und als Eingangswerte die gemessene Rayleighwellengeschwindigkeit $c_R = 1254$ m/s und die Poisson-Zahl für Plexiglas von $\mu = 0,34$ (entnommen aus [11]) annimmt:

$$c_T = \frac{1}{0,933} \cdot c_R \approx 1340 \frac{m}{s} \quad \text{Gl. 5.1}$$

Der 1. kritische Winkel lässt sich nun mit Gl. 2.16 und $\alpha_{II} = 90$ berechnen zu:

$$\alpha_{\text{krit},1} = 7,6^\circ.$$

5.3.2.5 Schalllaufweg

Über das Brechungsgesetz Gl. 2.16 sowie mit der Kenntnis der vorhandenen Plattendicke $d = 103$ mm und der Schallgeschwindigkeiten $c_L = 2610$ m/s und

$c_T = 1340$ m/s können die theoretischen Werte x_{th} und t_{th} der Schallaustrittspunkte berechnet werden. Dies wird erstens für das Longitudinalwellen-Rückwandecho 1.LL und das Transversalwellen-Rückwandecho 1.TT getan. Sie sind in der Abbildung 5.3 bis Abbildung 5.5 auf der rechten Seite als schwarze und weiße Kreuze eingezeichnet und erlauben einen Vergleich mit den gemessenen Werten. Als Bezugspunkt wird das Maximum der Einhüllenden des vom Prüfkopf abgestrahlten Pulses verwendet, wie dies bei den Geschwindigkeitsspektren der Fall ist.

Ein Vergleich zeigt, dass die theoretisch berechneten Zeiten t_{th} recht gut auf den richtigen Phasen der jeweiligen Rückwandechoanzeigen bzw. auf deren Verlängerung liegen.

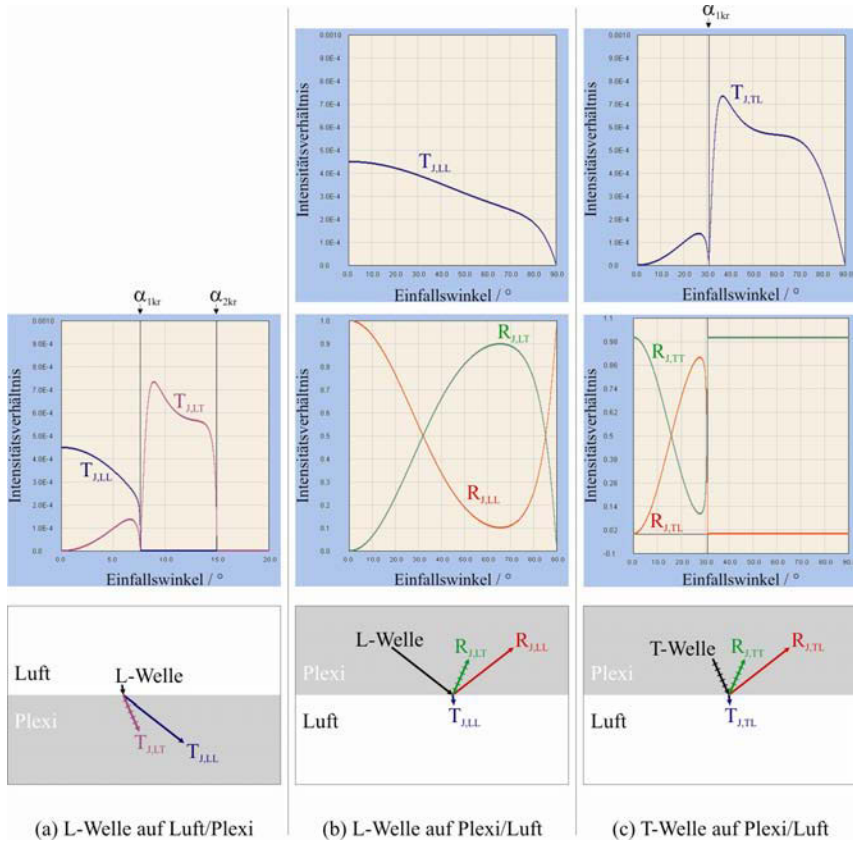


Abbildung 5.7

Reflexionsfaktoren R_j und Transmissionsfaktoren T_j bezogen auf die Intensitäten (siehe Gl. 2.14 und Gl. 2.15) an den Grenzflächen Luft/Plexiglas und Plexiglas/Luft einer einfallenden Longitudinalwelle L-Welle und Transversalwelle T-Welle in Abhängigkeit des Einfallswinkels; 2. Index = einfallende Welle, 3. Index = gebrochene oder reflektierte Welle; Die Länge der Strahlpfeile in den unteren Bildern entspricht der Schallgeschwindigkeit; Bilder berechnet und entnommen aus CREWES Energy Ratio Explorer 1.0, www.crewes.org

Die Stellen x_{th} liegen hingegen teilweise weit entfernt von den tatsächlichen Stellen der maximalen Rückwandechoanzeigen. Der Schalllaufweg im Plexiglas von 1.LL und 1.TT entspricht demzufolge nicht den über das Brechungsgesetz berechneten Laufwegen.

Der Grund für die Abweichung von t aber vor allem von x liegt in der vereinfachten Annahme bezüglich der Berechnung des Schalllaufweges, wie sie in Abbildung 2.7 (b) skizziert ist.

Bei der Betrachtung der Longitudinal- und Transversalwellenechoanzeigen fällt auf, dass sie sich mit zunehmendem Einfallswinkel des Senders wesentlich langsamer in oder entgegen der x -Richtung verschieben, als nach dem Brechungsgesetz erwartet. Dies liegt unter anderem an den winkelabhängigen und grenzflächenspezifischen Transmissions- und Reflexionsfaktoren, deren Produkt bei einem bestimmten Einfallswinkel ein Maximum aufweist. Die optimalen Einfallswinkel nach den Zöppritz-Gleichungen (siehe [70]) lassen sich aus den ermittelten Funktionen in Abbildung 5.7 folgendermaßen berechnen:

$$\alpha_{opt,1,LL} = \max\left(|T_{LL,Luft/Plexi} \cdot R_{LL,Plexi/Luft} \cdot T_{LL,Plexi/Luft}|\right) \quad \text{Gl. 5.2}$$

$$\alpha_{opt,1,TT} = \max\left(|T_{TT,Luft/Plexi} \cdot R_{TT,Plexi/Luft} \cdot T_{TT,Plexi/Luft}|\right). \quad \text{Gl. 5.3}$$

Danach ergibt sich für den optimalen Einfallswinkel des Longitudinalwellen-Rückwandechos 1.LL ein Einfallswinkel von 0° und für das Transversalwellen-Rückwandecho 1.TT ein Einfallswinkel, der etwas größer als der 1. kritische Winkel von $7,6^\circ$ ist. Die anderen in Abschnitt 2.7 genannten Einflüsse, wie z.B. die Richtcharakteristik des Prüfkopfes, sind hierbei allerdings noch nicht berücksichtigt.

Bei den Messungen verhält es sich bezüglich der optimalen Einfallswinkel ähnlich. Für 9° und 10° , also etwas über dem 1. kritischen Winkel, ergibt sich für 1.TT das gemessene maximale Rückwandecho, wo auch der Schallaustrittspunkt mit der berechneten x -Stelle näherungsweise übereinstimmt.

Für die Detektion des Rückwandechos über die Transversalwelle ergibt sich die beste Übereinstimmung der aus dem Geschwindigkeitsspektrum gemessenen mit den theoretisch erwarteten Werten bei einem Einfallswinkel des Senders von $\alpha_{AS} = 10^\circ$:

$\alpha_{AS} = 10^\circ$; 1.TT	theoretisch	gemessen aus Geschwindigkeits- spektrum
c	1340 m/s	1340 m/s
t₀	154 μ s	152 μ s
d	103 mm	102 mm
x	187 mm	235 mm

Tabelle 5.2 Rückwandecho der Transversalwelle 1.TT bei einem Einfallswinkel des Senders von $\alpha_{AS} = 10^\circ$; theoretische und gemessene Werte

Bei der Bestimmung der Schallgeschwindigkeit der Longitudinalwelle über das Geschwindigkeitsspektrum ergibt sich bei einem Einfallswinkel des Senders von $\alpha_{AS} = 4^\circ$ die beste Übereinstimmung mit dem aus der Transmission ermittelten Werten:

$\alpha_{AS} = 4^\circ$; 1.LL	theoretisch	gemessen aus Geschwindigkeits- spektrum
c	2610 m/s	2730 m/s
t_0	78,9 μ s	79,6 μ s
d	103 mm	109 mm
x	58 mm	~ 120 mm

Tabelle 5.3 Rückwandecko der Longitudinalwelle 1.LL bei einem Einfallswinkel des Senders von $\alpha_{AS} = 4^\circ$; theoretische und gemessene Werte

5.3.2.6 Störende Interferenzen

Sowohl das 1.LL bei $\alpha_{AS} \leq 4^\circ$ als auch das 1.TT bei $7,3^\circ \leq \alpha_{AS} \leq 13^\circ$ weisen eine starke Rückwandeckoanzeige auf. Allerdings wirkt die an der Abschirmung gebeugte Luftwelle A und die Rayleighwelle R störend, da sie mit dem jeweiligen Rückwandecko interferieren. Anhand der A-Bilder sei dies noch einmal in Abbildung 5.8 demonstriert.

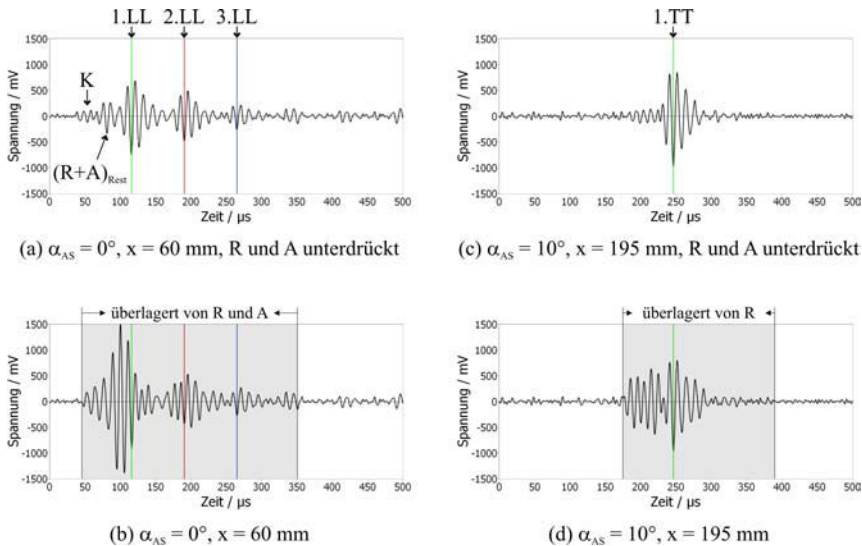


Abbildung 5.8 Vergleich von A-Bildern bezüglich des Einflusses von Rayleighwelle R und Luftwelle A auf das Rückwandecko; α_{AS} = Einfallswinkel des Senders; die A-Bilder sind aus den B-Bildern in Abbildung 5.3 ($\alpha_{AS} = 0^\circ$ und $\alpha_{AS} = 0^\circ$ ohne R&A) und Abbildung 5.5 ($\alpha_{AS} = 10^\circ$ und $\alpha_{AS} = 10^\circ$ ohne R&A)

Durch Interferenz kann es zu Fehlinterpretationen kommen. So wird z.B. irrtümlich ein falscher Puls oder eine falsche Phase gewählt, was dann zu einer fehlerhaften Laufzeitbestimmung führt. Unter Umständen kann es sogar durch destruktive

Interferenz zu einer nahezu vollständigen Auslöschung von Nutz- und Störsignal kommen, wenn nämlich beide Signale Amplituden gleicher Größe aufweisen.

5.3.3 Fazit

Die Voruntersuchungen an der Plexiglasplatte mit einem ACU-Prüfkopf als Sender und einem scannenden Laservibrometer als Empfänger zeigen eine starke Winkelabhängigkeit der Empfangssignale vom Einfallswinkel. Je nach Einfallswinkel treten unterschiedliche Reflexionen an der Rückwand aber auch Oberflächenwellen auf. Die prinzipielle Machbarkeit von luftgekoppeltem Ultraschallecho mit Laservibrometer ist damit für Plexiglas bewiesen.

Sowohl das Longitudinalwellen-Rückwandecho 1.LL bei $\alpha_{AS} \leq 4^\circ$ als auch das Transversalwellen-Rückwandecho 1.TT oberhalb des 1. kritischen Winkels bei $7,3^\circ \leq \alpha_{AS} \leq 13^\circ$ weisen eine starke Rückwandechoanzeige auf. Allerdings wirkt die an der Abschirmung gebeugte Luftwelle A und die Rayleighwelle R störend, da sie mit dem Rückwandecho interferieren. Beide Wellenarten konnten mittels digitaler Signalbearbeitung unterdrückt werden.

Die Schallabschirmung erweist sich als unabdingbar.

5.4 Bistatische Messungen an Plexiglas mit zwei luftgekoppelten Prüfköpfen

5.4.1 Einleitung

Der Nachteil der Messungen im vorhergehenden Abschnitt 5.3 bei der Verwendung des Laservibrometers ist die erforderliche hohe zeitliche Mittelung, die zu einer langen Messzeit führt. Hinzu kommt die Notwendigkeit einer retroreflektierenden Folie, die auf den Körper aufgeklebt werden muss. Für die praktische Anwendung ist deshalb der Einsatz eines Laservibrometers mit der gegebenen Empfindlichkeit nicht geeignet.

Da von den ACU-Prüfköpfen eine höhere Empfindlichkeit erwartet wird als von dem Laservibrometer, soll durch die Verwendung eines ACU-Prüfkopfes statt des Laservibrometers eine Verbesserung des Verfahrens erzielt werden. Hinzu kommt die Tatsache, dass der ACU-Prüfkopf eine wesentlich gerichteteren Prüfkopfcharakteristik (kleiner Öffnungswinkel) aufweist als das Laservibrometer. Dadurch sollten vom ACU-Prüfkopf weniger Wellenarten gleichzeitig empfangen werden, als dies beim Laservibrometer der Fall war.

Für die ACU-Prüfköpfe stand zu diesem Zeitpunkt noch kein geeigneter Scanner zur Verfügung, weshalb die Messungen manuell vorgenommen wurden. Aufgrund des hohen Zeitaufwands wurden deshalb nur Messungen unter ausgesuchten Einfallswinkeln durchgeführt. Die Erkenntnisse aus Abschnitt 5.3 erweisen sich dabei hinsichtlich des optimalen Messaufbaus und der Auswertung als hilfreich.

5.4.2 Messaufbau

Zum Einsatz kommt die Messapparatur „Manuell“, wie sie in Abschnitt 4.2.1 erläutert ist. Der Messaufbau ist in Abbildung 5.9 dargestellt. Zusätzlich zu dem ACU-Empfangsprüfkopf unterscheidet sich der Messaufbau zu demjenigen in

Abschnitt 5.3 im Wesentlichen in der Verwendung einer zweiten Schallabschirmung, welche mit dem Empfangsprüfkopf mitgeführt wird. Sie stellt sich als unbedingt erforderlich heraus. Der Laufweg der Luftschallwelle A kann dadurch verlängert werden, wodurch der an den Abschirmungen gebeugte Luftschall den Empfangsprüfkopf erst zu einer späteren Zeit als die erwarteten Nutzsignale erreicht. Da zwei Abschirmungen verwendet werden, kann der Aufbau auf zwei Aluminiumbleche pro Abschirmung reduziert werden. Die jeweils vordere Abschirmkante befindet sich möglichst dicht am Probekörper, ohne ihn jedoch zu berühren (Abstand 1 bis 2 mm). Prüfköpfe und Abschirmungen sind voneinander vollständig getrennt. Dies bedeutet aber auch, dass bei einer Positionsänderung eines Prüfkopfes und der zugehörigen Abschirmung diese nicht mehr genau gleich zueinander stehen, was in den Messungen durch Unstetigkeiten der Wellenanzeigen in x -Richtung zu erkennen ist.

Sende- und Empfangsprüfkopf werden auf eine Laborschienenvorrichtung mit Laufschlitten, Rotations-, Neige- und Translationseinheiten fixiert, um eine genaue Kalibrierung und Einstellung der Prüfköpfe zu gewährleisten. Gemessen wird unter einem Einfallswinkel des Sende- und Empfangsprüfkopfes von $\alpha_A = 9^\circ$. Der Messaufbau ist damit annähernd optimiert für die Detektion eines Transversalwellen-Rückwandechos. Der Empfangsprüfkopf wird entlang einer horizontalen 600 mm langen Messlinie mit einem Messpunktabstand von 2 mm verfahren. Der kleinste Abstand zwischen dem Schalleintrittspunkt und den Schallaustrittspunkten auf der Plexiglasoberfläche beträgt 101 mm.

Abweichend von den Einstellungen der vorhergehenden bistatischen Messungen mit Laservibrometer wird hier eine zeitliche Mittelung von 20 statt 500 vorgenommen.

Über zwei Messreihen soll nachfolgend berichtet werden. Sie unterscheiden sich dadurch, dass bei der zweiten ein Silikonstreifen auf die Plexiglasplatte rechts von der Schallabschirmung auf der Sendeseite aufgetragen ist, wie in Abbildung 5.9 dargestellt. Mit dem Silikonstreifen soll die Rayleighwelle R unterdrückt werden, um das Transversalwellen-Rückwandecho 1.TT möglichst unbeeinflusst von anderen Wellen detektieren zu können. Er hat eine Breite von 25 mm, die damit größer als die Wellenlänge der Rayleighwelle von ~ 13 mm ist.

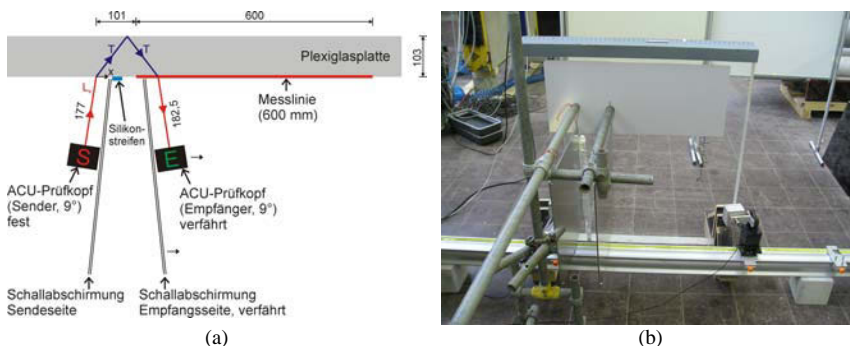


Abbildung 5.9

Messaufbau für die bistatischen Messungen an Plexiglas mit zwei ACU-Prüfköpfen und auf die Plexiglasplatte aufgeklebten Silikonstreifen zwischen den Schallabschirmungen: (a) Ansicht von oben; (b) Foto vom Messaufbau

5.4.3 Messergebnisse

Es ergeben sich die in Abbildung 5.10 dargestellten Diagramme: links oben das B-Bild bei Messung ohne Silikonstreifen, darunter das A-Bild entlang der schwarzen Linie im B-Bild, bei der das Transversalwellen-Rückwandecho 1.TT mit maximaler Amplitude auftritt; rechts das Pendant mit Silikonstreifen.

Die Zeitachse ist bereits durch die Gesamtvorlaufzeit einschließlich der Laufzeit für den Luftweg korrigiert (Bezugspunkt ist der Pulsbeginn).

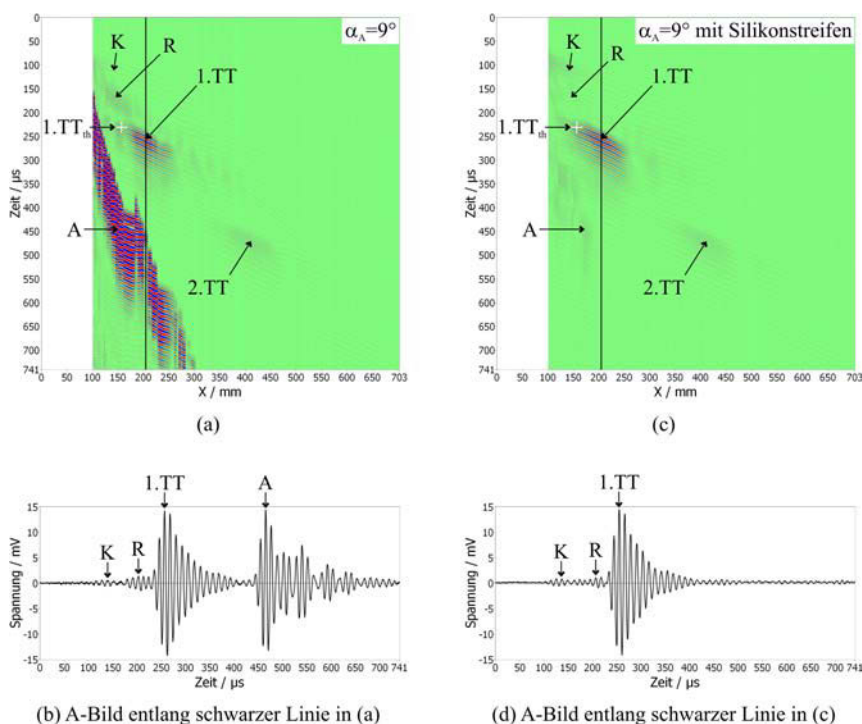


Abbildung 5.10

Messergebnisse der ACU-Messungen bei bistatischer Prüfkopf-anordnung an der 103 mm dicken Plexiglasplatte mit Einfallswinkeln von $\alpha_A = 9^\circ$ für ein Transversalwellen-Rückwandecho 1.TT: links bei Messaufbau ohne Silikonstreifen (a) und (b); rechts mit Silikonstreifen auf Plexiglasplatte zwischen den Abschirmungen zur Unterdrückung von Oberflächenwellen (c) und (d)

5.4.3.1 Vergleich mit Laservibrometermessung

Die Verbesserung des Messsystems durch den ACU-Empfangsprüfkopf zum Laservibrometer wird im Folgenden anhand der wesentlichen Unterschiede in den B-Bildern (Abbildung 5.10 und Abbildung 5.4 ($\alpha_A = 9^\circ$)) dargestellt.

Das Signal-zu-Rausch-Verhältnis von 51 des Transversalwellen-Rückwandechos 1.TT ist ungefähr vier Mal größer als das mit Laservibrometer gemessene, obwohl eine 25-fach geringere Mittelung verwendet wurde. Dies spricht für eine

außerordentlich hohe Empfindlichkeit der ACU-Prüfköpfe, verglichen mit dem Laservibrometer. Auch ohne Mittelung erhält man hier gute Ergebnisse. Vielfachechos des Transversalwellen-Rückwandechos bis 3.TT sind gut erkennbar.

Abgesehen von der um die Abschirmungen herumlaufenden Luftwelle A treten alle anderen Wellen im B-Bild, bezogen auf 1.TT, mit einer geringeren Amplitude auf als bei der Detektion mit einem Laservibrometer. Dies liegt an den unterschiedlichen Richtcharakteristiken der beiden Prüfköpfe. Der hier verwendete ACU-Prüfkopftyp kann aufgrund seines kleinen Öffnungswinkels von $\gamma_{-6\text{dB(Freifeld)}} = 4,6^\circ$ im Sendebetrieb nur ausgewählte Wellen im Plexiglas anregen bzw. im Empfangsbetrieb in einem bestimmten Einfallswinkelbereich empfangen. Die Rayleighwelle R, die Kriechwelle K und die an der Rückwand reflektierte Transversalwelle 1.TT strahlen allesamt Longitudinalwellen in die Luft ab. Diese treten jedoch gemäß dem Brechungsgesetz unter verschiedenen Einfallswinkeln an der Grenzfläche Plexiglas/Luft auf und treffen den Prüfkopf unter einem bestimmten Winkel zur akustischen Achse (siehe Abbildung 2.6). Nur wenn die Ultraschallwellen annähernd auf der akustischen Achse den Empfänger erreichen, werden sie mit einer großen Amplitude vom Wandler aufgenommen. Hingegen misst das Laservibrometer die Teilchengeschwindigkeitskomponente in Laserstrahlrichtung an der Grenzfläche Plexiglas/Luft und besitzt damit einen großen Öffnungswinkel im Plexiglas. Laservibrometer können deshalb alle Wellenarten mit einer einzelnen Messung mehr empfangen.

Diese Tatsache erweist sich als wesentlicher Vorteil der planaren ACU-Prüfköpfe, um störende Wellen klein zu halten.

Die nicht gleichmäßig mitgeführte Abschirmung auf der Empfangsseite führt zu einer unstetigen Anzeige der Wellen in der Laufzeit und der Amplitude. Dabei werden die größten Änderungen bei denjenigen Wellen beobachtet, die am stärksten von der Plexiglasplatte in die Luft gebrochen werden. Die Amplitudenabnahme kommt dadurch zustande, dass die Abschirmung teilweise in die von der Plexiglasplatte abgestrahlten Schallwellen hineinragt. Dies geschieht am ehesten bei der in die Luft abgestrahlten Rayleighwelle, da sie unter dem größten Winkel (2. kritischer Winkel) auftritt. Die Kriechwelleanzeige K unter dem kleineren 1. kritischen Winkel bleibt davon relativ unbeeinflusst. Die abgestrahlte Transversalwellen-Rückwandeckowelle liegt zwischen diesen beiden Winkeln und zeigt ebenfalls Unstetigkeiten in der Amplitude. Mit den Unstetigkeiten in der Laufzeit verhält es sich ähnlich. Große Unstetigkeiten in der Laufzeit entstehen bei der Rayleighwelle, erklärbar durch Beugung von Schallanteilen an der Abschirmkante. Sehr gering werden sie bei der Transversalwellen-Rückwandeckoanzeige. Bei der Kriechwellenanzeige treten keine Laufzeitänderungen auf.

5.4.3.2 Auswertung der Messung mit Silikonstreifen

Der Silikonstreifen an der Plexiglasplatte wird für eine zweite Messung zur Unterdrückung der Rayleighwelle angebracht. Vergleicht man das entstandene B-Bild in Abbildung 5.10 (c) mit demjenigen ohne Silikonstreifen in Abbildung 5.10 (a), so fällt zunächst die stark abgefallene Amplitude der an den Abschirmungen gebeugten Luftwelle A auf. Anscheinend lässt sich die Luftwelle durch zusätzliche Beugungseffekte und Schallschwächung, wie hier am Silikonstreifen, deutlich minimieren.

Dieser Effekt wird später bei den Messungen mit dem Saugscanner in Abschnitt 8.3 ausgenutzt.

Die Amplitude der Rayleighwelle nimmt durch den Silikonstreifen ab, da sie wie in [52] beschrieben, gegen Fehler der Oberfläche selbst, auch gegen anhaftende Fremdstoffe, Schmutz und Flüssigkeitstropfen, empfindlich ist, die Kriechwelle dagegen nur gegen Fehlstellen unter der Oberfläche. Die Amplitude der Kriechwelle kann deshalb nicht reduziert werden. Bei übersteuerter Darstellung der B-Bilder (Abbildung 5.10 (a) und (c)) sind auch die im Verhältnis zum ersten Transversalwellen-Rückwandecho 1.TT geringen Amplituden der Kriechwelle K, Rayleighwelle R und der Vielfachechos 2.TT und 3.TT deutlich erkennbar (hier nicht abgebildet).

5.4.4 Fazit

Die Verwendung von zwei ACU-Prüfköpfen für die Tandemanordnung erweist sich als wesentlich geeigneter, als der Einsatz eines Laservibrometers als Empfänger. Die ACU-Prüfköpfe sind wesentlich empfindlicher, was sich in einem höheren Signal-zu-Rausch-Verhältnis zeigt.

Durch den kleinen Öffnungswinkel der ACU-Prüfköpfe (planare Prüfköpfe) treten bei richtig eingestelltem Einfallswinkel störende Wellen, wie z.B. die Rayleighwelle, wesentlich schwächer auf als mit einem Laservibrometer. Dadurch setzt sich das Transversalwellen-Rückwandecho 1.TT bei einem Einfallswinkel von $\alpha_A = 9^\circ$ eindeutig von allen anderen Wellen ab. Selbst das 2. Vielfachecho 3.TT kann noch detektiert werden.

5.5 Einfluss des Prüfkopfabstandes zur Körperoberfläche

5.5.1 Einleitung

Neben den Einstellparametern Einfallswinkel und Abstand vom Sende- zum Empfangsprüfkopf muss der Einfluss des Sende- und des Empfangsprüfkopf-abstandes zur Körperoberfläche als ein weiterer Einstellparameter für eine optimierte Tandemanordnung ermittelt werden.

Die Wellenausbreitung der verwendeten ACU-Prüfköpfe wird anhand deren Richtcharakteristik (Abbildung 4.3) deutlich. Da es sich bei diesen um Planarprüfköpfe handelt, senden sie relativ ebene Wellen in Richtung der Schallachse aus. Der natürliche Fokuspunkt in Luft liegt bei ihnen bei ungefähr 270 mm vor dem Prüfkopf, bei einem Öffnungswinkel zur akustischen Schallachse von $\gamma_{-6dB(\text{Freifeld})} = \gamma_{0,5(\text{Freifeld})} \approx 4,6^\circ$. Bei Messungen an Festkörpern ändert sich jedoch die Wellenausbreitung infolge der Brechung an der Grenzfläche von Luft zum Festkörper. Dadurch kann eine erhebliche Verschiebung des Fokuspunktes und Änderung des Schallöffnungswinkels auftreten, was sich wiederum auf die Empfangssignalstärke auswirkt. Dieser Effekt und dessen Auswirkung auf das Empfangssignal soll für die ACU-Prüfköpfe experimentell untersucht werden, um letztlich den bestmöglichen Prüfkopf-abstand von Sender und Empfänger zur Körperoberfläche für die Tandemanordnung verwenden zu können.

5.5.2 Prüfkopfabstand bei senkrechter Einschallung in Transmission

Um das Problem zunächst zu vereinfachen, wird der Fall einer einfachen Transmissionsmessung mit senkrechtem Schalleinfall (d.h. Einfallswinkel $\alpha_A = 0^\circ$) betrachtet.

5.5.2.1 Messaufbau

Es wurden Messungen an der 103 mm dicken Plexiglasplatte durchgeführt. Der Messaufbau ist in Abbildung 5.11 dargestellt. Um allein den Einfluss des Prüfkopf-abstandes eines einzelnen Prüfkopfes zu betrachten, wird auf der Empfangsseite ein Laservibrometer verwendet. Mit diesem werden zwei dicht nebeneinander liegende Messlinien in einem Abstand von 1 mm und auf Höhe des Sendeprüfkopfes entlang der Plexiglasoberfläche abgescannt, um die normal zur Oberfläche stehende Komponente der Teilchengeschwindigkeit (Schnelle) punktgenau messen zu können. Die 300 mm langen Messlinien erfassen einen Bereich von 150 mm links und rechts der Schallachse mit einem Messpunktabstand von 1 mm. Die Messungen werden für folgende Sendeprüfkopf-abstände zur Körperoberfläche durchgeführt: (10, 20, 30, ..., 450, 500, 600, 700, 800, 900 und 1000 mm). Aufgrund der Dicke der Plexiglasplatte liegen die Messpunkte immer im Fernfeld des Sendeprüfkopfes. Die verwendete Messapparatur „LVIB“ ist in Abschnitt 4.2.1 erläutert. Wie in Abschnitt 5.3 wird der Sendeprüfkopf mit einem Schwingungspuls (siehe Abbildung 5.1 (e)) mit 100 kHz Mittenfrequenz und 200 VPP angeregt, sowie eine retroreflektierende Folie verwendet. Die zeitliche Mittelung beträgt 100 Signale/Messpunkt.

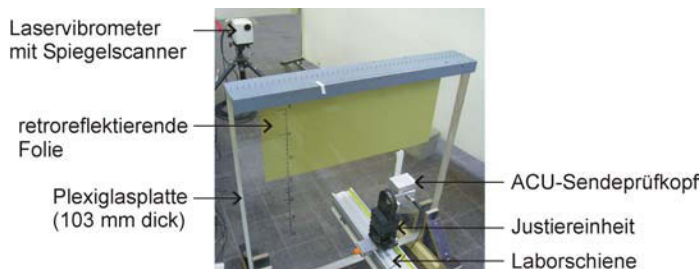


Abbildung 5.11 Messaufbau zur Bestimmung des Prüfkopf-abstandes bei senkrechter Einschallung in Transmissionsanordnung, gemessen mit Laservibrometer

5.5.2.2 Bearbeitung und Darstellung der Messdaten

Es interessiert der Amplitudenverlauf entlang der Messlinien in Abhängigkeit von dem Sendeprüfkopf-abstand zur Körperoberfläche. Um dies in einem einzigen Graphen darstellen zu können, wird für jedes Signal einer Messlinie das Maximum der Einhüllenden mit dem Programm „US-Analyse“ (siehe Anhang A.1) automatisiert ausgewählt und die Amplitudenwerte der Einhüllenden als ASCII-Datei ausgegeben. Da die beiden Messlinien dicht beieinander liegen, können für ein qualitativ besseres Ergebnis die gepickten Werte einer Messlinie mit denen der anderen Messlinie gemittelt werden. Alle Daten zusammen ergeben einen 3D-Datensatz, bei dem jedem Sendeprüfkopf-abstand und X auf der Messlinie ein Amplitudenwert zugeordnet ist.

In Abbildung 5.12 ist der 3D-Datensatz als dreidimensionaler Graph und in Form von Projektionen in die drei Achsrichtungen dargestellt. Die Amplitudenwerte sind dort relativ zur größten Amplitude in Prozent angegeben.

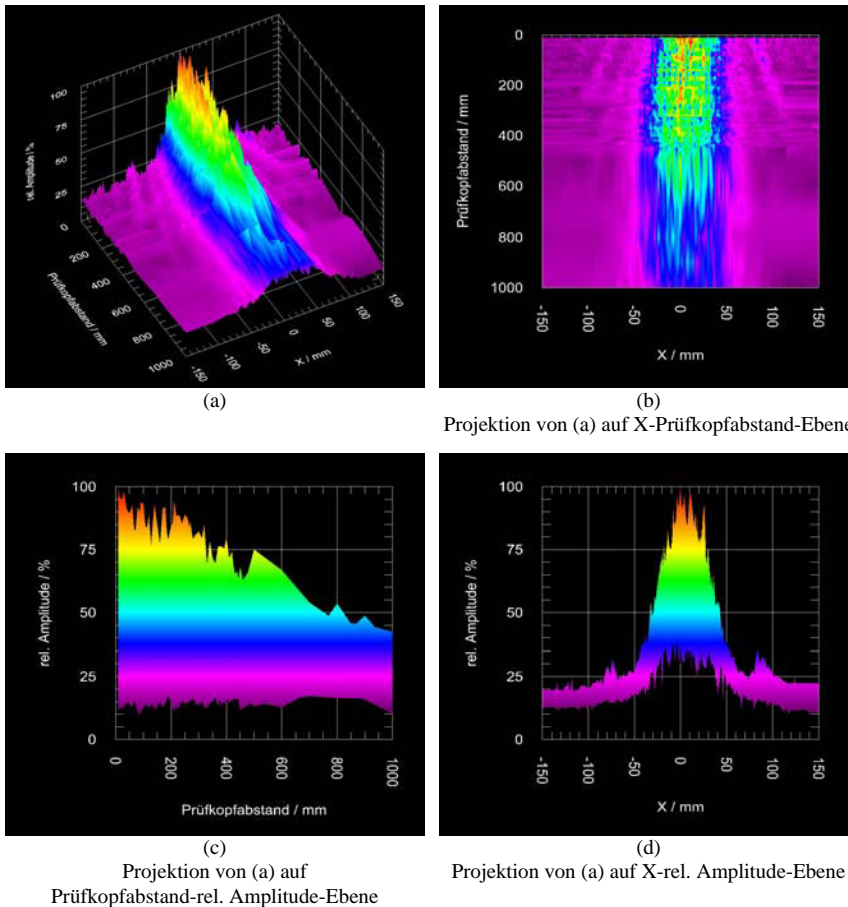


Abbildung 5.12 Einfluss des Sendeprüfkopfabstandes auf die Amplitudenverteilung einer durch eine 103 mm dicken Plexiglasplatte transmittierten Schallwelle, gemessen mit einem senkrecht zur Plexiglasplatte ausgerichteten Laservibrometer; rel. Amplitude = Maximum der Einhüllenden bezogen auf das größte Maximum der Einhüllenden aller Empfangssignale, Prüfkopfabstand = Abstand des ACU-Sendeprüfkopfes zur nächstgelegenen Plexiglasoberfläche, X = Stelle auf der Messlinie, die auf der dem Sender abgewandten Plexiglasoberfläche liegt

Um die Schallbündelbreite und den Öffnungswinkel bei 0,5 der maximalen Amplitude näherungsweise bestimmen zu können, sind in Abbildung 5.13 die Messlinien auf ihren Maximalwert normiert.

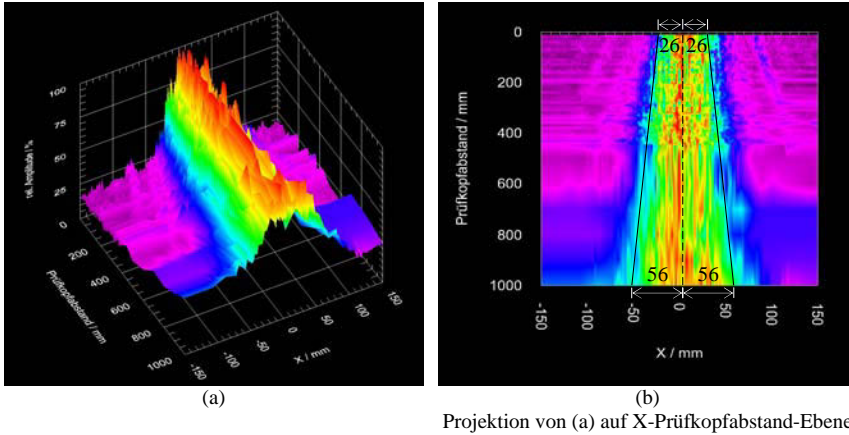


Abbildung 5.13 wie Abbildung 5.12, jedoch mit Normierung der Messlinien auf ihren Maximalwert

5.5.2.3 Auswertung

Es sei zunächst erwähnt, dass die Messungen nicht die Richtcharakteristik im Plexiglas wiedergeben. Die Richtcharakteristik würde man erhalten, wenn man an jedem Messpunkt in Richtung der Schallausbreitung misst. Stattdessen wurde entlang einer parallel zur Sendeprüfkopfoberfläche ausgerichteten Messlinie auf der ebenen Plexiglasoberfläche mit näherungsweise senkrecht zur Messlinie ausgerichtetem Laserstrahl gemessen. Um Verwechslungen zu vermeiden, wird es hier als (eindimensionales) Schallfeldprofil bezeichnet. Die Abweichung vom Schallfeldprofil zur Richtcharakteristik ist allerdings bei kleinen Öffnungswinkeln gering, so dass hier eine annähernde Bestimmung des Öffnungswinkels im Plexiglas erfolgt.

Aus Abbildung 5.12 (a) und (c) geht eine relativ geradlinige Abnahme der Amplitude auf der akustischen Achse hervor. Mit größer werdendem Prüfkopf-abstand z wird die Glockenform flacher. Mit der aus Abbildung 5.13 (b) abgegriffenen halben Bündelbreite $b = 26$ mm bei einem Sendeprüfkopf-abstand $z = 10$ mm (bzw. $b = 56$ mm bei $z = 1000$ mm) berechnet sich der Öffnungswinkel im Plexiglas zu $\gamma_{-6\text{dB(Freifeld),Plexi}} = 14^\circ$. In Abbildung 5.14 sind die Schallbündel für -6 dB für $z = 1000$ mm (blaues Bündel) und $z = 10$ mm (rotes Bündel) dargestellt.

Für den Öffnungswinkel in der Luft ergibt sich ein Öffnungswinkel von $\gamma_{-6\text{dB(Freifeld),Luft}} = 1,8^\circ (\pm 0,1^\circ)$, der damit kleiner ausfällt als der des gemessenen Schallfeldes in Abbildung 4.3 von $\gamma_{-12\text{dB(Echo)}} = \gamma_{-6\text{dB(Freifeld)}} = 4,6^\circ$.

Nach [52] erscheint das Schallfeld um den Faktor $c_A / c_{L,\text{Plexi}} = 1 / 7,5$ im Plexiglas verkürzt. Das führt hier zu einer maximalen Tiefe des Fokuspunktes im Plexiglas von $270 \text{ mm} / 7,5 = 36 \text{ mm}$ für die Longitudinalwelle, die bei einer Sendeprüfkopf-position bei $z = 0$ mm auftreten würde. Da die Plexiglasplatte eine Dicke von $103 \text{ mm} > 36 \text{ mm}$ aufweist, wird demzufolge nur im Fernfeld gemessen.

In Beton (mit $c_{L,\text{Beton}} = 4000 \text{ m/s}$) würde der Fokuspunkt bei senkrechter Einschallung maximal in einer Tiefe von $\sim 23 \text{ mm}$ unter der Oberfläche liegen. Für eine hohe Signalamplitude folgt daraus für die hier verwendeten ACU-Prüfköpfe, dass bei

ACU-Echomessungen an Beton mit einer Dicke $d > 23$ mm die Prüfköpfe möglichst nah an der Betonoberfläche positioniert werden sollten.

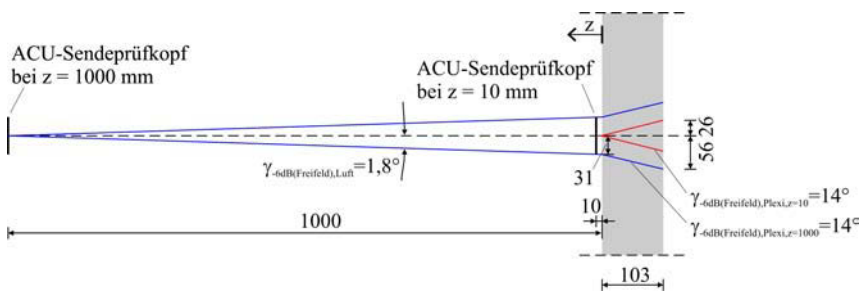


Abbildung 5.14 Bestimmung des Öffnungswinkels γ_{6dB} im Plexiglas; blaue Linie = gemessenes Schallbündel bei Sendeprüfkopfstand $z = 1000$ mm, rote Linie bei $z = 10$ mm

5.5.3 Prüfkopfabstand bei der Tandemanordnung an Beton

Es stellt sich die Frage, ob es sich bei der Tandemanordnung mit Einfallswinkeln ungleich Null hinsichtlich des Prüfkopfabstandes zur Körperoberfläche genauso verhält wie bei den Transmissionsmessungen in Abschnitt 5.5.2. Eine einfache Übertragung der Erkenntnisse aus den Transmissionsmessungen auf die Tandemanordnung erscheint aufgrund der komplexen Zusammenhänge bei der Wellenausbreitung als nicht trivial. Zusätzliche Messungen an Beton, die zeitlich nach den Messungen in Abschnitt 6 erfolgten, sollten Aufschluss geben.

5.5.3.1 Messaufbau

Es wurden Messungen an einer 210 mm dicken Betonplatte mit der bistatischen Prüfkopfanzordnung mit ausschließlich ACU-Prüfköpfen unter einem Einfallswinkel von $\alpha_A = 2^\circ$ durchgeführt. Die Longitudinalwellengeschwindigkeit in der Betonplatte ist $c_L = 4380$ m/s, der 1. kritische Winkel liegt demnach bei $\alpha_{1,kr} = 4,5^\circ$. Gemessen wurde mit einem Abstand der Prüfköpfe zur Betonplatte von 70, 100, 150, 200 und 250 mm.

5.5.3.2 Ergebnisse

Qualitativ sehen die B-Bilder gleich aus. Unterschiede in der Amplitude der Rückwandechos fallen gering aus, wie dies auch bei senkrechtem Schalleinfall der Fall ist (siehe Abbildung 5.12 (c)).

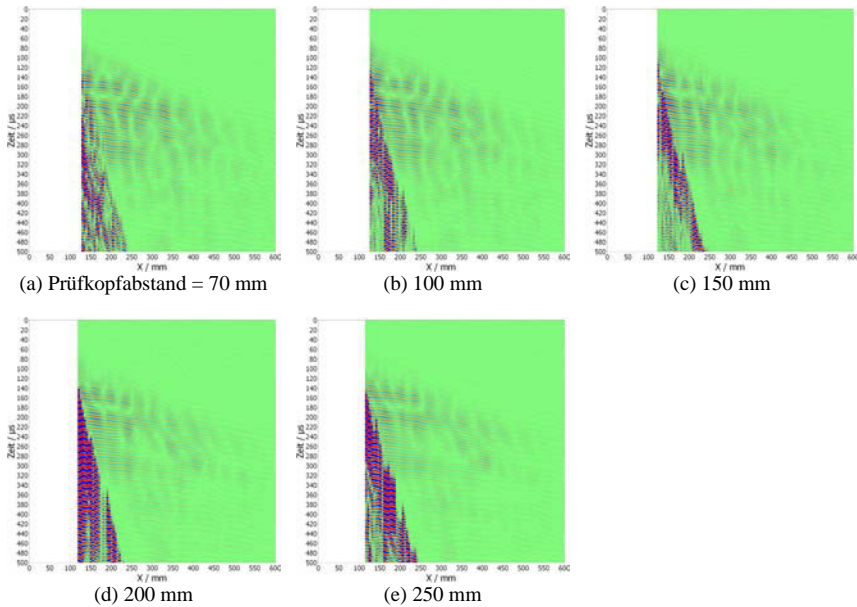


Abbildung 5.15 Messungen mit bistatischer Prüfkopfanzordnung an 210 mm dicker Betonplatte bei einem Einfallswinkel von $\alpha_A = 2^\circ$ und unterschiedlichen Prüfkopfabständen zur Betonoberfläche: Prüfkopfabstand 70 mm (a); 100 mm (b); 150 mm (c); 200 mm (d); 250 mm (e)

Die Intensität der Rayleighwelle nimmt mit zunehmendem Prüfkopfabstand zur Betonoberfläche leicht ab. Der Grund dafür kann in den Nebenkeulen im Nahbereich liegen, aber auch in der Anordnung der Schallabschirmungen, die ungefähr parallel zu den akustischen Achsen der Prüfköpfe positioniert sind. Bei größer werdendem Prüfkopfabstand zur Betonoberfläche werden durch die Schallabschirmung zunehmend Schallanteile der Rayleighwelle in der Luft auf der Send- und Empfangsseite gestört, weshalb deren Amplitude folglich kleiner wird.

Im Hinblick auf die Automatisierung der luftgekoppelten Ultraschall Tandemanordnung ist ein kleiner Prüfkopfabstand zur Körperoberfläche aus folgenden Gründen wünschenswert:

- 1.) Die Stabilität des Scanners erhöht sich, da die Scannerachsen näher an der Körperoberfläche montiert werden können. Dadurch werden wiederum ungewollte Scannerbewegungen während des Messens minimiert, sowie das Scannergewicht reduziert
- 2.) Die Abschirmungen können kleiner gewählt werden, was zu einer Gewichtsreduktion des Aufbaus und damit zu kleineren ungewollten Scannerbewegungen führt.
- 3.) Ungenauigkeiten und Änderungen in der Schallgeschwindigkeit der Luft wirken sich aufgrund der kürzeren Luftstrecke geringer auf die Vorlaufzeit für den Luftweg aus.

5.5.4 Fazit

Der Einfluss des Prüfkopfabstandes zur Körperoberfläche ist für die verwendeten Niederfrequenzprüfköpfe gering.

Für eine möglichst große Rückwandechoamplitude, sollte der Prüfkopfabstand zur Körperoberfläche minimiert werden, solange die Betondicke größer als ~23 mm ist.

Ein kleiner Prüfkopfabstand zur Körperoberfläche ist auch vor allem im Hinblick auf einen kleinen, leichten und damit stabilen Prüfkopfaufbau und zur Reduzierung der Messunsicherheit infolge der temperaturabhängigen Vorlaufzeit durch die Luftstrecke zu wählen.

6 Nachweis von Rückwandechos in Betonbauteilen mit luftgekoppeltem Ultraschall

Im vorangegangenen Kapitel 5 wurde gezeigt, dass mit ACU-Prüfköpfen in der Tandemanordnung Rückwandreflexionen an Plexiglas detektiert werden können. Welche Art von Rückwandecho am stärksten auftritt, hängt dabei stark vom Einfallswinkel ab. So treten Rückwandechoanzeigen der Longitudinalwelle, der Transversalwelle und Rückwandechoanzeigen mehrfach gebrochener Wellen wie LT und/oder TL auf. Weiterhin breiten sich entlang der Plexiglasoberfläche Oberflächenwellen wie die Rayleighwelle R und die Kriechwelle K aus, welche mit den Rückwandechos interferieren und die Auswertung erschweren, aber nicht verhindern.

Aufbauend auf diesen Erkenntnissen ergibt sich die Erwartung, dieses Verfahren auch für Betonbauteile nutzen zu können. Die Randbedingungen, unter denen dies gelingt, werden unter Berücksichtigung der an der Plexiglasplatte gewonnenen Erkenntnisse experimentell ermittelt. Eine Modellierung mit der Elastodynamischen Finiten Integrationstechnik (EFIT) in Abschnitt 6.2 bestätigt die Experimente.

Abschnitt 6.1, 6.3 und 6.4 wurden teilweise in [30] veröffentlicht.

6.1 Bistatische Messung an 210 mm Beton

6.1.1 Messaufbau

Es wird eine Betonplatte (Stufenprobekörper) mit vier unterschiedlichen Dicken von 210, 330, 451 und 571 mm verwendet. Gemessen wird an der 210 mm dicken Stufe mit der bistatischen Prüfkopfanzordnung mit zwei ACU-Prüfköpfen. Der Messaufbau und die Messeinstellungen entsprechen denen in Abschnitt 5.4 (ohne Silikonstreifen). Die Messapparatur und die Einstellungen sind ebenfalls dieselben. Der Probekörper besteht aus einem praxistypischen Beton der Festigkeitsklasse B35 (entspricht heute ungefähr der Festigkeitsklasse C30/37) mit einem Größtkorn von 16 mm. Die gemessene Schallgeschwindigkeit der Longitudinalwelle beträgt $c_L = 4380$ m/s (± 100 m/s) und die Transversalwellengeschwindigkeit schätzungsweise $c_T = \sim 2700$ m/s. Die kritischen Winkel liegen somit bei $\alpha_{1kr} = 4,5^\circ$ und bei $\alpha_{2kr} = 7,4^\circ$. Die optimale Anregung einer modenkonvertierten Transversalwelle wird zwischen den beiden kritischen Winkeln erwartet. Es wird unter einem Einfallswinkel in der Luft von 2° , 4° und $5,5^\circ$ gemessen.

6.1.2 Messergebnisse

Die entsprechenden Messergebnisse sind für jeden Einfallswinkel zeilenweise in Abbildung 6.1 dargestellt. Die Darstellung der Daten und die Vorgehensweise der Auswertung ist analog zu derjenigen in Abschnitt 5.3. Auch hier können die Anzeigen in den B-Bildern (Abbildung 6.1 links) durch digitale Unterdrückung der Rayleighwelle (Abbildung 6.1 mitte) und durch die Berechnung der zugehörigen Geschwindigkeitsspektren (Abbildung 6.1 rechts) den Wellenarten zugeordnet werden.

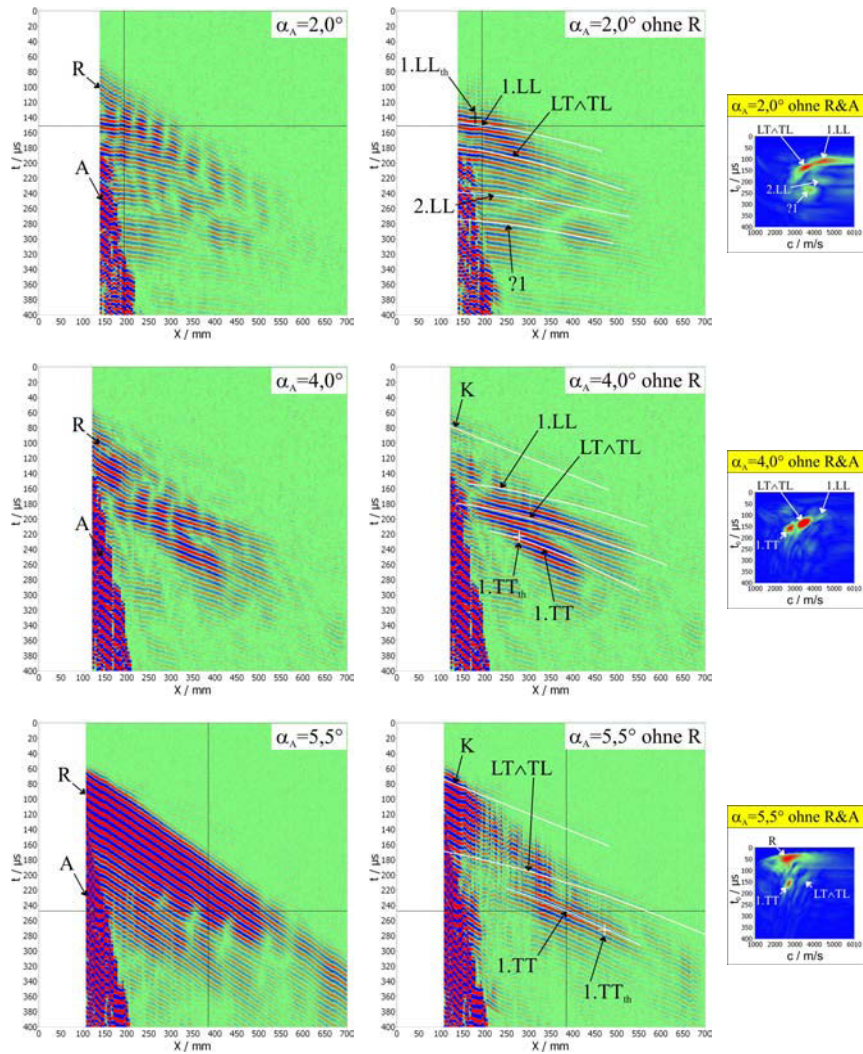


Abbildung 6.1 Messergebnisse bei bistatischer Prüfkopfanzordnung mit ACU-Prüfköpfen an 210 mm dicker Betonplatte bei Einfallswinkeln α_A von 2° (für Longitudinalwellen-Rückwandecko 1.LL), 4° sowie $5,5^\circ$ (für Transversalwellen-Rückwandecko 1.TT); links: B-Bild; mitte: B-Bild nach digitaler Unterdrückung der Rayleighwelle R; rechts: Geschwindigkeitsspektrum des B-Bildes in der Mitte nach Wegschneiden der Luftwellenanzeige A; Cursor in den B-Bildern markieren das gemessene Rückwandecko 1.LL bzw. 1.TT

Abbildung 6.2 zeigt ausgewählte A-Bilder aus Abbildung 6.1 an den Stellen der senkrechten schwarzen Linien. An diesen Stellen ist das Longitudinalwellen-Rückwandecko 1.LL bei $\alpha_A = 2^\circ$ bzw. das Transversalwellen-Rückwandecko 1.TT bei $\alpha_A = 5,5^\circ$ am deutlichsten ausgeprägt.

Da die empfangsseitige Abschirmung bei der Messaufnahme separat per Hand und außerdem nicht gleichmäßig mit dem Empfangsprüfkopf mitbewegt wurde, ist eine digitale Unterdrückung der um die Abschirmungen herumlaufenden Luftwelle A hier nicht möglich. Allerdings ist deren Einfluss auf die Rayleighwelle minimal, so dass die Rayleighwelle digital unterdrückt werden kann.

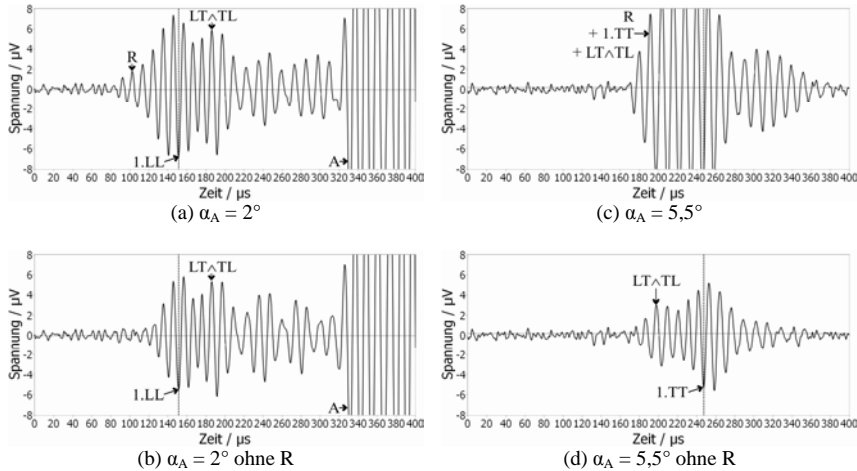


Abbildung 6.2 A-Bilder aus den B-Bildern in Abbildung 6.1 entlang der schwarzen senkrechten Linien; Der Zeitercursor markiert das gemessene Rückwandecho 1.LL bei einem Einfallswinkel in Luft von 2° (a) und 2° bei digital unterdrückter Rayleighwelle R (b) und entsprechend das Rückwandecho 1.TT bei $5,5^\circ$ (c) und $5,5^\circ$ bei digital unterdrückter Rayleighwelle R (d); Angabe der Spannung ohne Empfangsverstärkung von 46 dB

Die B-Bilder ähneln denjenigen der Voruntersuchungen an Plexiglas. Es sind wieder verschiedene Rückwandechos detektierbar.

Bei einem Einfallswinkel in Luft von 2° bildet sich ein Longitudinalwellen-Rückwandecho 1.LL aus. Eine ebenso starke Anzeige tritt zeitlich direkt danach auf, die einer an der Rückwand konvertierten Welle LT^TL zuzuordnen ist. Allerdings bleibt auch hier wie schon bei den Messungen an Plexiglas unklar, ob es sich um die Wellenkombination LT , TL oder beide Kombinationen zusammen handelt.

Bei der Messung unter einem Einfallswinkel in Luft von $\alpha_A = 4^\circ$, also knapp unterhalb des 1. kritischen Winkels von $\alpha_{1kr} = 4,5^\circ$ tritt im B-Bild das Transversalwellen-Rückwandecho 1.TT und das Rückwandecho mit Modenkombination LT^TL mit gleich großer Amplitude auf. Das Longitudinalwellen-Rückwandecho 1.LL ist noch schwach zu erkennen. Weiterhin ist die unter diesem Einfallswinkel (um den 1. kritischen Winkel) auftretende Kriechwelle K als lineare Anzeige im B-Bild zu beobachten.

Bei dem Einfallswinkel von $5,5^\circ$, der zwischen den beiden kritischen Winkeln liegt, tritt das erwartete Transversalwellen-Rückwandecho 1.TT auf. Dieses wird allerdings von der Rayleighwelle R stark überlagert und ist nur durch die auftretenden

Interferenzmuster im Rohdatensatz erahnbar. Zusätzlich zu 1.TT tritt auch hier wieder $LT \wedge TL$ auf.

Die sich durch das Brechungsgesetz (Gl. 2.16) ergebenden Rückwandechoanzeigen $1.LL_{th}$ und $1.TT_{th}$ (Maximum der Einhüllenden) sind in Abbildung 6.1 durch schwarze bzw. weiße Kreuze gekennzeichnet. Sie stimmen näherungsweise mit den gemessenen Anzeigen überein. Der Grund für die Abweichung liegt wiederum in der vereinfachten Annahme des Schalllaufweges nach Abbildung 2.7. Darauf wurde bereits in Abschnitt 5.3.2.5 eingegangen.

6.1.3 Diskussion der Ergebnisse

Die Rückwandechos 1.LL, 2.LL, 1.TT und $LT \wedge TL$ können detektiert werden. Die Rayleighwelle R überlagert sich mit allen auftretenden Rückwandechos und tritt auch bei kleinen Einfallswinkeln auf.

Transversalwellen-Rückwandecho 1.TT

Im Hinblick auf den Aufbau der Tandemanordnung erweist sich die Rückwandechoortung über das Transversalwellen-Rückwandecho 1.TT als ungünstig. Die überlagerte Rayleighwelle müsste dazu nachträglich aus jedem Signal herausgefiltert werden, worin dann die eigentliche Schwierigkeit bestehen würde.

Longitudinalwellen-Rückwandecho 1.LL

Als wesentlich günstiger erscheint die Verwendung des Longitudinalwellen-Rückwandechos 1.LL. Bei dieser Konfiguration tritt zwar immer noch die Rayleighwelle auf, allerdings mit einer wesentlich geringeren Amplitude.

Rückwandecho mit Modenkonzersion $LT \wedge TL$

Unter dem Einfallswinkel von 2° wird zeitlich nach dem Longitudinalwellen-Rückwandecho 1.LL auch das Rückwandecho mit Modenkonzersion $LT \wedge TL$ empfangen. Diese Wellenkombination wird von der Rayleighwelle R am geringsten gestört. Sie hat allerdings den Nachteil, dass neben ihr auch immer mindestens eines der beiden reinen Rückwandechos 1.LL oder 1.TT auftritt. Wünschenswert wäre es, nur eine Rückwandechoart zu empfangen.

Einfallswinkel kleiner 2° und Luftwelle A

Bei kleineren Einfallswinkeln als 2° hin zu 0° ist zu erwarten, dass die Anregung und der Empfang aller Wellen bis auf das gewollte Longitudinalwellen-Rückwandecho und die an den Abschirmungen gebeugte Luftwelle A weiter abnehmen. Störend wirkt dann zum großen Teil die gebeugte Luftwelle, da der Prüfkopfabstand für 1.LL minimal gewählt werden muss, der Laufweg der gebeugten Luftwelle A aber nicht mehr ausreicht, um eine zeitliche Trennung zum Longitudinalwellen-Rückwandecho 1.LL herbeizuführen. Das Problem kann in Kapitel 8 gelöst werden. Hier stellen wir uns zunächst mit der Tatsache zufrieden, dass Rückwandreflexionen mit ausreichend

großer Intensität vorhanden sind und nicht im elektrischen Rauschen oder im Kornrauschen untergehen.

6.1.4 Fazit

An einer 210 mm dicken Betonplatte mit 16 mm Größtkorn sind mit der Tandem-anordnung abhängig von den Einfallswinkeln unterschiedliche Rückwandechos messbar. Sie weisen ein für die Praxis ausreichend großes Signal-zu-elektrisches Rausch-Verhältnis von ~6 bei 20 Mittelungen auf. Durch die Verwendung eines zusätzlichen Hauptverstärkers zum Vorverstärker kann es noch wesentlich vergrößert werden.

Der direkte Luftschall von Sender zu Empfänger und die Oberflächenreflexion können erfolgreich durch eine Abschirmkonstruktion zeitlich von den Nutzsignalen getrennt werden.

Störend wirkt sich das Auftreten der Rayleighwelle aus, da sie zu starken Interferenzerscheinungen mit den Rückwandreflexionen führt. Aufgrund der stärker werdenden Rayleighwelle bei größer werdendem Einfallswinkel eignet sich das Transversalwellen-Rückwandecho nicht zur Rückwanddetektion. Die Rückwanddetektion über das Longitudinalwellen-Rückwandecho erscheint als die beste Möglichkeit.

6.2 Modellierung der Wellenausbreitung von luftgekoppeltem Ultraschall in einer Betonplatte

Die Modellierung wird im Rahmen der Kooperation der DFG Forschergruppe FOR 384 („Zerstörungsfreie Strukturbestimmung von Betonbauteilen mit akustischen und elektromagnetischen Echo-Verfahren“) von Herrn Dr.-Ing. Frank Schubert am Fraunhofer IZFP-Dresden durchgeführt. Dafür wird die Elastodynamische Finite Integrationstechnik (EFIT) eingesetzt.

EFIT ist ein Verfahren zur numerischen Lösung der elastodynamischen Grundgleichungen, das ursprünglich von Fellingner [23] und Marklein [58] entwickelt und von Schubert [80] aufgegriffen und modifiziert wurde. Mit diesem Verfahren ist es möglich, das elastische Wellenfeld anhand von Wellenfrontbildern in Bauteilen zu visualisieren ([55],[45]).

Die im vorhergehenden Abschnitt 6.1 gezeigte experimentelle Messanordnung mit einem Einfallswinkel von 2° an der 210 mm dicken Betonplatte soll modelliert werden. Sie soll Aufschluss über die Wellenausbreitung im Inneren der Platte geben und die experimentell gewonnenen Erkenntnisse durch einen Vergleich mit diesen komplettieren.

6.2.1 Modellbeschreibung

Die Modellierung wird für einen einzigen Abstand vom Sende- zum Empfangsprüfkopf von 222 mm berechnet. Dies ist der Abstand, der sich allein nach dem Brechungsgesetz für das Longitudinalwellen-Rückwandecho $1.LL_{th}$ ergibt. Der Abstand vom Schalleintritts- zum Schallaustrittspunkt auf der oberen Grenzfläche Luft/Beton beträgt dann 208 mm.

Da die Schallwellen aufgrund des schrägen Einfalls mehrere Modenkonvertierungen hervorrufen und die Amplituden bei Durchlaufen der Grenzflächen stark geschwächt werden, wird der Beton hier als homogenes Medium angenommen, um die Wellen bestmöglich identifizieren zu können.

Für das Modell wird ein RC3-Puls („raised cosine“ mit drei Perioden Länge) mit einer Mittenfrequenz von 80 kHz angenommen. Der RC3-Puls stellt eine Vereinfachung des vom Prüfkopf tatsächlich abgestrahlten Pulses dar, der mehr Schwingungen aufweist. Der zeitlich kürzere Puls dürfte zu einer einfacheren Identifikation der Wellenarten beitragen.

Die Modellierung stellt sich als enorm rechenintensiv heraus. Dies liegt an der kleinen Wellenlänge des Schalls in der Luft, die eine sehr feine räumliche und zeitliche Diskretisierung erforderlich macht. Obwohl lediglich ein zweidimensionales Modell verwendet wird, beträgt die Rechenzeit auf einem sehr schnellen AMD-Opteron ca. 7-8 Stunden.

Die Ränder des Simulationsbereiches sind reflektierend. Um der Realität zu entsprechen, müssten für den linken, rechten und oberen Rand eigentlich sogenannte offene Randbedingungen gewählt werden, d.h. Ränder, aus denen die Wellen ohne Reflexion herauslaufen können. Diese Randbedingungen wären allerdings sehr rechenzeitintensiv und können hier deshalb aufgrund der ohnehin schon extremen Rechenzeit nicht verwendet werden. Die Folge ist, dass die Wellenanteile, die in den Beton eindringen, seitlich nicht mehr entweichen können. Dies hat für die Zeitdauer, in der die aus der Luft eintretende Welle zur Rückwand und wieder nach oben zur Grenzfläche läuft, praktisch keinen Einfluss. Zu späteren Zeiten führt dies aber zu einem mehr oder weniger konstanten akustischen Untergrund im Beton, der praktisch nicht geringer wird, was der Fall wäre, wenn die Wellen seitlich herauslaufen könnten.

Um ein B-Bild, wie in dem Experiment (Abbildung 6.1 für 2°) zu erhalten, müsste der Empfangsprüfkopf zusammen mit der rechten Abschirmung verschoben werden und die Rechnung für jede Position erneut durchgeführt werden, was rechentechnisch zu zeitaufwendig wäre. Ein direkter Vergleich von Experiment und Modellierung ist somit nicht möglich, allerdings kann hier im Unterschied zum Experiment die Wellenausbreitung auf dem Weg zum Prüfkopf direkt sichtbar gemacht werden.

6.2.2 Ergebnisse der Modellierung

Die Berechnung mit EFIT liefert die Wellenfrontbilder, die für ausgewählte Zeitpunkte in Abbildung 6.3 (a) bis (e) dargestellt sind. Für eine zeitlich höher aufgelöste Betrachtung der Wellenfronten sind in Anhang A.2 die Wellenfrontbilder zu weiteren Zeitpunkten abgebildet. Durch Integration über die Wandlerfläche erhält man das Empfangssignal (A-Bild), das in Abbildung 6.3 (f) zu sehen ist.

In den Wellenfrontbildern ist der Betrag des Teilchengeschwindigkeitsvektors v dargestellt. Die Grauwertskala (Abbildung 4.13 (a)) verläuft von weiß (= 0) nach schwarz. Aufgrund der sehr unterschiedlich großen Amplituden in Luft und Beton ist das Wellenfeld im Beton um den Faktor 3000 und in der Luft rechts von der rechten Abschirmung um den Faktor 1500 überhöht dargestellt. Die Bezeichnung der Wellenfronten erfolgt nach Abbildung 2.3.

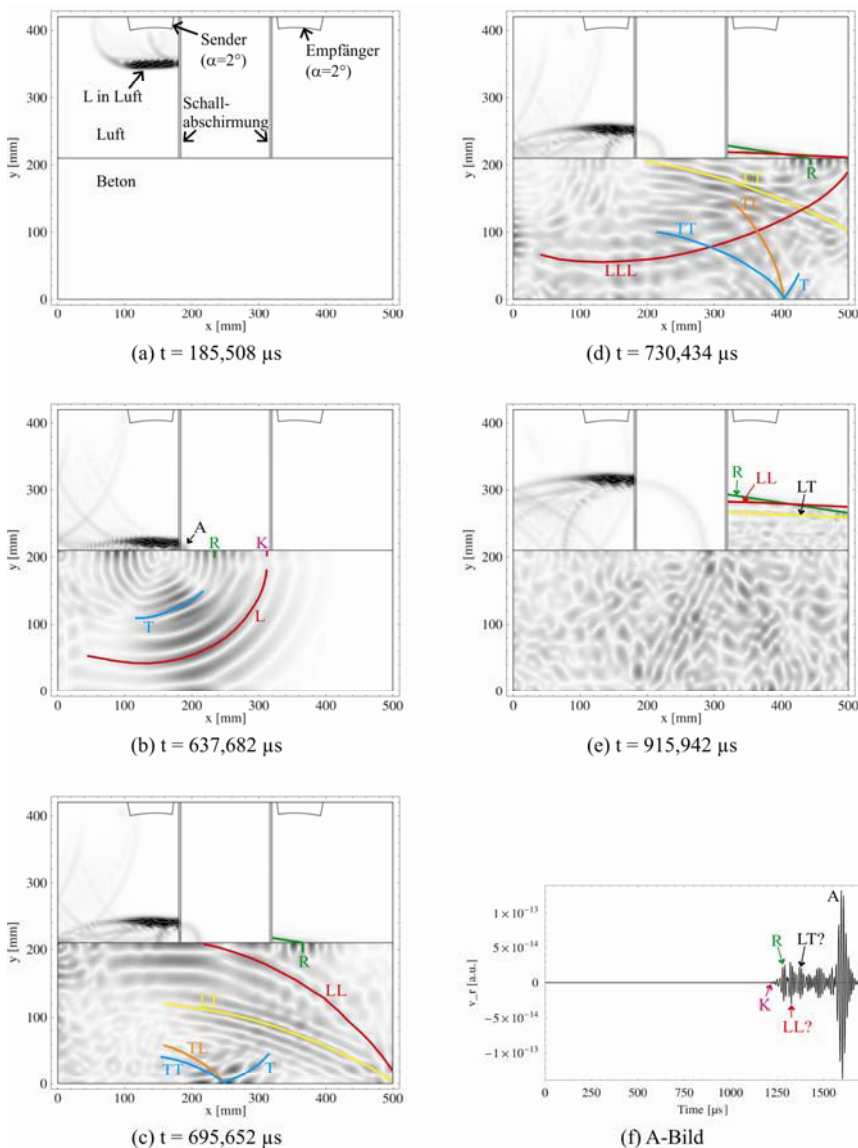


Abbildung 6.3

Wellenfrontbilder der Modellierung mit Abschirmung zu ausgewählten Zeitpunkten (a) bis (e), Wellenfeld im Beton um den Faktor 3000 und in Luft rechts von der rechten Abschirmung um den Faktor 1500 überhöht dargestellt; abgebildet ist der Betrag des Teilchengeschwindigkeitsvektors; A-Bild der Modellierung mit Abschirmung (f); Die Modellierung wurde von Dr.-Ing. Frank Schubert vom Fraunhofer IZFP-Dresden durchgeführt.

Eine zusätzliche Modellierung, die ohne Abschirmung gerechnet wurde (siehe Abbildung 6.4), zeigt im Vergleich zu der Modellierung mit Abschirmung die

Wirksamkeit der Abschirmkonstruktion. Das Wellenfrontbild ist zu einem Zeitpunkt kurz nach Eindringen der Schallwelle von der Luft in den Beton aufgenommen worden. Der Darstellungsfaktor ist dort absichtlich für Beton und Luft von gleicher Größe gewählt, um das Problem des direkten Übersprechens der Luftschallwelle vom Sender zum Empfänger zu verdeutlichen.

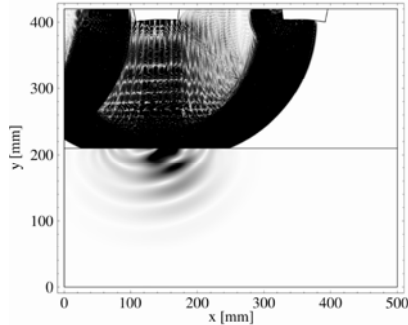


Abbildung 6.4 Wellenfrontbild der Modellierung gerechnet ohne Abschirmung; Wellenfeld im Beton um den Faktor 3000 überhöht dargestellt

Bei vorhandener Abschirmung erreicht die Luftschallwelle in der Modellierung wie auch in den Messungen den Empfänger erst zu späteren Zeiten als die Rückwandechos.

Alle wesentlichen Wellenarten können in den Wellenfrontbildern zugeordnet werden. An jeder Grenzfläche Luft/Beton und Beton/Luft ist Modenkonzersion der jeweiligen einfallenden Welle zu erkennen, wie dies in Abschnitt 2.4 erläutert wurde.

Stark ausgeprägt sind das Longitudinalwellen-Rückwandecho LL und das Rückwandecho mit Modenkonzersion LT. Aber auch andere Rückwandechos sind erkennbar, wie z.B. das Transversalwellen-Rückwandecho TT oder das Rückwandecho mit Modenkonzersion an der oberen und an der unteren Grenzfläche TL. Das Auftreten von Vielfachechos der Longitudinalwelle (siehe LLL) ist ebenfalls zu beobachten.

An der Oberfläche breitet sich die Kriechwelle K und die Rayleighwelle R aus, die nach dem Brechungsgesetz unter dem 1. bzw. dem 2. kritischen Winkel kontinuierlich Longitudinalwellen in die Luft abstrahlen. Die an der Rückwand reflektierten Wellen werden ebenfalls auf dem Rückweg zum Empfänger an der Grenzfläche Beton/Luft gebrochen und strahlen Longitudinalwellen in die Luft ab. Dabei kommt es zu Interferenzen zwischen der abgestrahlten Rayleighwelle R und des abgestrahlten Longitudinalwellen-Rückwandechos LL. Das in die Luft abgestrahlte Rückwandecho LT bleibt hier nahezu ungestört, was auch in der bistatischen Messung bei $x = 208$ mm (Abbildung 6.1) zu beobachten ist.

Das in die Luft abgestrahlte Rückwandecho TL kann nicht identifiziert werden, dazu fehlen die nötigen Wellenfrontbilder zum Zeitpunkt der Abstrahlung. Das Rückwandecho TL im Beton ist allerdings nicht so deutlich ausgebildet wie das Rückwandecho LT und scheint eher bei größerem Prüfkopfabstand empfangbar zu sein.

Die Zuordnung der A-Bild-Anzeigen zu den auftretenden Wellenarten in den Wellenfrontbildern ist in Abbildung 6.3 (f) eingezeichnet.

6.2.3 Fazit

Die EFIT-Modellierung ist trotz des enormen Zeitaufwandes ein wertvolles Hilfsmittel zum Verständnis der Wellenausbreitung. Die in der Messung in Abbildung 6.1 (2°) identifizierten Wellenarten können mit der Modellierung bestätigt werden. Unter einem Einfallswinkel von 2° treten nacheinander deutlich das Longitudinalwellen-Rückwandecho 1.LL und das Rückwandecho mit Modenkonzersion an der Rückwand LT auf. Das Longitudinalwellen-Rückwandecho 1.LL wird schon ab dem hier gewählten Abstand vom Sende- zum Empfangsprüfkopf von der Rayleighwelle R teilweise überlagert. Diese Interferenz nimmt mit größer werdendem Prüfkopfabstand bis zu dem in der Luft entstehenden Kreuzungspunkt des abgestrahlten Longitudinalwellen-Rückwandechos 1.LL mit der abgestrahlten Rayleighwelle R zu.

6.3 Eliminierung der Kriech- und Rayleighwelle

Die im vorhergehenden Abschnitt 6.3 durch digitale Unterdrückung der Rayleighwelle nachweisbaren Rückwandechos lassen sich auch durch Wahl eines geschickt gewählten Probekörpers zeigen. Dies gelingt mit Hilfe einer Betonplatte, die auf der Vorderseite eine Nut enthält. Die Prüfköpfe der bistatischen Anordnung werden links und rechts von der Nut positioniert, wodurch Oberflächenwellen wie die Rayleigh- und die Kriechwelle an der Ausbreitung gehindert werden. Die nötige Tiefe der Nut richtet sich nach der Wellenlänge der Rayleighwelle. Sie nimmt exponentiell mit der Tiefe ab und ist nach einer Wellenlänge zum größten Teil abgeklungen [52] (siehe auch Abschnitt 2.2).

6.3.1 Bistatische Messung an 200 mm dicker Betonplatte mit Nut auf Vorderseite

Im Folgenden wird nach dem soeben geschilderten Prinzip eine Messung an einer 200 mm dicken Betonplatte mit einer schrägen 132 mm tiefen und 4 mm breiten Nut gezeigt. Die Nut weist eine Tiefe von knapp $3\frac{1}{2}$ Wellenlängen auf und hindert folglich Oberflächenwellen am Weiterlaufen. Die Messlinie liegt senkrecht zur Nut. Sie beginnt 30 mm links der Nut und reicht 41 mm über die Betonoberfläche hinaus. Der Probekörper besteht aus Beton der Festigkeitsklasse B35 (~C30/37) mit einem Größtkorn von 16 mm und einer Longitudinalwellengeschwindigkeit von $c_L = 3900$ m/s. In Abbildung 6.5 (a) ist der Messaufbau dargestellt. Das eingezeichnete Longitudinalwellen-Rückwandecho ergibt sich nach dem Brechungsgesetz Gl. 2.16. Das resultierende A-Bild für diesen Weg ist in Abbildung 6.5 (b) zu sehen, das im B-Bild in Abbildung 6.5 (c) mit einem Cursor markiert ist. Die Identifikation der Echoanzeigen im B-Bild kann auch hier wieder mit dem Geschwindigkeitsspektrum (Abbildung 6.5 (d)) vorgenommen werden.

Im B-Bild ist eindeutig das abrupte Ende der Rayleighwelle infolge der Nut bei $x = 186$ mm zu sehen, also kurz nachdem die empfangsseitige Abschirmung die Nut passiert hat. Nach dieser Stelle können zeitlich vor dem direkten Luftschall nur noch

Wellen aus dem Bauteilinneren auftreten, hier sind dies Rückwandreflexionen und/oder Beugungen an der Nutspitze. Die Auswertung des Geschwindigkeitsspektrums lässt keine starke direkte Beugung an der Nutspitze erkennen. Am stärksten tritt das Rückwandecho mit Modenkonversion $LT \wedge TL$ sowie das Transversalwellen-Rückwandecho $1.TT$ auf. Das Longitudinalwellen-Rückwandecho $1.LL$ ist mit einer geringeren Amplitude identifizierbar. Auch wenn keine ausgeprägten direkten Beugungen an der Nutspitze zu erkennen sind, so ist doch der Einfluss der Beugung der an der Rückwand reflektierten Longitudinalwelle an der Nutspitze zu beobachten, was die Qualität der Stapelung für die Anzeige von $1.LL$ im Geschwindigkeitsspektrum verschlechtert.

Das B-Bild sowie das Geschwindigkeitsspektrum ähneln stark dem Ergebnis aus dem vorhergehenden Abschnitt 6.1 bei einem Einfallswinkel von 4° an der 210 mm dicken Betonplatte ohne Nut nach Unterdrückung der Rayleighwelle. Dies ist wiederum ein Indiz für das Auftreten der Rückwandreflexionen.

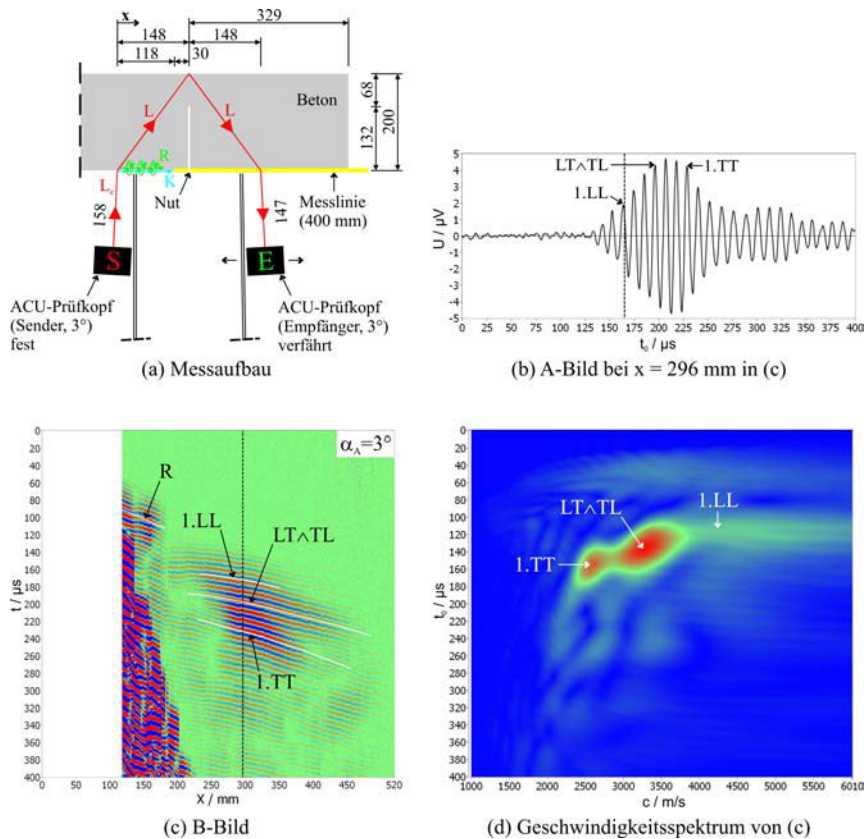


Abbildung 6.5

Bistatische Messung an 200 mm dicker Betonplatte mit 132 mm tiefer Nut auf Vorderseite: Messaufbau (a), A-Bild bei $x = 296$ mm (b), B-Bild (c), Geschwindigkeitsspektrum (d)

6.3.2 Fazit

Mehrere Rückwandreflexionen treten bei der Tandemanordnung unter einem Einfallswinkel von 3° auf. Der Beweis wird mittels einer bistatischen Messung an einer 200 mm dicken Betonplatte mit einer vorderseitigen Nut erbracht. Die Nut führt zu einer Trennung zwischen den Rückwandechos und den Oberflächenwellen.

6.4 Messung in Tandemanordnung an einer Betonplatte mit Nuten auf der Rückseite

Ausgehend von der vorhergehenden bistatischen Messung aus Abschnitt 6.3 wird nun eine Messung in Tandemanordnung durchgeführt. Als Abstand vom Sende- zum Empfangsprüfkopf wird derjenige aus der bistatischen Messung gewählt, der die größte Rückwandechoamplitude (Rückwandfokussierung) aufweist. Die Messung wird an demselben Probekörper durchgeführt. Es wird eine Messlinie auf der nutabgewandten Seite abgefahren.

Es soll gezeigt werden, dass die Nuten auf der Rückseite der Betonplatte Rückwandechoanzeigen unterbinden, sofern sie innerhalb des Schalllaufweges liegen. Dadurch wird zum einen abermals bestätigt, dass es sich bei den Rückwandechoanzeigen in Abschnitt 6.3 auch um solche handelt. Zum anderen wird damit erstmals eine praxisorientierte Messung mit der Tandemanordnung vorgestellt.

6.4.1 Messaufbau

Der Messaufbau ist in Abbildung 6.6 dargestellt. Es wird eine 704 mm lange Messlinie mit einem Messpunktabstand von 2 mm über die Längsseite des Probekörpers manuell abgefahren. Als Messpunkt wird die Mitte der Tandemanordnung definiert. Aufgrund deren Größe können nicht die Randbereiche des Probekörpers untersucht werden. Alle weiteren Einstellungen bleiben wie bei der vorhergehenden Messung.

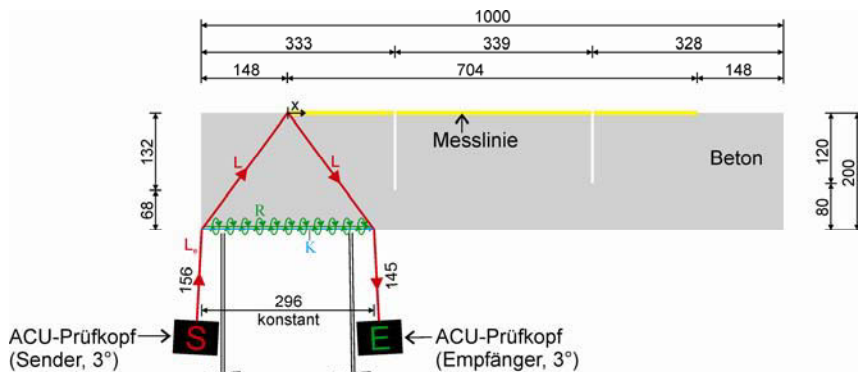


Abbildung 6.6 Messaufbau: Messung mit der Tandemanordnung an einer 200 mm dicken Betonplatte mit zwei Nuten auf der Rückseite

6.4.2 Messergebnisse

Das Messergebnis ist in Abbildung 6.7 (a) als B-Bild dargestellt. Zum Vergleich ist das A-Bild bei $x = 500$ mm (keine Nut) in Abbildung 6.7 (b) und das A-Bild bei $x = 333$ mm (Stelle über 132 mm tiefer Nut) in Abbildung 6.7 (c) dargestellt. Da wie in Abschnitt 6.3 gezeigt, unter dem Einfallswinkel von 3° mehrere Rückwandeckoarten (1.LL, $LT \wedge TL$ und 1.TT) auftreten, sind deren auf theoretischem Wege über das Brechungsgesetz ermittelten Laufzeiten ($1.LL_{th}$, $(LT \wedge TL)_{th}$ und $1.TT_{th}$) ebenfalls im B-Bild und in den A-Bildern eingezeichnet. Verglichen mit den gemessenen Laufzeiten der vorhergehenden bistatischen Messung in Abbildung 6.5 zeigen sie nur geringfügige Abweichungen.

Bei $x = 333$ mm und $x = 672$ mm liegen die Nuten. In einem großen Bereich um diese Nuten treten erwartungsgemäß die Rückwandeckoanzeigen im B-Bild nicht auf. Hingegen sind zwischen den Nuten sowie zwischen den Nuten und den Rändern ausgeprägte Rückwandeckoanzeigen zu beobachten, die allerdings aufgrund ihrer teilweisen zeitlichen Überlappung fälschlicherweise als eine Pulsanzeige wahrgenommen werden. Durch die bistatische Messung Abbildung 6.5 ist jedoch klar, dass es sich hierbei um die Summe der Rückwandeckos 1.LL, $LT \wedge TL$ und 1.TT handeln muss.

In den Bereichen der Nuten können nur Oberflächenwellen (hauptsächlich Rayleighwellen) sowie gebeugte Rückwandreflexionen und direkte Reflexionen an den Nutspitzen auftreten. Im B-Bild treten diese Wellen mit einer verhältnismäßig geringen Amplitude auf. Dabei ist unklar, ob die Rayleighwelle bei dieser Anordnung im Allgemeinen nur eine kleine Amplitude aufweist oder die Rayleighwellenamplitude durch die raue Oberfläche der Betonplatte verringert wird oder aber sich die auftretenden Wellen aufgrund der geometrischen Verhältnisse destruktiv überlagern. Dazu wären weitergehende Untersuchungen notwendig.

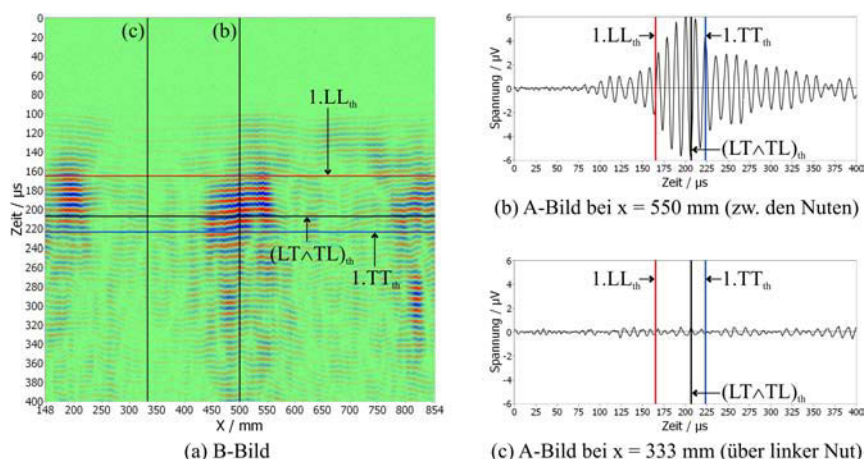


Abbildung 6.7 Messergebnis zu Messaufbau in Abbildung 6.6: B-Bild (a), A-Bild bei Position zwischen den Nuten ($x = 500$ mm) (b), A-Bild bei Position über der linken Nut ($x = 333$ mm) (c)

Hinsichtlich einer genauen Dickenmessung erweist sich der Einfallswinkel von 3° als ungünstig, da die Summe aus dem zusammengesetzten Puls theoretisch schon bei kleinen Geometrieänderungen (z.B. Dickenänderung der Platte) seine Form stark ändern und sich dann das Maximum ebenfalls stark verschieben kann. Bei der Messung in Abbildung 6.7 stimmt zufälligerweise das Maximum der Einhüllenden des zusammengesetzten Rückwande chopulses mit dem theoretischen Maximum der Einhüllenden $(LT \wedge TL)_{th}$ überein.

6.4.3 Fazit

An einer 200 mm dicken Betonplatte mit rückseitigen Nuten wird mit der Tandemanordnung mit einem Einfallswinkel von 3° die Summe unterschiedlicher Rückwandechos gemessen.

In dem Bereich der Nuten bleibt dieses Echo aus.

Aufgrund des Auftretens mehrerer Rückwandechos zu ähnlichen Zeitpunkten ist der Einfallswinkel von 3° nicht geeignet, um genaue Dickenmessungen durchzuführen.

7 Visualisierung der Wellenausbreitung in Beton

Die bisherigen Messungen in den vorangehenden Abschnitten haben die Machbarkeit von luftgekoppeltem Ultraschallecho mit zwei Prüfköpfen an Beton gezeigt. Dieser Abschnitt soll nun die Wellenausbreitung von luftgekoppeltem Ultraschall an Beton näher veranschaulichen.

Dies soll durch drei experimentelle Visualisierungen mit Hilfe eines scannenden Laservibrometers als Empfänger erreicht werden. Gezeigt wird die Wellenausbreitung:

- von luftgekoppeltem Ultraschall in Beton bei senkrechtem Einfall,
- eines konventionellen Prüfkopfes mit Plexiglaskeil an einer 200 mm dicken Betonplatte mit oberseitiger 135 mm tiefer Nut
- von luftgekoppeltem Ultraschall unter einem Einfallswinkel von 3° an einer 200 mm dicken Betonplatte mit oberseitiger 135 mm tiefer Nut

7.1 Experimentelle Visualisierungen der Wellenausbreitung mit einem Laservibrometer

Das Prinzip des Verfahrens, das Schallfeld eines Ultraschallprüfkopfes in einer streifenden Schnittebene des Feldes abzubilden, geht auf Köhler und Schurig [48], [47] zurück und wurde von Ernst [22] weiterentwickelt. Das etwas modifizierte Verfahren zur qualitativen Visualisierung der Wellenausbreitung von Niederfrequenzprüfköpfen, so wie es hier angewendet wird, entspricht demjenigen von Mielentz [59] und ist dort ausgiebig beschrieben.

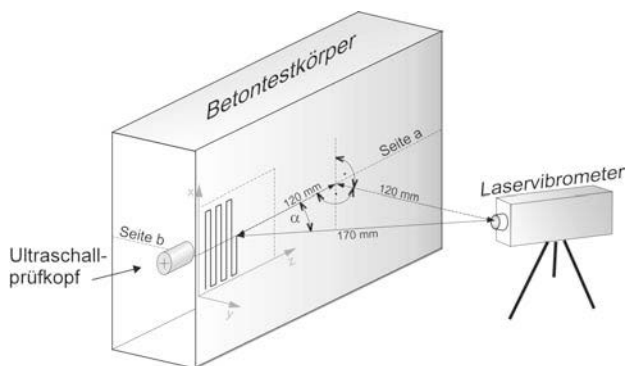


Abbildung 7.1 Messaufbau zur Visualisierung der Wellenausbreitung mit einem Laservibrometer (entnommen aus [59])

Der prinzipielle Messaufbau zur Visualisierung der Wellenausbreitung mit einem Laservibrometer ist in Abbildung 7.1 dargestellt. Der Ultraschallprüfkopf wird möglichst nah an eine Körperkante positioniert, damit das einfallende Schallfeld eine Körperoberflächenseite streift. Ein Laservibrometer tastet diese Seite der Körperober-

fläche in einem spitzen Winkel zum einfallenden Schall ab. Für jeden Messpunkt wird der Sendeprüfkopf erneut angeregt. Die einzelnen A-Bilder werden in einer Orts-Zeit-Matrix gespeichert. Eine Zeitscheibe der Matrix gibt eine Momentaufnahme des Schallfeldes auf der Messoberfläche wieder. Werden die Zeitscheiben wie bei einem Film durchfahren kann, die Wellenausbreitung direkt verfolgt werden.

Die Ausrichtung des Laservibrometers richtet sich nach der zu visualisierenden Schwingungsrichtung der ausbreitenden Wellen, da das Laservibrometer nur die in Laserstrahlrichtung gerichtete Schnellekomponente misst. Um z.B. die innerhalb der Messebene schwingenden Teilchen der Longitudinalwelle zu detektieren, wird das Laservibrometer in einem Winkel von $\sim 45^\circ$ zur Ausbreitungsrichtung der Longitudinalwelle und zur Messoberfläche ausgerichtet. Dadurch wird aufgrund des schrägen Winkels 71 % ($= \cos(45^\circ)$) der Longitudinalwellenschnelle empfangen. Hinzu kommt noch der winkelabhängige Amplitudenverlust aufgrund der geringeren Rückstreuung des Laserstrahls von der auf die Messfläche aufgeklebten retroreflektierenden Folie. Weitere auftretende Wellen werden ebenfalls anteilig empfangen, sofern sie eine Schwingungskomponente in Laserstrahlrichtung aufweisen.

Um alle Wellenarten und Schwingungsrichtungen vollständig zu erfassen, werden Messungen aus drei unterschiedlichen Richtungen benötigt. Die Schnelleanteile können dann nachträglich für alle drei Raumrichtungen für jeden Messpunkt berechnet werden. Mittlerweile gibt es kommerziell erhältliche Systeme, die mit drei von einander unabhängigen Laservibrometern eine Messfläche abtasten und daraus ein dreidimensionales Schwingungsbild (Schnellebild) der Messfläche berechnen [65]. Solch ein Laservibrometersystem ist, verglichen mit Ultraschallprüfköpfen um ein Vielfaches teurer und stand für diese Untersuchungen nicht zur Verfügung. Die hier gemachten Messungen wurden mit einem einzelnen Laservibrometer durchgeführt und zeigen qualitativ die Wellenausbreitung.

Zur Anwendung kommt die Messapparatur „LVIB“, die in Abschnitt 4.2.1 erläutert ist. Die Funktionsweise des Laservibrometers ist dort ebenfalls beschrieben. Die Prüfköpfe wurden mit dem Schwingungspuls aus Abbildung 5.1 (e) mit einer Mittenfrequenz von 85 kHz angeregt.

Die hier dargestellten Visualisierungen sollen:

- 1.) die Auswirkungen der starken Brechung von luftgekoppeltem Ultraschall an der Grenzfläche Luft/Beton auf die Wellenausbreitung in Beton direkt zeigen und
- 2.) die Vorgänge bei der in Abschnitt 6.3 gezeigten bistatischen Messung an der 200 mm dicken Betonplatte mit 132 mm tiefer Nut zeigen, wie Rückwandreflexionen, Beugungserscheinungen an der Nut, etc.

7.1.1 Wellenausbreitung bei senkrechter Einschallung mit einem luftgekoppelten Ultraschallprüfkopf

Die Wellenausbreitung in Beton bei senkrechter Einschallung des in dieser Arbeit verwendeten ACU-Prüfköpfes wird mit Hilfe eines Laservibrometers wie in Abbildung 7.2 dargestellt visualisiert. Die Messung wird an demselben Betonprobekörper wie in Abschnitt 6.1 durchgeführt, allerdings wird hier an der dicksten Stufe in Längsrichtung des Körpers eingeschallt. Die Messfläche hat eine Größe von 400 mm x 400 mm mit einem Messraster von 5 mm. Die zeitliche Mittelung beträgt 700 Signale/Messpunkt, was zu einer relativ langen Messzeit von 2 d und 18 h führt.

Die Abschirmung dient als Hindernis für den in alle Richtungen laufenden Luftschall, um eine Störung des Empfangssignals zu verhindern.

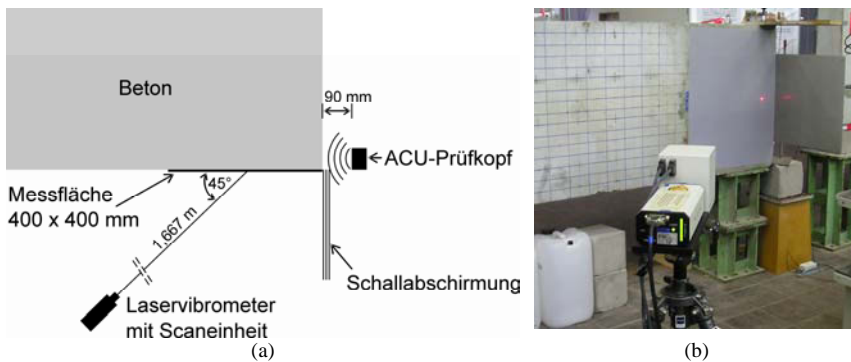


Abbildung 7.2 Messaufbau zur Visualisierung der Wellenausbreitung in Beton bei senkrechter Einschallung mit einem ACU-Prüfkopf: Messaufbau als Draufsicht (a), Ansicht vom Laservibrometer aus (b)

Abbildung 7.3 zeigt ausgewählte Zeitschnitte (C-Bilder). In den ersten beiden Bildern ist zunächst nur die sich am schnellsten ausbreitende Longitudinalwelle zu sehen. Im dritten und vierten Bild ist zusätzlich die langsamere Transversal- und Rayleighwelle anhand der kleineren Wellenlänge erkennbar.

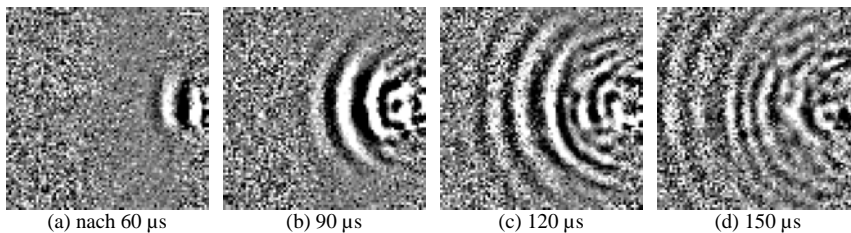


Abbildung 7.3 Wellenausbreitung im Beton bei senkrechter Einschallung mit einem ACU-Prüfkopf; Zeitschnitte nach 60 µs, 90 µs, 120 µs und 150 µs

Um nun zu sehen, welche Auswirkung der Einfallswinkel auf den Brechungswinkel in Beton hat, werden Messungen an einem zweiten 200 mm dicken Probekörper mit einer 135 mm tiefen und 3 mm dicken Nut durchgeführt.

7.1.2 Wellenausbreitung bei Anregung mit einem Normalprüfkopf mit Plexiglaskeil

Zunächst wird ein konventioneller Prüfkopf zusammen mit einem 29° Plexiglaskeil - der einen Brechungswinkel von ca. 45° in Beton erzeugt - verwendet.

Der Messaufbau ist in Abbildung 7.4 dargestellt. Der Schalleintrittspunkt Luft/Beton liegt ca. 200 mm von der Nut entfernt. Die Schallwelle sollte demzufolge direkt unterhalb der Nut an der Rückwand reflektiert werden. Es wird eine Messfläche von 700 x 200 mm abgescannt (Messraster = 2,5 mm; zeitliche Mittelung = 150 Signale/Messpunkt; Messzeit = 2 d und 6 h). Der Strahl des Laservibrometers steht in einem Winkel von 49° zum Lot auf der Messfläche und hat dieselbe Ausrichtung wie die Nut. Dadurch wird sowohl eine Schwingungskomponente der einfallenden und der an der Rückwand reflektierten Welle empfangen. Die Empfindlichkeit wird allerdings dadurch noch geringer, da der Laserstrahl nun in zwei Richtungen schräg zur Schwingungsrichtung der ausbreitenden Wellen steht.

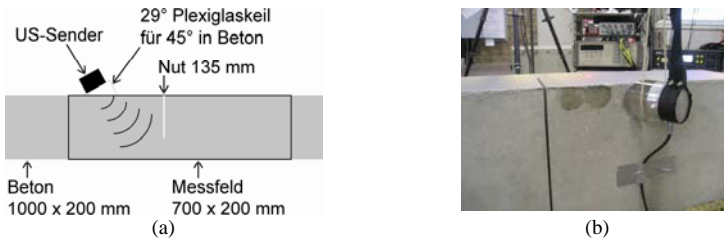


Abbildung 7.4 Messaufbau zur Visualisierung der Wellenausbreitung bei Schrägeinschallung mit einem konventionellem Prüfkopf auf 29° Plexiglaskeil für einen Brechungswinkel in Beton von ca. 45° : Draufsicht von oben auf die Messfläche (a), Ansicht von der Sendeseite (b)

Das Messergebnis wird wieder in Form von ausgewählten Zeitschnitten in Abbildung 7.5 dargestellt. Von besonderem Interesse sind die Rückwandreflexion und die Beugung an der Nutspitze. Man erkennt den positiven Effekt, dass durch die Nut eine Interferenz der an der Rückwand reflektierten Welle mit der nachlaufenden Welle (langer Puls) verhindert wird. Allerdings ist die Trennung der verschiedenen Rückwandechoarten und einer eventuellen Beugung an der Nutspitze optisch nicht möglich.

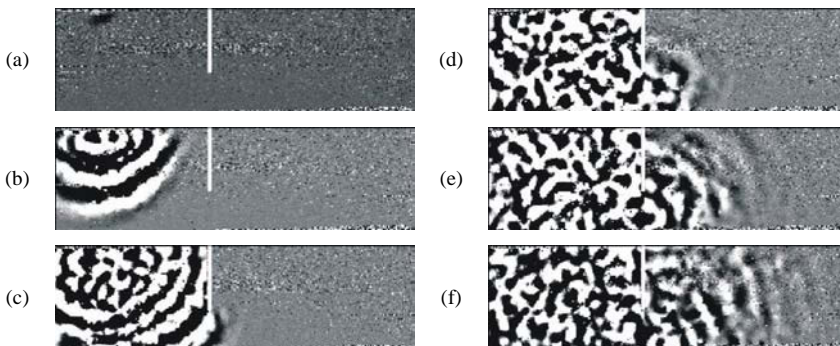


Abbildung 7.5 Schallfeld in Beton mit Nut mit konventionellem Prüfkopf und 29° Plexiglaskeil für einen Brechungswinkel in Beton von ca. 45° ; Zeitschnitte von $20 \mu\text{s}$ (a) bis $220 \mu\text{s}$ (f) in Zeitschritten von $40 \mu\text{s}$

7.1.3 Wellenausbreitung bei schräger Einschallung unter 3° mit einem luftgekoppeltem Ultraschallprüfkopf

In einer zweiten Messung an dem Nutprobekörper soll nun der schwierigere Fall von schräg auftreffendem Luftultraschall auf den Probekörper betrachtet werden. Der genaue Messaufbau ist in Abbildung 7.6 dargestellt. Der Sendeprüfkopf wird in einem Einfallswinkel von $\alpha_A = 3^\circ$ positioniert. Nach dem Brechungsgesetz ergibt sich an der Grenzfläche Luft/Beton für die Longitudinalwelle in Beton ein Brechungswinkel von ca. 36° . Der Schalleintrittspunkt Luft/Beton liegt 147 mm von der Nut entfernt, damit die Schallwelle unterhalb der Nut an der Rückwand reflektiert wird. Schallabschirmungen werden auch hier zur Vermeidung von Störsignalen eingesetzt. Weitere Einstellungen sind: Messraster = 5 mm, zeitliche Mittelung = 2500 Signale/Messpunkt; Messzeit = 4 d und 20 h.

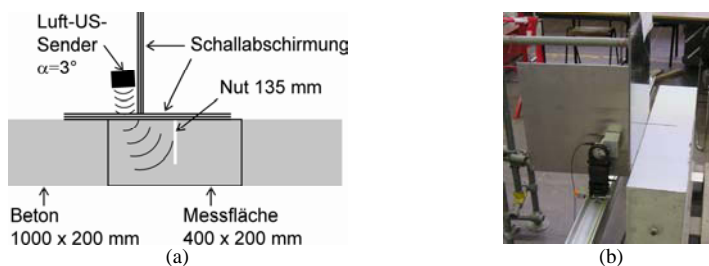


Abbildung 7.6 Messaufbau zur Visualisierung der Wellenausbreitung von luftgekoppeltem Ultraschall im Betonnutprobekörper bei einem Einfallswinkel von 3° : Draufsicht (a), Fotoansicht (b)

Das resultierende Messergebnis in Abbildung 7.7 unterscheidet sich zu den Wellenbildern in Abbildung 7.5 hauptsächlich in dem wesentlich schlechteren Signal-zu-Rausch-Verhältnis, trotz stärkerer Mittelung der Signale. Es sind aber dennoch Reflexionen an der Rückwand erkennbar. Sehr gut zu sehen ist die starke Ablenkung der Longitudinalwelle vom Lot. Sie stimmt mit dem zuvor berechneten Winkel von $\sim 36^\circ$ überein. Dadurch wird auf anschauliche Weise deutlich, welchen großen Einfluss die exakte Positionierung dieses ACU-Prüfkopfes auf das Empfangssignal bei einer Messung in Durchschallungs- oder Echoanordnung hat.

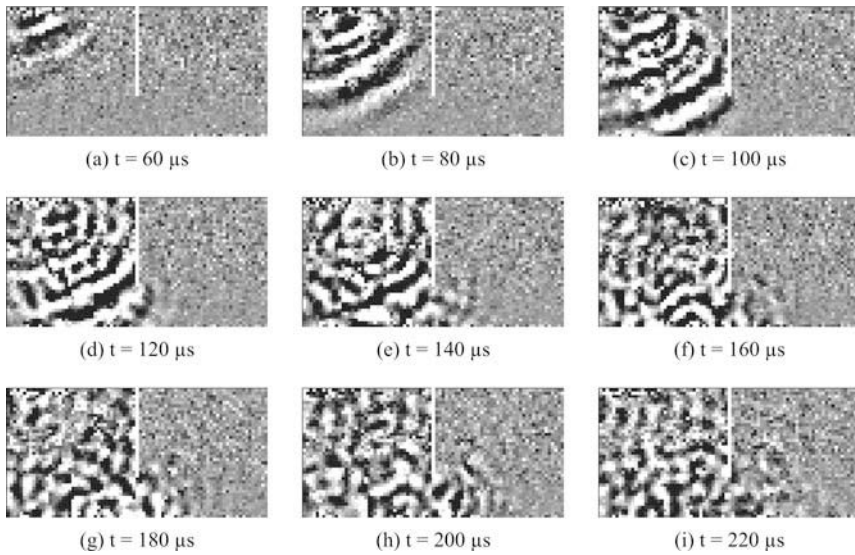


Abbildung 7.7

Schallfeld in Beton mit Nut eines ACU-Prüfkopfes bei einem Einfallswinkel von 3° für einen Brechungswinkel in Beton von ca. 36° ; Zeitschnitte von $60 \mu\text{s}$ (a) bis $220 \mu\text{s}$ (i) in Zeitschritten von $20 \mu\text{s}$

8 Automatisierte Messungen mit Scanner

Die Machbarkeit von luftgekoppeltem Ultraschallecho wurde in Abschnitt 6 ausführlich gezeigt. Bei diesen Messungen mussten die Prüfköpfe und die Abschirmungen von Messpunkt zu Messpunkt noch per Hand bewegt werden, da ein Scannersystem noch nicht zur Verfügung stand. Der Zeitaufwand für diese Messungen war dementsprechend hoch. Aufbauend auf den dort gewonnenen Erkenntnissen wurde eine Messapparatur für automatisierte Messungen namens „Luftscanner“ aufgebaut, die in Abschnitt 4.2.2 beschrieben ist. Diese besteht aus einem kommerziellen Messsystem in Verbindung mit einem an der BAM konstruierten Scanner [94], für den eine Prüfkopfhalterung für Messungen in bistatischer Prüfkopfanordnung und Tandemanordnung entwickelt wurde. Mit dieser Messapparatur können in kürzester Zeit Messungen durchgeführt werden, die manuell nicht zu bewerkstelligen wären. Dadurch ist es nun möglich eine genaue Parameterstudie bezüglich des Einfallswinkels und des Prüfkopfabstandes der Tandemgeometrie durchzuführen und praxisrelevante Anwendungsfälle durch flächige Messungen mit der Tandemanordnung an Betonprobekörpern zu untersuchen.

In diesem Abschnitt werden die Messergebnisse und gewonnenen Erkenntnisse mit dieser Messapparatur an einer 200 mm dicken Betonplatte mit einer 58 mm schrägen Längsbohrung gezeigt.

Der Aufbau des verwendeten Betonprobekörpers wird in Abschnitt 8.1 beschrieben.

Die erste Untersuchung zeigt den Einfluss des Einfallswinkels auf die Wellenausbreitung bezüglich der Rückwandechos mit der bistatischen Prüfkopfanordnung, wodurch eine optimale Tandemgeometrie bestimmt wird (Abschnitt 8.2).

Mit der gefundenen Tandemgeometrie wird eine flächige Messung zur Dickenbestimmung der Betonplatte und zur Detektion der sich in ihr befindenden schrägen Bohrung durchgeführt (Abschnitt 8.3).

Weiterhin werden die kritischen Parameter beleuchtet und Lösungswege zur weiteren Verbesserung des Systems diskutiert (Abschnitt 8.4).

8.1 Beschreibung des Betonprobekörpers

Die Messungen wurden an einem 1000 x 600 x 200 mm großen Betonprobekörper mit einem Größtkorn von 16 mm durchgeführt. Er ist in Abbildung 8.1 abgebildet. Der Körper ist in Längsrichtung geradlinig durchbohrt. Die Bohrung hat einen Durchmesser von 58 mm und ist zusätzlich in y- und in z-Richtung geneigt. Sie hat über ihrem Scheitel eine Betondeckung von 30 mm bis 130 mm. Mit Punktkontaktprüfkopffarrays werden die Schallgeschwindigkeiten bestimmt zu:

$$c_L = 4330 \text{ m/s } (\pm 140 \text{ m/s}) \quad \text{für die Longitudinalwelle und}$$

$$c_T = 2710 \text{ m/s } (\pm 70 \text{ m/s}) \quad \text{für die Transversalwelle.}$$

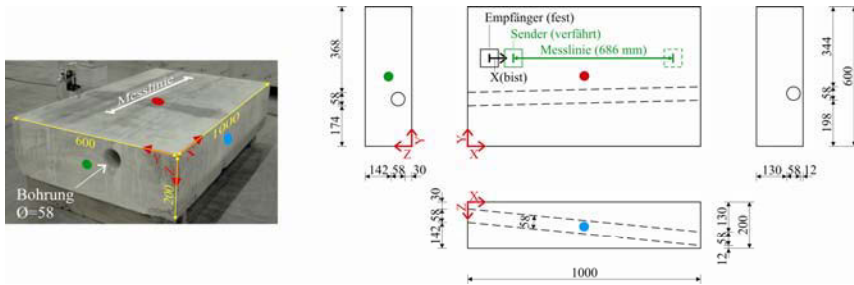


Abbildung 8.1 Betonprobekörper mit geneigter Längsbohrung (Maße in mm) und Messlinie der bistatischen Messungen (hier bei $\alpha_L = 0^\circ$; die Seiten sind durch farbige Punkte markiert)

8.2 Einfluss des Einfallswinkels auf die Wellenausbreitung in einer Betonplatte

Mit Hilfe des Scanners ist es nun möglich, den Einfluss des Einfallswinkels auf die Wellenausbreitung in einer Betonplatte wesentlich detaillierter und exakter zu untersuchen, als dies in Abschnitt 6.1 mit der manuellen Apparatur der Fall war.

Es stellt sich die Frage, welches die optimale Tandemgeometrie für eine Rückwanddetektion ist. Dazu wurden automatisierte Messungen mit bistatischer Prüfkopfanzordnung für Einfallswinkel von $0,0^\circ$ bis $12,0^\circ$ in Winkelschritten von $0,5^\circ$ durchgeführt.

8.2.1 Messaufbau

Die verwendete Scannerapparatur ist ausführlich in Abschnitt 4.2.2 erläutert. Gemessen wurde an dem im vorhergehenden Abschnitt 8.1 beschriebenen 200 mm dicken Betonprobekörper. Für einen eingestellten Einfallswinkel wurde eine Messlinie in dessen Längsrichtung aufgezeichnet. Die Messlinie liegt mittig zwischen dem äußeren Rand und der Bohrung. Im Unterschied zu allen bisher gezeigten bistatischen Messungen wird hier statt der Empfängerposition die des Senders bewegt, was allerdings zu keinem Unterschied des Ergebnisses führt.

Abbildung 8.2 zeigt den Prüfkopfaufbau bei einem Einfallswinkel von $0,0^\circ$ bei der Startposition des Empfängers (a) und dessen Endposition (b). Der senkrechte Abstand vom Sende- und Empfangsprüfkopf zur Betonoberfläche beträgt $89,3 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ mm}$ in der Startposition. Die Unebenheit der Betonoberfläche entlang der Messlinie ist mit einer maximalen Höhendifferenz von $\Delta z = 0,7 \text{ mm}$ nur leicht uneben und wird deshalb vernachlässigt. Die Messlinienlänge beträgt bei jeder Messung unter jedem Einfallswinkel immer $x = 686 \text{ mm}$ bei einem Messpunktabstand von $\Delta x = 1,052 \text{ mm}$. Der Startpunkt der Messlinie wird soweit an den Empfänger angesetzt, dass sich die Abschirmungen unter dem jeweiligen Einfallswinkel gerade nicht berühren (siehe Abbildung 8.2 (a)). Die gemessene Lufttemperatur beträgt im Mittel $\vartheta = 23,8 \text{ }^\circ\text{C} (\pm 0,5 \text{ }^\circ\text{C})$, daraus folgt nach Gl. 2.11 eine Schallgeschwindigkeit in Luft von $c_A = 345,5 \text{ m/s} (\pm 0,3 \text{ m/s})$. Zur Verbesserung des Signal-zu-Rausch-Verhältnisses wird eine zeitliche Mittelung von 11 Signale/Messpunkt eingestellt.

Die Zeitschrittweite beträgt $\Delta t_{\text{sample}} = 0,5 \mu\text{s}$. Als Sendepuls wird ein Rechteck mit einer Spannung von 200 V, einer Mittenfrequenz von 85 kHz und einer Pulswiederholfrequenz von 20 Hz (d.h. 20 Schüsse pro Sekunde) verwendet. Für eine bestmögliche Auflösung der Daten wird die Empfangsverstärkung für jede Messlinie gerade so eingestellt, dass eine Übersteuerung des Empfangssignals an keiner Stelle auftritt.

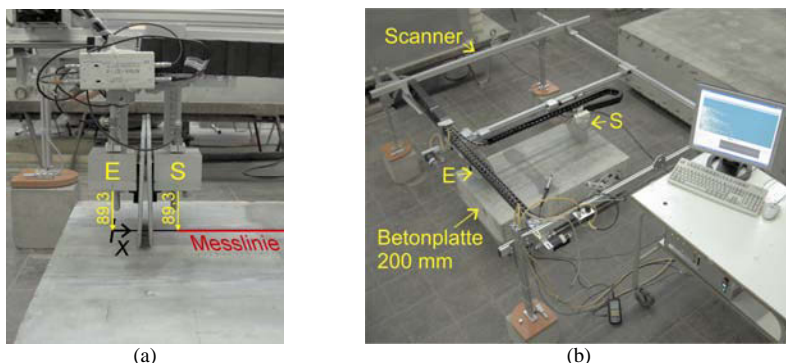


Abbildung 8.2 Messaufbau der automatisierten ACU-Messung mit bistatischer Prüfkopfanzordnung entlang einer Linie an einer 200 mm dicken Betonplatte bei einem Einfallswinkel von $0,0^\circ$; Empfängerposition ist fixiert, Sender verfährt in x-Richtung: Startposition des Senders (a), Endposition des Senders (b)

Die Vorlaufzeit für den Luftweg ist abhängig von dem Einfallswinkel α_A . Die Gesamtvorlaufzeit $t_{\text{Vorlauf,ges}}$ muss deshalb für jeden Einfallswinkel neu über die direkte Vorlaufzeitbestimmung nach Gl. 4.10 bestimmt werden, wobei ausgenutzt wird, dass die Körperoberflächenkrümmung vernachlässigt wird und dass Send- und Empfangsprüfkopf den gleichen Abstand zur Körperoberfläche aufweisen. Die Gesamtvorlaufzeit bestimmt sich dann zu

$$t_{\text{Vorlauf,ges}} = 2 \cdot t_{A,\text{direkt}} + t_{\text{Vorlauf,ohne_Luft}}$$

$$= \frac{t_{\text{mono}} - t_{\text{Vorlauf,ohne_Luft}}}{\cos(\alpha_A)} + t_{\text{Vorlauf,ohne_Luft}} \quad \text{Gl. 8.1}$$

Aus einer monostatischen Messung geht die Laufzeit $t_{\text{mono}} = 530,5 \mu\text{s} + 38 \mu\text{s} = 568,5 \mu\text{s}$ (Maximum Einhüllende) hervor. Die Vorlaufzeit des Messsystems ohne Luft beträgt $t_{\text{Vorlauf,ohne_Luft}} = 9 \mu\text{s}$.

Aus den Schallgeschwindigkeiten c_L , c_T und c_A ergeben sich über das Brechungsgesetz Gl. 2.16 die kritischen Winkel für die Grenzfläche Luft/Beton zu:

$$\alpha_{1\text{kr}} = 4,6^\circ \text{ (Totalreflexion der Longitudinalwelle) und}$$

$$\alpha_{2\text{kr}} = 7,3^\circ \text{ (Totalreflexion der Longitudinal- und Transversalwelle).}$$

8.2.2 Auswertung und Darstellung der Messergebnisse

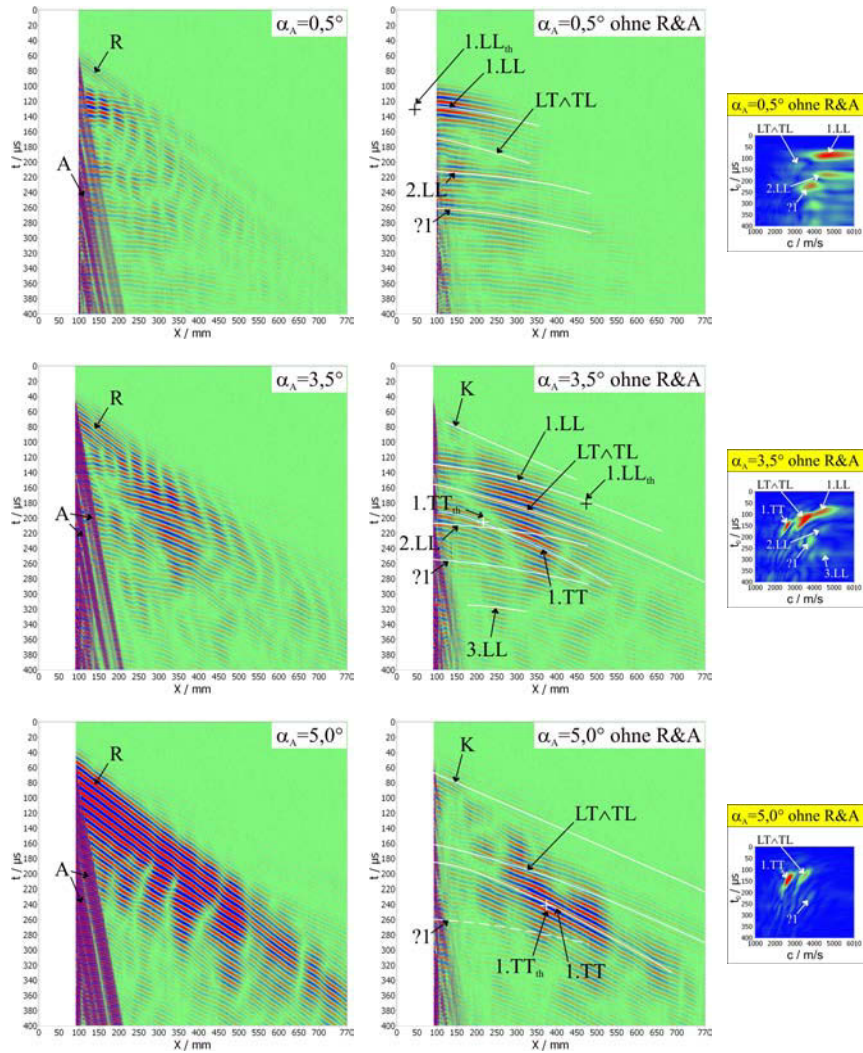


Abbildung 8.3

Ausgewählte Messergebnisse bei bistatischer Prüfkopfanzordnung an 200 mm dicker Betonplatte bei Einfallswinkeln α_A von $0,5^\circ$ (stärkstes Longitudinalwellen-Rückwandeck 1.LL), $3,5^\circ$ (stärkstes Rückwandeck mit Modenkonversion an Rückwand $LT \wedge TL$) und $5,0^\circ$ (stärkstes Transversalwellen-Rückwandeck 1.TT); links: B-Bild nach digitaler Unterdrückung der Rayleighwelle R und Luftwelle A; rechts: Geschwindigkeitsspektrum des B-Bildes in der Mitte

Die Auswertung und Darstellung der Messungen geschieht nach der bereits bewährten Methode für bistatische Messungen, wie sie auch schon in Abschnitt 5.3, 5.4, 6.1 und 6.3 angewendet wurde. In der Abbildung 8.3 sind zeilenweise für

ausgewählte Einfallswinkel das sich ergebende B-Bild (links), das B-Bild nach Unterdrückung der Rayleighwelle R und die um die Abschirmung laufende Luftwelle A (mittig) sowie das zugehörige Geschwindigkeitsspektrum (rechts) abgebildet. Dabei werden nur die Messungen mit den stärksten Rückwandreflexionen dargestellt. Dies sind die Messungen mit den Einfallswinkeln:

- $\alpha_A = 0,5^\circ$: stärkstes Longitudinalwellen-Rückwandecho 1.LL
- $\alpha_A = 3,5^\circ$: stärkstes Rückwandecho mit Modenkonversion an der Rückwand $LT \wedge TL$
- $\alpha_A = 5,0^\circ$: stärkstes Transversalwellen-Rückwandecho 1.TT

In Anhang A.3 (Abbildung A.3.1) sind zugehörig zu dieser Messreihe weitere Messergebnisse mit Einfallswinkeln α_A von $0,0^\circ$ bis $7,5^\circ$ in Winkelschritten von $0,5^\circ$.

Die Signalwerte in den B-Bildern sind auf die Spannung vor der Empfangsverstärkung zurückgerechnet, um sie qualitativ und quantitativ miteinander vergleichen zu können. Die Farbskala der B-Bilder (siehe Abbildung 4.13 (c)) reicht von $-10 \mu\text{V}$ (blau) über $0 \mu\text{V}$ (grün) bis $+10 \mu\text{V}$ (rot).

Die Farbskala der Geschwindigkeitsspektren ist dieselbe wie für die B-Bilder. Da aber dort die Einhüllende dargestellt wird, beginnt sie bei Null (blau), geht über grün bis hin zu rot. Deren maximaler Farbskalenwert ist willkürlich.

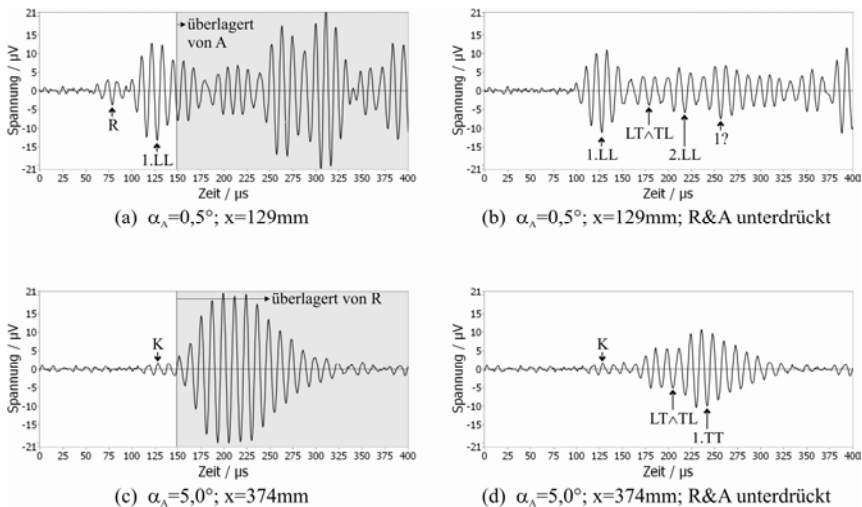


Abbildung 8.4

A-Bilder der bistatischen Messung an 200 mm Beton: bei $\alpha_A = 0,5^\circ$ und $x = 129 \text{ mm}$ vor (a) und nach der Unterdrückung von R und A (b), bei $\alpha_A = 5,0^\circ$ und $x = 374 \text{ mm}$ vor (c) und nach der Unterdrückung von R und A (d)

Die Erkenntnisse aus den bisherigen bistatischen Messungen aus den vorherigen Kapiteln werden hier bestätigt, da sich dieselben Wellenanzeigen in den B-Bildern ergeben.

Aus den Messungen ergibt sich, dass die Amplitude der Rayleighwelle mit zunehmendem Einfallswinkel stark ansteigt und spätestens ab 6° das B-Bild dominiert (siehe Abbildung A.3.1).

Weiterhin ergibt sich aus den Messungen eine optimale Konfiguration zur Detektion des Longitudinalwellen-Rückwandechos 1.LL und eine zur Detektion des Transversalwellen-Rückwandechos 1.TT. Die sich ergebenden A-Bilder bei dieser Konfiguration sind in Abbildung 8.4 vor (linke Spalte) und nach (rechte Spalte) Unterdrückung der Rayleighwelle R und Luftwelle A dargestellt.

8.2.2.1 Transversalwellen-Rückwandecho

Das erste Transversalwellen-Rückwandecho 1.TT erscheint erwartungsgemäß bei einem Einfallswinkel kurz oberhalb des 1. kritischen Winkels $\alpha_{1kr} = 4,6^\circ$ bei ungefähr 5° am stärksten. Für diesen Einfallswinkel ergibt sich sowohl in Zeit- als auch in x-Richtung eine sehr gute Übereinstimmung mit dem nach dem Brechungsgesetz ermittelten Transversalwellen-Rückwandecho 1.TT. Hinderlich ist die starke Rayleighwelle, da sie 1.TT überdeckt (siehe Abbildung 8.4 (c) und (d)).

Die Laufzeitmessung über das Maximum der Einhüllenden des Transversalwellen-Rückwandechos ergibt nach dem Schema in Anhang A.4 eine Betondicke von $d_T = 190,1 \text{ mm} \approx 190 \text{ mm}$ mit einer kombinierte Standardunsicherheit von $12,2 \text{ mm} \approx 12 \text{ mm} = 6,4 \%$. Damit ist die über Ultraschall gemessene Betondicke $10 \text{ mm} (= 5 \%)$ dünner als die tatsächliche Dicke von 200 mm . Allgemein liegt die Ablesunsicherheit in einem Bereich von maximal der halben Periodendauer von $\pm T/2 = \pm 6 \mu\text{s}$. Bei der Einhüllenden des Empfangssignals in Abbildung 8.4 (d) beträgt die Ablesunsicherheit $\pm 3 \mu\text{s}$.

Eine mechanische Unterdrückung der Rayleighwelle ist nicht möglich. Sie kann nur durch digitale Bearbeitung herausgefiltert werden. Bei einer Messung mit der Tandemanordnung dürfte dies relativ schwierig zu bewerkstelligen sein.

Theoretisch ließe sich von jedem Empfangssignal die Rayleighwelle abziehen. Dazu muss Form, Einsatz und Amplitude der Rayleighwelle bekannt sein. Diese drei Parameter müssen allerdings eine extrem hohe Genauigkeit aufweisen. Bei einem Fehler des Rayleighwelleneinsatzes von nur einer halben Periode ($5,9 \mu\text{s}$), filtert man z.B. nicht die Rayleighwelle heraus, sondern verstärkt sie auf das Doppelte ihres Wertes.

Neben der störenden Rayleighwelle R treten auch noch andere Wellen auf, wie die Kriechwelle K und die Rückwandreflexion mit Modenkonzersion $LT \wedge TL$.

Die Kriechwelle K weist nur eine kleine Amplitude auf und tritt zeitlich wesentlich früher auf als 1.TT. Sie wirkt sich somit nicht störend auf die Interpretation der Messung aus.

Zeitlich kurz vor 1.TT entsteht eine Wellenanzeige aufgrund einer Rückwandreflexion mit Modenkonzersion $LT \wedge TL$. Der zeitliche Abstand von $LT \wedge TL$ zu 1.TT wächst mit zunehmender Betondicke. Diese Welle wirkt sich teilweise störend auf 1.TT aus. Von Vorteil ist, dass sie im Unterschied zur Rayleighwelle in direktem Zusammenhang mit der Betondicke steht und somit immer zeitlich früher auftritt als 1.TT. Nachteilig ist hingegen, dass sie sich besonders bei dünnen Betondicken mit 1.TT teilweise überlagert.

8.2.2.2 Longitudinalwellen-Rückwandecho

Analog zu der Betondickenermittlung über das Transversalwellen-Rückwandecho soll dies auch für das Longitudinalwellen-Rückwandecho getan werden. Die Laufzeitmessung über das Maximum der Einhüllenden des Longitudinalwellen-Rückwandechos bei einem Einfallswinkel von $\alpha_A = 0,5^\circ$ ergibt eine Betondicke von $d_L = 190 \text{ mm} \pm 11 \text{ mm} = 5,6 \%$. Die über Ultraschall gemessene Betondicke ist demnach 10 mm (= 5 %) dünner als die tatsächliche Dicke von $200 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$. Die zugehörige Fehlerfortpflanzungsrechnung ist in Anhang A.2 ausführlich dargestellt.

Das Longitudinalwellen-Rückwandecho 1.LL eignet sich, wie im Folgenden erläutert wird, wesentlich besser für die Tandemanordnung als das Transversalwellen-Rückwandecho 1.TT.

Die Rayleighwelle R ist zwar selbst noch bei einem Einfallswinkel von $0,5^\circ$ vorhanden, allerdings so schwach und zeitlich etwas früher, dass sie das erste Longitudinalwellen-Rückwandecho 1.LL nicht stört (siehe Abbildung 8.4 (a) und (b)).

Statt der Rayleighwelle R ist nun die an der Abschirmung gebeugte Luftwelle A hinderlich.

8.2.3 Folgerung und weitere Erkenntnisse

Damit bei der Rückwanddetektion über das erste Longitudinalwellen-Rückwandecho 1.LL die Luftwelle A zeitlich später als 1.LL den Empfänger erreicht, sollten die Abschirmungen möglichst weit auseinander stehen und nah an der Körperoberfläche entlang geführt werden. Da die Prüfköpfe wiederum möglichst dicht beieinander sein müssen, sind diesbezüglich Grenzen gesetzt, die hier allerdings noch nicht ausgereizt sind und eine weitere Optimierung erfordern.

In dem Versuch, die an den Abschirmungen gebeugte Luftschallwelle A durch konstruktive Maßnahmen in ihrer Amplitude zu reduzieren, gelang durch weitere Experimente folgende wesentliche Erkenntnis.

Bisher wurde immer ein Luftspalt zwischen den Abschirmungen eingehalten, um die Prüfköpfe mitsamt den Abschirmungen entlang der Betonoberfläche verfahren zu können. Wenn nun zwischen den Abschirmungen eine zusätzliche elastische Platte positioniert wird, die zu jeder Zeit auf der Betonplatte aufliegt, so wird der durch die Beugung an den beiden Abschirmungen geschwächte Luftschall durch die zwischenliegende Platte auf ein Minimum reduziert.

Bei der nachfolgenden flächigen Messung mit Tandemanordnung in Abschnitt 8.3 wird bereits eine gute Unterdrückung der Luftwelle A durch das Mitführen eines flexiblen Mauspads zwischen den Abschirmungen erzielt, das zu jeder Zeit an die Betonoberfläche gedrückt wird. Über bessere konstruktive Ausführungen wird in Abschnitt 8.4 eingegangen werden.

8.2.4 Fazit

Aus den mit einem Scanner durchgeführten umfangreichen bistatischen Messungen an einer 200 mm dicken Betonplatte mit unterschiedlichen Einfallswinkeln können

die in Abschnitt 5.3, 5.4, 6.1 und 6.3 bereits geschilderten Erkenntnisse bestätigt und ergänzt werden.

Mehrere Arten von Rückwandechos sind identifizierbar. Das Transversalwellen-Rückwandecho tritt bei Beton am stärksten bei einem Einfallswinkel von 5° auf. Es eignet sich allerdings nicht für eine Messung der Rückwandechos aufgrund der starken Überlagerung mit der Rayleighwelle.

Am besten lässt sich eine Messung der Rückwandechos in Beton mit der reinen Longitudinalwelle bewerkstelligen, und zwar bei einem Einfallswinkel von kleiner gleich $0,5^\circ$ und einer weiteren konstruktiven Unterdrückung des an den Abschirmungen gebeugten Luftschalls durch eine an die Betonoberfläche angedrückte Platte.

Die Dickenbestimmung der Betonplatte ergibt sowohl über das Transversalwellen- als auch über das Longitudinalwellen-Rückwandecho eine 5 % zu geringe Betondicke, liegt aber innerhalb der Messunsicherheit von 5,6 % für das Longitudinalwellenecho und 6,4 % für das Transversalwellenecho.

8.3 Flächige Messungen mit Tandemanordnung

Die in dem vorherigen Abschnitt 8.2 ermittelte optimale Prüfkopfkonfiguration (Einfallswinkel $\alpha_A = 0,5^\circ$; Abstand vom Schalleintritts- zum Schallaustrittspunkt auf der Grenzfläche Luft/Beton von $x_{\text{Eintritt/Austritt}} = 128,4$ mm) soll dazu dienen, eine flächige automatisierte Messung an dem in Abschnitt 8.1 beschriebenen Betonprobekörper in Tandemanordnung durchzuführen. Diese Messung ist ein erstes Anwendungsbeispiel, bei dem scannend in kurzer Zeit eine Betonplatte mit luftgekoppeltem Ultraschall untersucht wird. Ziel ist es, ein deutliches Longitudinalwellen-Rückwandecho in der Tiefe von 200 mm zu erhalten. An der Stelle der schrägen Längsbohrung wird eine Rückwandabschattung oder eine Laufzeitverschiebung erwartet. Weiterhin gilt das Augenmerk den direkten Reflexionen an der Bohrung, welche jedoch aufgrund der Neigung und der gekrümmten Oberfläche der Bohrung nicht zwangsläufig zu erwarten sind. Der Probekörperaufbau stellt insofern eine hohe Herausforderung für das Verfahren dar.

Zunächst wird wiederum der Messaufbau in Abschnitt 8.3.1 erläutert. Es folgt die Darstellung und Auswertung der Messergebnisse in Abschnitt 8.3.2.

8.3.1 Messaufbau

Der Probekörper ist in Abschnitt 8.1 beschrieben. Abbildung 8.5 (a) zeigt den Messaufbau als Draufsicht (Bild oben) und Seitenansicht (Bild unten) zu Beginn der Messung, bei der das Tandem über dem ersten Messpunkt positioniert ist. Rechts davon ist in Abbildung 8.5 (b) ein Foto der verbesserten Abschirmkonstruktion zu sehen, auf die bereits in Abschnitt 8.2.3 eingegangen wurde. Bei dieser ist zwischen den Schallabschirmungen ein Computer-Mauspad platziert, das mittels Gummibänder auf die Betonoberfläche gedrückt wird und dadurch den an den Abschirmblechen gebeugten Luftschall minimiert.

Die Mitte der Tandemanordnung markiert den Messpunkt. Aufgrund der Größe des Tandems muss eine sinnvoll gewählte Messfläche kleiner als die Betonoberfläche

sein, damit der Bereich um den Schallein- und Schallaustrittspunkt ebenfalls auf der Betonoberfläche liegt.

Die 791,2 mm x 519,4 mm große Messfläche wurde mit Hilfe des Scanners mäanderförmig abgefahren. Die Scanrichtung verläuft in x-Richtung. Der Abstand der Messpunkte beträgt in x- und y-Richtung rund 4 mm. Eine zeitliche Mittelung war nicht notwendig und wurde nicht vorgenommen. Für die gesamte Messfläche wurden bei einer Pulswiederholfrequenz von 20 Hz (20 Schüsse pro Sekunde) insgesamt $196 \times 129 = 25284$ Messpunkte in 24:42 min aufgezeichnet, wovon 3:38 min für die Datenspeicherung benötigt wurden.

Die Lufttemperatur betrug $24,4 \text{ }^\circ\text{C}$ ($\pm 0,3 \text{ }^\circ\text{C}$), daraus folgt nach Gl. 2.11 eine Schallgeschwindigkeit in Luft von $c_A = 345,9 \text{ m/s}$ ($\pm 0,2 \text{ m/s}$). Die Gesamtvorlaufzeit wird am besten über eine automatisierte flächige monostatische Messung mit einem Einfallswinkel von 0° ermittelt. Infolge der Unebenheit der Betonoberfläche innerhalb des Messfeldes von 1,4 mm ergab sich eine Gesamtvorlaufzeit einschließlich der Laufzeit für den Luftweg von schwerpunktmäßig $568 \text{ } \mu\text{s}$ ($+6 \text{ } \mu\text{s}$ und $-2 \text{ } \mu\text{s}$).

Die Empfangsverstärkung betrug 12162 fach (= 82 dB). Alle übrigen Einstellungen entsprechen denjenigen der vorherigen bistatischen Messungen in Abschnitt 8.2.

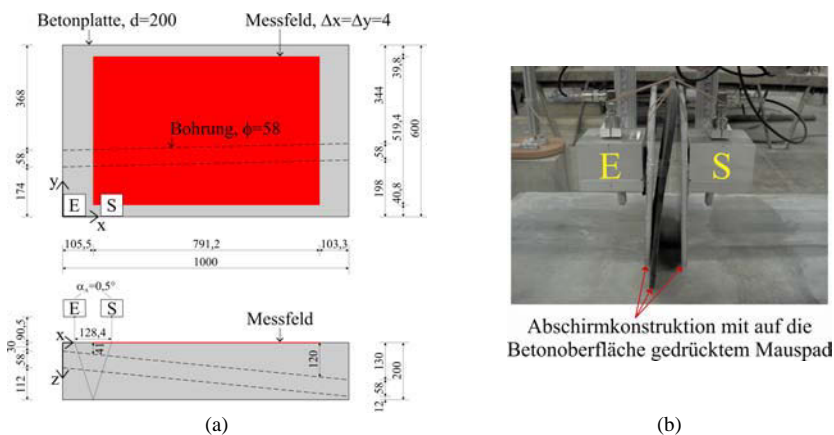


Abbildung 8.5 Messaufbau der automatisierten flächigen Tandemmessung an der 200 mm dicken Betonplatte mit geneigter Längsbohrung; Draufsicht (a, oben) und Seitenansicht (a, unten) des Messaufbaus bei Tandem über dem ersten Messpunkt; verbesserte Abschirmkonstruktion zur Unterdrückung der direkten Luftwelle (b)

8.3.2 Darstellung und Auswertung der Messergebnisse

8.3.2.1 Rohdaten

Von dem dreidimensionalen Rohdatensatz wird die Einhüllende über die Hilbert-Transformation gebildet und in Form von Schnittebenen in alle drei Raumrichtungen x, y und z (bzw. t) dargestellt, wie beispielhaft in Abbildung 8.6 und Abbildung 8.7

zu sehen. Die Schnittbilder in den Abbildungen liegen über den Schnittebenen des Probekörpers, um die Reflexionsanzeigen mit der tatsächlichen Probekörpergeometrie vergleichen zu können. Die Schnittebenen des Probekörpers sind farbig hinterlegt.

Schallgeschwindigkeit der Longitudinalwelle

Die Schallgeschwindigkeit der Longitudinalwelle wird über die Laufzeit der stark ausgebildeten Rückwandanzeige zu

$$c_L = \frac{\text{Schalllaufweg von 1. LL im Beton}}{\text{Schalllaufzeit von 1. LL im Beton}} = \frac{420\text{mm}}{90\mu\text{s}} = 4670 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad \text{Gl. 8.2}$$

bestimmt und stimmt somit sehr genau mit der über das Geschwindigkeitsspektrum bestimmten Schallgeschwindigkeit von 4650 m/s überein (siehe Geschwindigkeitsspektrum in Abbildung 8.3 für $\alpha_A = 0,5^\circ$). Verglichen mit der in Abschnitt 8.1 mit Punktkontaktprüfkopffarrays bestimmten Schallgeschwindigkeit von $c_L = 4330$ m/s ist sie jedoch wesentlich größer. Die Ursache dafür könnte in der vereinfachten Schallwegannahme bei der Bestimmung der Vorlaufzeit liegen. Hinzu kommen die Messunsicherheiten infolge der Ablesungenauigkeit und eventuellen Verzerrungen des Pulses auf dem Weg durch den Beton und infolge des schrägen Schalleintritts auf die Grenzfläche Luft/Beton.

Transformation: Zeitachse \rightarrow Tiefenachse

Mit Hilfe des fest angenommenen Abstandes vom Schalleintritts- zum Schallaustrittspunkt auf der Grenzfläche Luft/Beton von $x_{\text{Eintritt/Austritt}} = 128,4$ mm und der bestimmten Schallgeschwindigkeit von $c_L = 4670$ m/s ist eine Transformation der Zeitachse t in die Tiefenachse z für die erste reine Longitudinalwellenreflexion 1.LL über den Satz des Pythagoras möglich:

$$\begin{aligned} (c_L \cdot t_{1.LL})^2 &= x_{\text{Eintritt/Austritt}}^2 + (2z)^2 \\ \Rightarrow z &= 0,5 \cdot \sqrt{(c_L \cdot t_{1.LL})^2 - x_{\text{Eintritt/Austritt}}^2} \end{aligned} \quad \text{Gl. 8.3}$$

Die Unebenheit der Betonoberfläche wird hier vernachlässigt, was, wie sich zeigen wird auch noch zulässig ist, wenngleich eine Verschlechterung vor allem der später durchgeführten Rekonstruktionsrechnung anzunehmen ist. Optimal wäre es, die einzelnen Empfangssignale entsprechend der jeweiligen Zeitverschiebung infolge der Unebenheit der Betonoberfläche mit Hilfe der monostatischen Messungen zeitlich zu korrigieren, wie dies in Abschnitt 4.3.2.3 erläutert ist.

Rückwandechoanzeige

Die Messergebnisse zeigen eine eindeutige und erfreulich gut ausgeprägte Rückwandechoanzeige der Longitudinalwelle 1.LL (Abbildung 8.6 (a), (b), (c) und (d) sowie Abbildung 8.7 (b)). Aufgrund der hohen Amplitude von 1.LL bildet sich auch noch das zweite Longitudinalwellen-Rückwandecho 2.LL bei $t = 185$ μs aus.

Rückwandabschattung und direkte Reflexionen an der Längsbohrung

Die geneigte Längsbohrung hat eine Abschattung des Rückwandechos zur Folge, wie im C-Bild auf Höhe der Rückwand in Abbildung 8.6 (a) deutlich zu sehen. Direkte Reflexionen an der Oberseite der Bohrung sind nur sehr schwach ausgeprägt. Da sie mit den ebenfalls sehr schwachen Rayleighwellen interferieren und zudem die Bohrung geneigt ist, entstehen entsprechend geneigte Interferenzstrukturen in Form von typischen Flecken.

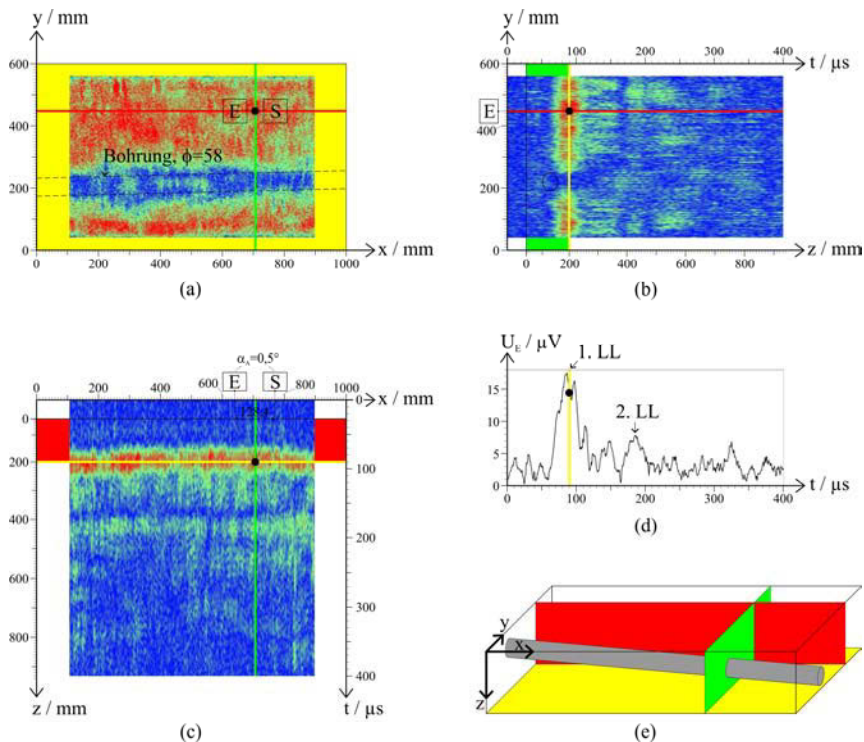


Abbildung 8.6

Schnittbilder (Einhüllende der Empfangssignale) der Tandemmessung an 200 mm dicker Betonplatte mit geneigter Längsbohrung; $c_L = 4670$ m/s: C-Bild Tiefenschnitt bei $z = 200$ mm (Rückwand) (a), D-Bild Profilschnitt bei $x = 706$ mm (b), B-Bild Profilschnitt bei $y = 451$ mm (c), Empfangssignaleinhüllende bei $x/y = 706$ mm/451 mm (schwarzer Punkt in (a)) (d) und Probekörper (e)

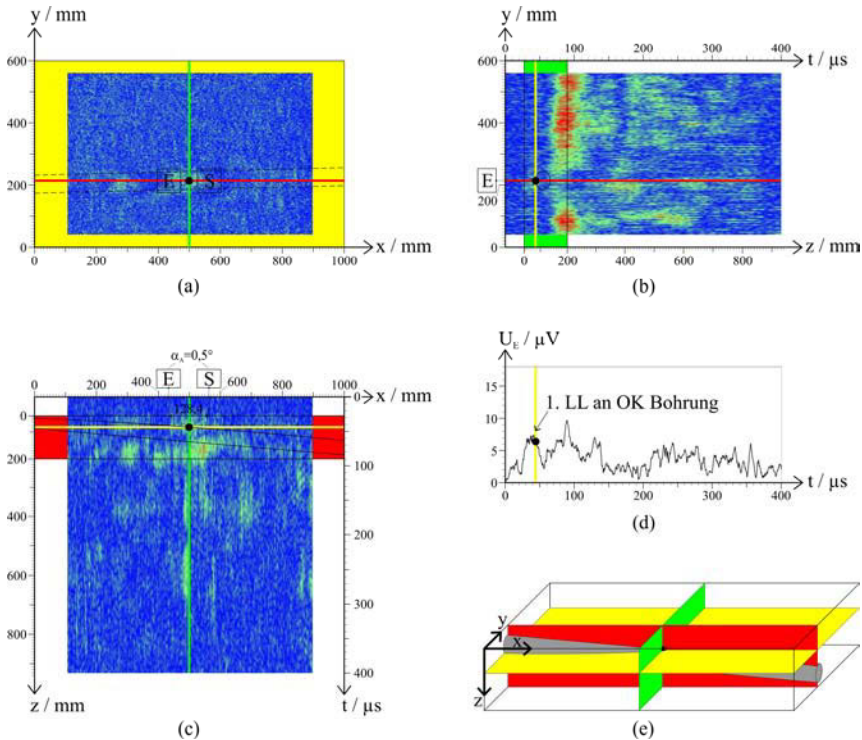


Abbildung 8.7 Schnittbilder (Einhüllende der Empfangssignale) der Tandemmessung an 200 mm dicker Betonplatte mit geneigter Längsbohrung; $c_L = 4670$ m/s: C-Bild Tiefenschnitt bei $t = 44$ μ s (entspr. $z = 80$ mm) (a), D-Bild Profilschnitt bei $x = 500$ mm (b), B-Bild Profilschnitt bei $y = 215$ mm (c), Empfangssignaleinhüllende bei $x/y = 500$ mm/215 mm (schwarzer Punkt in (a)) (d) und Probekörper (e)

8.3.2.2 3D-SAFT Rekonstruktion

Eine Verbesserung der Schnittbilder in Abbildung 8.6 und Abbildung 8.7 erreicht man durch eine Rekonstruktion, wie z.B. mit dem in Abschnitt 2.9 erläuterten 3D-SAFT-Algorithmus, mit dem eine nachträgliche (digitale) Fokussierung des Schallbündels auf jedes Volumenelement im Körper erreicht wird. Alle ersten Longitudinalwellenreflexionen 1.LL werden dadurch verstärkt. Störende Wellen wie z.B. die Rayleighwelle werden durch destruktive Überlagerung unterdrückt. Dies führt hier zu einer wesentlichen Verbesserung der direkten Reflexionen 1.LL an der Längsbohrung.

Die Durchführung des 3D-SAFT-Algorithmus und die Auswertung der Daten wird mit dem Programm „Muse-BAM (Version 1.5)“ vorgenommen, das in Abschnitt 4.2 erläutert ist. Um die Darstellung zu verbessern, wird von dem sehr nützlichen Werkzeug der Projektionsbildung Gebrauch gemacht.

Annahme und Parameter

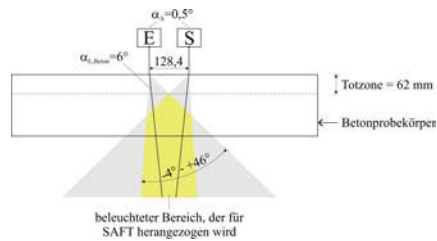


Abbildung 8.8 Schallwegannahme in Scanrichtung x für 3D-SAFT-Rekonstruktion

Abbildung 8.8 stellt den angenommenen Schallverlauf in x -Richtung für die Rekonstruktion dar. Auch für den Rekonstruktionsalgorithmus wird wieder vereinfachend von einem Schalleintrittspunkt (statt von einem Bereich) auf der Grenzfläche Luft/Beton für jeden Prüfkopf ausgegangen (siehe Abbildung 2.7). Im Beton ergibt sich nach dem Brechungsgesetz Gl. 2.16 ein Brechungswinkel der Longitudinalwelle von $\alpha_{L, \text{Beton}} = 6^\circ$. Das beste Rekonstruktionsergebnis bezüglich der direkten Reflexion von 1.LL an der Längsbohrung ergibt sich bei einem halben Öffnungswinkel in x -Richtung von $\gamma_x = -10^\circ$ bis $+40^\circ$ und in y -Richtung von $\gamma_y = -40^\circ$ bis $+40^\circ$ (siehe Abbildung 8.8). Damit das Rückwandecho 1.LL bei 200 mm auftritt, wird die Schallgeschwindigkeit der Longitudinalwelle zu $c_L = 4500$ m/s gewählt und ist somit etwas geringer als die aus der Messung Abbildung 8.6 (b) und (c) über Gl. 8.2 bestimmte Schallgeschwindigkeit von $c_L = 4670$ m/s. Aufgrund des Abstandes vom Schalleintritts- zum Schallaustrittspunkt auf der Grenzfläche Luft/Beton von $x_{\text{Eintritt/Austritt}} = 128,4$ mm ergibt sich bei flächiger Abtastung zwangsläufig eine Totzone von 62 mm an der Oberseite des Probekörpers, wie in Abbildung 8.8 zu sehen. Erst unterhalb dieser Totzone wird bei jeder Messposition ein bestimmter Volumenbereich beleuchtet (gelb markierter Bereich in Abbildung 8.8). Eine synthetische Fokussierung ist deshalb nur unterhalb der Totzone möglich. Nimmt man an, dass in der Totzone keine Reflexionen 1.LL auftreten können, so dürften direkte Reflexionen an der Oberkante der Bohrung erst ab $x = 320$ mm auftreten, weil erst ab dieser Stelle die Oberkante der Bohrung unterhalb der Totzone liegt.

Wie schon in Abschnitt 8.3.2.1 bei der Auswertung der Rohdaten wird auch hier ausschließlich die Einhüllende über die Hilbert-Transformation dargestellt, allerdings nach der Rekonstruktion der Rohdaten.

Rückwandechoanzeige und Rückwandabschattung

Abbildung 8.9 (a) zeigt einen Tiefenschnitt (C-Bild) in der Tiefe der Rückwand bei $z = 200$ mm und in Abbildung 8.9 (b) und (c) Profilprojektionen über die gesamte Länge x bzw. Breite y . Die Profilprojektionen enthalten sowohl Reflexionsanzeigen von der Rückwand sowie von der Bohrung in jedem der beiden Bilder. Die horizontale Lage der Bohrung ist aus allen drei Bildern wie auch in den Rohdatenbildern eindeutig über die deutliche Rückwandabschattung lokalisierbar.

Bezüglich der Tiefe der Bohrung können allerdings auch hier nach der Rekonstruktion keine Aussagen getroffen werden.

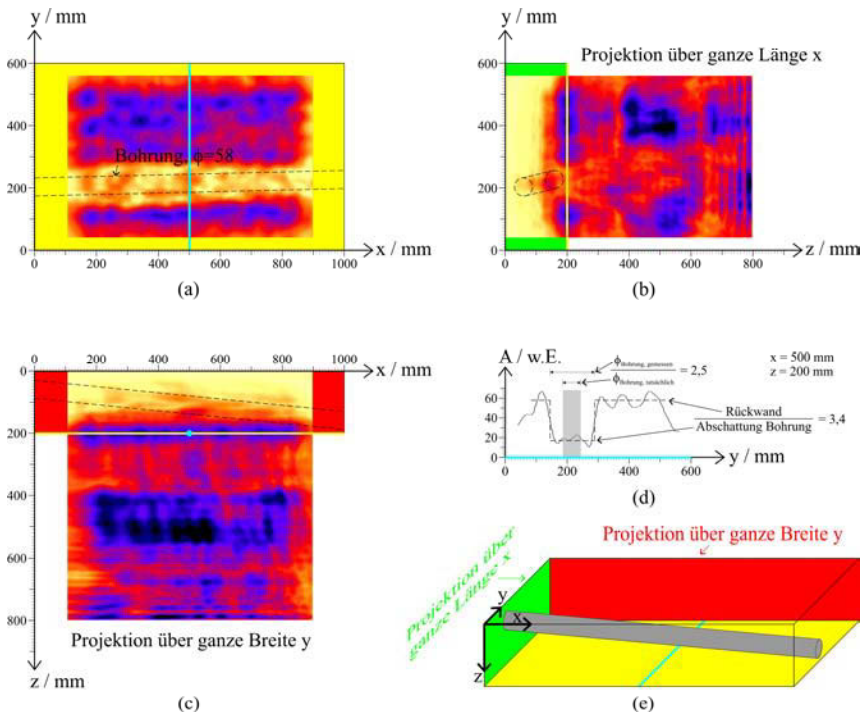


Abbildung 8.9 3D-SAFT-Rekonstruktion der Tandemmessung an 200 mm dicker Betonplatte mit geneigter Längsbohrung; $c_L = 4500$ m/s: C-Bild Tiefenschnitt bei $z = 200$ mm (Rückwand) (a), D-Bild Projektionsprofil über ganze Länge x (b), B-Bild Projektionsprofil über ganze Breite y (c), Amplitudenverlauf entlang y bei $x/z = 500$ mm/20 mm (d) und Probekörper (e)

Die Amplitudenverteilung entlang eines mittigen Schnittes (blaue Linie) durch den Tiefenschnitt in Abbildung 8.9 (a) bei $x = 500$ mm und $z = 200$ mm ist in Abbildung 8.9 (d) dargestellt. Es zeigt sich ein ausreichend großes Amplitudenverhältnis der Rückwand- zur Rückwandabschattungsanzeige von 3,4. Der abgeschattete Bereich ist 2,5 Mal breiter als die Bohrung.

Direkte Reflexionsanzeigen der Längsbohrung

Abbildung 8.10 (a) zeigt die Projektion von $z = 0$ mm bis 80 mm. Durch den 3D-SAFT-Algorithmus und die Projektionsdarstellung werden direkte Reflexionen an der Bohrung sehr gut sichtbar. Beispielhaft ist auch hier wieder die Amplitudenverteilung entlang der blau markierten Linie bei $x = 500$ mm in Abbildung 8.10 (b). Es zeigt sich ein Signal-zu-Rausch-Verhältnis von $S/R = 2,6$.

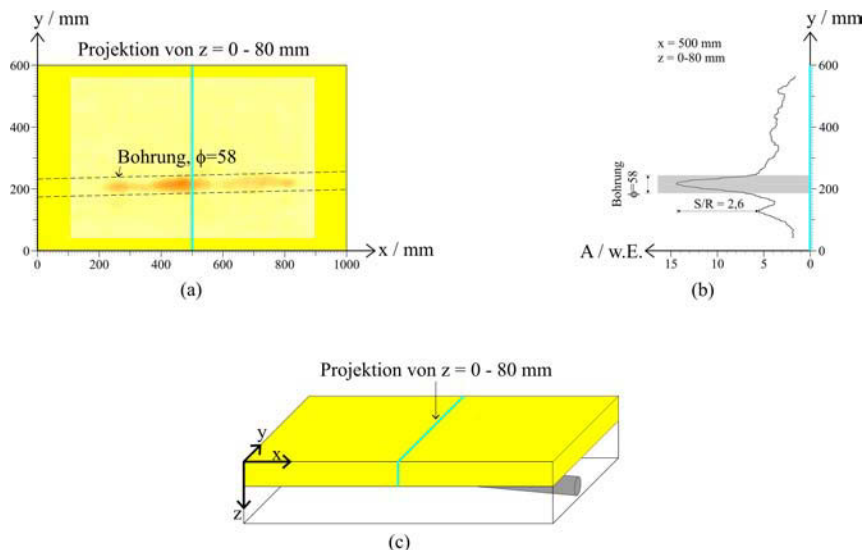


Abbildung 8.10 3D-SAFT-Rekonstruktion der Tandemmessung an 200 mm dicker Betonplatte mit geneigter Längsbohrung; $c_L = 4500$ m/s; C-Bild Projektion von $z = 0$ mm bis 80 mm (a), Amplitudenverlauf entlang y bei $x/z = 500$ mm/0 mm - 80 mm (b) und Probekörper (c)

Die direkten Reflexionen an der Bohrung sind in den Randbereichen nicht zu sehen. Dies hat folgende Bewandnis. In dem linken Bereich von $x = 0$ mm bis 210 mm befindet sich die Oberkante der Bohrung in einer Tiefe von $z = 30$ mm bis 51 mm und liegt somit noch eindeutig in der Totzone von $z = 0$ mm bis 62 mm (siehe Abbildung 8.8). Im rechten Bereich von $x = 840$ mm bis 1000 mm liegt die Oberkante der Bohrung in einer Tiefe von $z = 114$ mm bis 130 mm und somit unterhalb der dargestellten Projektionsebene von $z = 0$ mm bis 80 mm. Da aufgrund der Pulslänge ab $z = 80$ mm bereits die Rückwandechoanzeige beginnt und stark an Amplitude zunimmt, sind die wesentlich schwächeren Reflexionen an der Bohrung aufgrund deren ungünstigen Geometrie (gekrümmte Oberfläche) und Lage (geneigt) ab dieser Tiefe nicht mehr identifizierbar. Hinzu kommt, dass an den Rändern des Messfeldes weniger Signale zur Überlagerung für den 3D-SAFT-Algorithmus bereitstehen und somit Randeffekte in Form einer wesentlich geringeren Amplitude auf einer Breite von ca. 50 mm zu beobachten sind.

8.3.3 Fazit

Mit der Tandemanordnung können mit einem Einfallswinkel von $0,5^\circ$ und einer speziellen Konstruktion der Schallabschirmung in einer 200 mm dicken Betonplatte die Rückwand und eine innen liegende geneigte Längsbohrung akustisch abgebildet werden. Eine wesentliche Verbesserung zur direkten Visualisierung der Bohrung ergibt sich bei Einsatz des 3D-SAFT-Rekonstruktionsalgorithmus und einer anschließenden Datendarstellung in Form von Projektionen über einen bestimmten Bereich. Dadurch ist bewiesen, dass luftgekoppelter Ultraschall prinzipiell geeignet

ist, um scannend große, nur einseitig zugängliche Betonbauteile schnell untersuchen zu können.

8.4 Konzepte zur Verbesserung des Systems

Bei der Entwicklung des Verfahrens sind dem Autor eine Vielzahl von Zusammenhängen bewusst geworden, deren Umsetzung zu einer wesentlichen Verbesserung der entwickelten Scannerapparatur führen würden. Dazu wären eine Reihe weiterer Untersuchungen notwendig, die zur Optimierung des Systems dienen. Ziel ist es, das Verfahren für die Praxis robuster zu machen, aufwendige zeitintensive Kalibrierungen zu vermeiden, die Messzeit zu verkürzen und die Datenqualität und damit die Aussagesicherheit zu erhöhen. Viel versprechende Konzepte werden dazu in diesem Abschnitt vorgestellt.

8.4.1 Optimale Prüfkopfanordnung

Anhand der automatisierten bistatischen Messungen in Abschnitt 8.2 wird deutlich, dass eine Prüfkopfanordnung des Tandems mit senkrechtem Einfallswinkel in vielerlei Hinsicht optimal sein könnte, da bei ihr die Rayleighwelle klein bleibt.

Bei senkrechtem Einfallswinkel sollte dann der Abstand des Schalleintritts- zum Schallaustrittspunkt auf der Grenzfläche Luft/Beton auf ein Minimum reduziert werden, damit:

- der Schall bei der Transmission durch die Grenzfläche Luft/Beton und umgekehrt, sowie bei der Reflexion an der Rückwand bzw. an einer Fehlstelle wenig an Intensität verliert,
- sich die Totzone (siehe Abbildung 8.8) verkleinert und
- weniger bzw. kleinere störende Echoanzeigen infolge Modenkonzersion auftreten.

Zur Umsetzung stehen dem zwei Probleme gegenüber:

- Luftgekoppelte Ultraschallprüfköpfe für Beton haben aufgrund der geforderten Leistungsfähigkeit relativ breite Ausmaße. Außerdem hat ein breiter Prüfkopf den Vorteil, dass er eine gerichtete Prüfkopfcharakteristik aufweist und dadurch Störanzeigen wie die Rayleighwelle oder Echos mit Modenkonzersion nicht oder nur vermindert auftreten.
- Für das Verfahren muss eine Schallabschirmung zwischen dem Sende- und Empfangsprüfkopf platziert werden, die folglich zusätzlichen kostbaren Raum benötigt. Der momentan existierende Apparaturaufbau in Abbildung 8.5 (b) hat jedoch diesbezüglich noch einiges Verbesserungspotenzial.

8.4.2 Prüfköpfe

ACU-Prüfköpfe für die Echoanordnung sollten so breitbandig wie möglich ausgelegt werden. Die Breitbandigkeit wird durch Dämpfung des Wandlers erreicht, was ungünstigerweise zu Lasten der maximalen Schallintensität geht. Somit gilt es einen vernünftigen Kompromiss zwischen Breitbandigkeit und maximaler Intensität zu

finden. Laut Prüfkopfersteller sollen mittlerweile breitbandigere Prüfköpfe als die in dieser Arbeit verwendeten, bei nur geringen Leistungseinbußen, erhältlich sein.

Wie bereits in Abschnitt 8.4.1 erwähnt, sollte der Öffnungswinkel des Schallbündels so klein wie möglich sein, um einen verhältnismäßig großen Anteil der ebenen Wellenfront zu den seitlich abstrahlenden Wellen zu haben. Die seitlich abstrahlenden Schallwellen erzeugen die störenden Rayleigh-, Kriech- und Transversalwellen. Einen kleinen Öffnungswinkel erhält man durch breite Wandler. Durch eine größere Wandlerfläche vergrößert sich zudem die maximale Intensität, was ebenfalls vorteilhaft ist. Als Nachteil steht dem auf jeden Fall der hohe Herstellungspreis solcher Prüfköpfe entgegen.

8.4.3 Methoden zur Rayleighwellenunterdrückung

Rayleighwellen entstehen nur an der Betonoberfläche, wenn Luftschallwellen unter dem zweiten kritischen Winkel (bei Beton mit einer Transversalwellengeschwindigkeit von $c_{T,\text{Beton}} = 2000 \text{ m/s}$ bis 2900 m/s liegt α_{2kr} zwischen $6,8^\circ$ und $9,9^\circ$) auf die Betonoberfläche treffen.

Die von den Wandlerrändern herrührenden kreisförmigen (bei zweidimensionaler Betrachtung) Wellenfronten in der Luft sind dafür verantwortlich, dass Longitudinalwellen unter dem zweiten kritischen Winkel auf die Betonoberfläche auftreffen, obwohl der Einfallswinkel ungleich diesem Winkel ist.

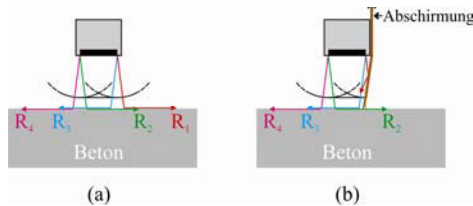


Abbildung 8.11 Rayleighwellenentstehung: Unter dem zweiten kritischen Winkel (hier $7,3^\circ$) entstehen an vier verschiedenen Stellen die Rayleighwellen R_1 , R_2 , R_3 und R_4 (a), die Entstehung der Rayleighwelle R_1 wird durch eine Schallabschirmung verhindert (b)

Betrachtet man, wie in Abbildung 8.11 (a) dargestellt, einen Sendeprüfkopf mit einem Einfallswinkel von 0° , so werden an der Grenzfläche Luft/Beton bei zweidimensionaler Betrachtung insgesamt vier Rayleighwellen an unterschiedlichen Stellen der Körperoberfläche erzeugt. Zwei davon laufen in die Richtung des Empfangsprüfkopfs und wirken deshalb störend auf das Empfangssignal. Die Erzeugung der Rayleighwelle, die dem Empfangsprüfkopf am nächsten liegt (hier R_1), könnte vielleicht durch konstruktive Maßnahmen verhindert werden. Dazu müsste die Abschirmung, wie in Abbildung 8.11 (b) zu sehen, entsprechend weit an das Schallbündel heran- bzw. hineingeführt werden, bis nur noch Schallanteile mit einem Winkel kleiner dem zweiten kritischen Winkel auf die Betonoberfläche treffen.

Die Erzeugung der anderen störenden Rayleighwelle (hier R_2) wird wahrscheinlich konstruktiv nicht zu verhindern sein, da sie recht weit in der Mitte des Schallbündels entsteht. Würde man versuchen durch eine zusätzliche Schallabschirmung auf der

anderen Seite des Schallbündels diese Rayleighwelle zu verhindern, so ergäben sich wahrscheinlich neue Probleme durch Reflexionen an der Schallabschirmung. Außerdem würde dadurch das Schallbündel stark eingeengt werden, wodurch sich nur eine schmale ebene Wellenfront ausbilden dürfte. Innere Reflexionen würden dann in geschwächter Form empfangen werden.

Weiterhin sollte darüber nachgedacht werden, welche spezielle Ausführung der Beugungskanten an den Abschirmungen optimal wäre. Denn von den Abschirmkanten gehen wiederum kreisförmige Wellenfronten ab, die ihrerseits Rayleighwellen auf der Betonoberfläche entstehen lassen. Inwieweit diese theoretischen Überlegungen praktische Relevanz haben, also zu einer Minimierung der Rayleighwelle führen, ist bisher nicht untersucht worden, da es doch einigen konstruktiven Aufwand erfordert.

Alle diskutierten konstruktiven Abschirmmaßnahmen gelten für den Empfangsprüfkopf genauso wie für den Sendeprüfkopf, da die Richtcharakteristik beider Prüfköpfe dieselbe ist.

Ebenfalls ist noch eine digitale Unterdrückung der Rayleighwelle viel versprechend, indem diese unter der Voraussetzung, dass der Luftweg immer konstant bleibt (wie z.B. durch ein Fahrgestell, das in Abschnitt 8.4.4 beschrieben wird) von jedem Empfangssignal abgezogen wird. Das zu subtrahierende Rayleighwellensignal (einschließlich der Kriechwelle) erhält man durch eine Messung an einer sehr dicken Platte des jeweiligen Materials, von der keine Reflexionen aus dem Inneren auftreten können. Die Kriechwelle wird günstigerweise durch diese Methode auch unterdrückt. Im optimalen Fall könnten dadurch alle auftretenden Rayleigh- und Kriechwellen herausgerechnet werden.

8.4.4 Laufwagen für Kalibrierung und Vorlaufzeit

In dieser Arbeit wurden die luftgekoppelten Ultraschallprüfköpfe ausschließlich entlang einer geraden Achse parallel zur Körperoberfläche bewegt. Durch schon kleine Unebenheiten der Körperoberfläche verändern sich ortsabhängig der Prüfkopfabstand zur Körperoberfläche und der Einfallswinkel und damit die vom jeweiligen Empfangssignal abzuziehende Gesamtvorlaufzeit und der Schallweg im Beton. Dieses Problem wurde bereits in Abschnitt 4.3.2.3 geschildert. Dort wurde deshalb ein weiterer Ansatz vorgestellt (siehe Abbildung 4.12), der eine Lösung des Problems bezwecken soll. Bei diesem Ansatz wird ein Laufwagen eingesetzt, in den die beiden Prüfköpfe eingehängt sind. Dadurch bleiben der Prüfkopfabstand und der Einfallswinkel zur Körperoberfläche für Unebenheiten bis zu einem bestimmten Maß an jedem Ort konstant. Das System ist zwar dadurch nicht mehr vollständig berührungslos, was für die zerstörungsfreie Prüfung im Bauwesen jedoch keinerlei Nachteile mit sich bringt. Es kann sowohl per Hand als auch automatisiert scannend eingesetzt werden.

8.4.5 Verbesserte Abschirmkonstruktion zur Luftschallunterdrückung

Die in Abschnitt 8.3 bereits verbesserte Schallabschirmkonstruktion war ganz wesentlich für den Erfolg der Messung verantwortlich, da erst durch diese der um die Abschirmungen herumlaufende Luftschall auf ein Minimum reduziert wurde. Wesentlich und notwendig ist, dass zumindest ein Teil der Abschirmkonstruktion in

Verbindung mit der Körperoberfläche steht. Es gibt prinzipiell zwei Ausführungsansätze: Entweder die Abschirmung wird über die Körperoberfläche geschleift oder sie wird gerollt. Da die Abschirmung an der Kontaktstelle zum Beton aufgrund der Rauigkeit der Betonoberfläche elastisch ausgeführt werden muss, werden bei der schleifenden Abschirmung erhebliche Abnutzungserscheinungen auftreten, weshalb sie wenig praxistauglich sein wird. Hinzu kommt, dass durch die Schleifbewegung bei schneller Fahrt zusätzliche, störend wirkende Wellen entstehen, die die Messung überlagern, was im Rahmen der Arbeit bereits beobachtet wurde. Besser und praktikabler erscheint der Vorschlag einer rollenden Abschirmung. Ein Beispiel dafür gibt der Aufbau in Abbildung 8.12.

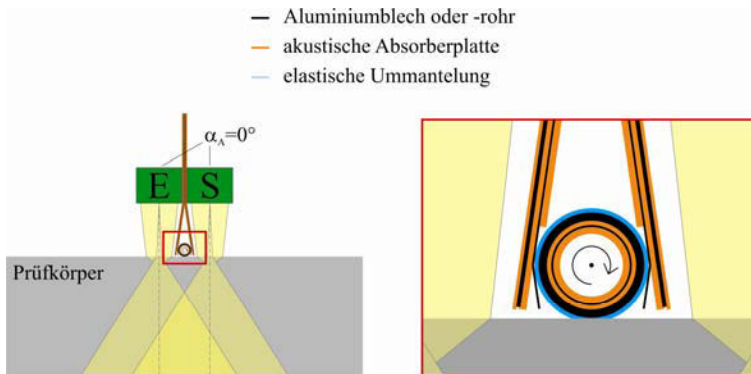


Abbildung 8.12

Ansatz für einen verbesserten Tandemaufbau mit rollender Abschirmkonstruktion zur Abschirmung der direkten Luftwellen; rechts vergrößerter Ausschnitt innerhalb des roten Rechtecks

8.4.6 Messzeit

Die Messzeit richtet sich im Wesentlichen nach der Pulswiederholfrequenz. Diese kann jedoch aufgrund von sogenannten „Spätheimkehrern“ (Signalanteile, die von einem vorhergehenden Schuss herrühren) nicht beliebig hoch eingestellt werden. Die maximale Grenze liegt hier bei ungefähr 20 Hz bis 80 Hz, also 20 bis 80 Messpunkte pro Sekunde. Die erzielte Messgeschwindigkeit in Abschnitt 8.3 kann demzufolge unter Umständen erhöht werden.

Durch die Verwendung mehrerer parallel laufender Tandems kann eine weitere Messzeitverkürzung erreicht werden. Die Messzeit verringert sich dann direkt proportional zur Anzahl der parallel eingesetzten Tandems. Die Tandems könnten z.B. in mehreren hintereinander liegenden Reihen angeordnet werden, die wiederum so zueinander versetzt sind, dass dadurch ein ausreichend enges Messraster quer zur Fahrtrichtung entsteht, so dass nur eine Überfahrt für die Breite einer Tandemreihe benötigt wird.

Man stelle sich z.B. leicht zueinander versetzte Reihen von 1,50 m Breite vor. Um nun eine Ortsauflösung senkrecht zur Fahrtrichtung von 2 cm zu erhalten, wären 75 Tandems also 150 Prüfköpfe erforderlich, die je nach Abstand zueinander über mehrere Reihen in einem Fahrgestell verteilt werden. Bei einer Ortsauflösung in

Fahrtrichtung von ebenfalls 2 cm und einer Pulswiederholffrequenz von 20 Hz würde sich eine Messgeschwindigkeit von $0,4 \text{ m/s} = 1,44 \text{ km/h}$ über eine Breite von 1,5 m ergeben. Bei einer Pulswiederholffrequenz von 80 Hz würde man sogar $1,6 \text{ m/s} = 5,76 \text{ km/h}$ schnell sein. Dies entspricht Schrittgeschwindigkeit und ist verglichen mit derzeitigen Ultraschallmessungen an Beton bezüglich der Messgeschwindigkeit um mehrere Größenordnungen schneller.

Allerdings würde solch ein System auch einen recht großen finanziellen Aufwand bedeuten. Bei einem Preis von ca. 3500 € pro Prüfkopf würde sich allein für die 150 Prüfköpfe eine Gesamtsumme von 525.000 € ergeben. Weiterhin muss die Signalverstärkung und Datenerfassung aller 75 Tandems parallel, d.h. unabhängig von einander stattfinden. Schätzungsweise dürfte der Preis für solch ein System in der Größenordnung von 1.000.000 € liegen. Man sollte jedoch bedenken, dass vor allem im ZfP-Bereich für Beton die Systemkomponenten aufgrund der noch geringen Nachfrage keine Serienprodukte sind und darin der hohe Preis begründet liegt. Die Herstellungskosten könnten demnach noch gesenkt werden, wenn der Absatzmarkt dafür vorhanden wäre.

Bei Fahrbahnuntersuchungen könnte das System unter Umständen auch bei fließendem Verkehr funktionieren. Dazu müssten jedoch auf jeden Fall die Luftturbulenzen des vorbeifahrenden Verkehrs von den Prüfköpfen ferngehalten werden, da im Rahmen der Arbeit beobachtet wurde, dass Windstöße das Signal stören. Dies sollte jedoch durch spezielle Trennwände leicht zu bewerkstelligen sein.

Die größte Schwierigkeit dürfte das akustische Trennen der einzelnen Tandems sein, das eine enge Anordnung der Tandems verhindert. Innerhalb des interessierenden Zeitfensters dürfen an dem Empfangsprüfkopf eines Tandems keine Signale auftreten, die von anderen Tandemsendeprüfköpfen herrühren.

Zugunsten der Fahrgeschwindigkeit kann der Messpunktabstand noch weiter vergrößert werden. Jedoch wird dadurch die Ortsauflösung immer geringer und für die Rekonstruktion stehen entsprechend weniger Signale zur synthetischen Fokussierung zur Verfügung, worunter deren Qualität leidet.

9 Zusammenfassung

Einleitung

Das Ultraschallecho-Verfahren ist für viele praxisrelevante Prüfaufgaben im Bauwesen das geeignetste Mittel für die zerstörungsfreie Prüfung von Betonbauteilen – z.B. zur Detektion von Betonablösungen oder zur Dickenbestimmung an stark bewehrten Betonplatten.

In den letzten Jahren konnte durch die Automatisierung dieses Verfahrens eine deutliche Erhöhung der Messgeschwindigkeit auf $0,6 \text{ m}^2/\text{h}$ /Prüfkopf bei einem Messpunktraaster von $2 \text{ cm} \times 2 \text{ cm}$ erreicht werden. Aufgrund der bisher notwendigen Ankopplung der Ultraschallprüfköpfe an die Bauteiloberfläche ist eine weitere wesentliche Steigerung der Messgeschwindigkeit mit derartigen Prüfköpfen unwahrscheinlich.

Neuartige luftgekoppelte Ultraschallprüfköpfe im Frequenzbereich um 85 kHz bieten den Vorteil automatisiert scannend und berührungslos über eine Messfläche bewegt zu werden, was zu einer 50- bis 200-fach höheren Messgeschwindigkeit führt.

Während für diese Prüfköpfe die Transmissionsanordnung ohne Probleme adaptiert werden kann, treten bei den für die Praxis wesentlich relevanteren Echoanordnungen zusätzliche Schwierigkeiten auf, die eine Anwendung des Verfahrens bisher verhinderten.

Ziel

Ziel der vorliegenden Arbeit war die systematische Untersuchung des luftgekoppelten Ultraschallecho-Verfahrens für Betonbauteile. Es sollte geklärt werden, ob dieses Verfahren für Beton adaptiert werden kann.

Es galt die prinzipielle Machbarkeit des Verfahrens für einfache Dickenmessungen an Betonplatten von ca. 20 cm Dicke im Labor nachzuweisen sowie gegebenenfalls weitere mögliche Prüfaufgaben, wie z.B. die Detektion von Hohlräumen aufzuzeigen. Als Lösungsansatz wurde die Tandemanordnung gewählt, bei der Sender und Empfänger physikalisch voneinander getrennt sind. Die genaue Ausrichtung und Positionierung von Sender und Empfänger zueinander und zum Messkörper sollte für eine erfolgreiche Dickenmessung ermittelt werden. Bezüglich der Minimierung störender Wellen galt es zudem einen geeigneten Tandemaufbau zu konstruieren.

Voruntersuchungen an einer Plexiglasplatte mit ACU-Sendeprüfkopf und Laservibrometer als Empfänger

Da das Empfangssignal in Tandemanordnung eine Reihe von interferierenden Wellenarten beinhalten kann, ist eine Wellenartzuordnung und damit eine Laufzeitbestimmung nur bei Kenntnis der Wellenausbreitung gegeben. Deshalb wurde zunächst die Wellenausbreitung in Abhängigkeit des Einfallswinkels des 85 kHz ACU-Sendeprüfkopfes über bistatische Messungen an einer 103 mm dicken Plexiglasplatte visualisiert. Auf der Empfangsseite kam ein scannendes Laservibrometer zum Einsatz. Durch die homogenen isotropen Eigenschaften des Plexiglases wurde die erschwerende Inhomogenität von Beton vernachlässigt.

Das Problem des Übersprechens des Luftschalls vom Sender zum Empfänger wurde durch eine zwischen den Prüfköpfen positionierte Schallabschirmung aus drei durch Luftschichten getrennte Aluminiumbleche von 1 mm Dicke gelöst. Sie bewirkt eine

Laufwegverlängerung und verschiebt dadurch die direkte Luftschallanzeige zu einem späteren Zeitpunkt als die Nutzsignalanzeigen.

Da die auftretenden Wellen teilweise stark miteinander interferierten, gestaltete sich die eindeutige Zuordnung der Wellenanzeigen zu den Wellenarten ohne Vorkenntnisse als sehr schwierig. Zu diesem Zweck wurden im Rahmen der Arbeit zwei sehr effektive digitale Bearbeitungswerkzeuge implementiert, die bei allen weiteren bistatischen Messungen ebenfalls angewendet wurden. Bei dem ersten Bearbeitungsschritt wurden die Rayleighwelle R und die Luftwelle A in den B-Bildern digital unterdrückt, um die reinen Rückwandechoanzeigen ohne Interferenz zu erhalten. Im zweiten Schritt wurden Geschwindigkeitsspektren nach der Common-Midpoint-Methode berechnet, mit denen die Wellenartzuordnung über die jeweilige Geschwindigkeit einer Wellenart gelang.

Je nach Einfallswinkel des Senders α_{AS} traten unterschiedliche Reflexionen an der Rückwand auf:

- Longitudinalwellen-Rückwandecho (bei $\alpha_{AS} \leq 4^\circ$)
- Transversalwellen-Rückwandecho (hauptsächlich kurz oberhalb des 1. kritischen Winkels von $7,6^\circ$ in einem Einfallswinkelbereich von $7,3^\circ$ bis 13°)
- Rückwandechos mit Modenkonversion an der Rückwand ($2^\circ \leq \alpha_{AS} \leq 7,3^\circ$)
- Vielfachechos

Weiterhin entstanden Oberflächenwellen, wie die Rayleigh- und die Kriechwelle, sowie die um die Schallabschirmung herumlaufende Luftschallwelle. Deutlich wurde auch, dass eine Dickenmessung mit dem Laservibrometer aufgrund von Interferenzen der Rückwandechos mit der Luft- bzw. der Rayleighwelle kaum möglich ist.

Alle Wellenarten ließen sich durch das einfallende Schallbündel und das Brechungsgesetz erklären.

Voruntersuchungen an einer Plexiglasplatte mit ACU-Prüfköpfen

Manuelle Messungen mit ausschließlich ACU-Prüfköpfen unter einem Einfallswinkel von 9° an derselben Plexiglasplatte zeigten im Vergleich zu den Messungen mit dem Laservibrometer ein wesentlich größeres Signal-zu-Rausch-Verhältnis aufgrund der höheren Empfindlichkeit der ACU-Prüfköpfe. Zudem erwies sich der schmale Öffnungswinkel des Schallbündels vom Sende- und Empfangsprüfkopf im Material als wesentlich. Dadurch wurde überwiegend das Transversalwellen-Rückwandecho empfangen. Alle anderen Wellenanzeigen traten nur schwach auf. Eine Dickenbestimmung ist so ohne Probleme durchführbar.

Die Abschirmkonstruktion für zwei ACU-Prüfköpfe in der Echoanordnung benötigt zwei getrennte Abschirmungen, die jeweils aus zwei Aluminiumblechen bestehen.

Prüfkopfabstand zur Körperoberfläche

Der Einfluss des Prüfkopfabstandes zum Körper erweist sich für die hier verwendeten Prüfköpfe aufgrund der niedrigen Frequenz als sehr gering. Für eine möglichst große Rückwandechoamplitude sollte der Prüfkopfabstand zur Körperoberfläche minimiert werden, solange die Betondicke größer als 23 mm ist.

Nachweis von Rückwandechos in Betonbauteilen mit luftgekoppeltem Ultraschall

Aufbauend auf den Erkenntnissen der Voruntersuchungen an der Plexiglasplatte gelang der Nachweis von Rückwandreflexionen an einer 210 mm dicken Betonplatte und dicker. Es treten dieselben Wellenarten und Strukturen auf. Da der Brechungsindex bei Luft/Beton kleiner und deshalb ungünstiger ist als bei Luft/Plexiglas, sind die kritischen Winkel kleiner und mehr Wellenarten treten gleichzeitig auf. Dadurch verschlechtert sich das Verhältnis von Rückwandecho- zur Rayleighwellenamplitude derart, dass das Transversalwellen-Rückwandecho von der Rayleighwelle überlagert wird und nur durch Interferenzmuster erahnbar ist. Das Transversalwellen-Rückwandecho erweist sich deshalb als nicht geeignet.

Das Auftreten der Rückwandechos wurde mittels EFIT-Modellierungen von Dr.-Ing. Frank Schubert vom Fraunhofer IZFP-Dresden im Rahmen der DFG-Forschergruppe FOR384 sowie durch zwei weitere Messungen an einem Probekörper mit Nutzen bestätigt.

Visualisierung der Wellenausbreitung in Beton

Zum Verständnis und zur Veranschaulichung der Wellenausbreitung von luftgekoppeltem Ultraschall in Beton wurden mit Hilfe eines Laservibrometers spezielle Visualisierungsmessungen durchgeführt. Sie zeigen die starke Brechung von luftgekoppeltem Ultraschall an der Grenzfläche Luft/Beton und Rückwandreflexionen.

Automatisierte Messungen

Die gewonnenen Erkenntnisse wurden in den Bau eines Scannersystems eingebracht. Dabei wurde ein bestehender Scanner der BAM um eine Prüfkopfhalterung mit verstellbaren Freiheitsgraden erweitert, um eine genaue Parameterstudie mit der bistatischen Prüfkopfanzordnung durchzuführen.

Die Parameter für die bestmögliche Konfiguration eines Tandems wurden für und an einer 200 mm dicken Betonplatte mit 16 mm Größtkorn bestimmt. Das Longitudinalwellen-Rückwandecho bei einem Einfallswinkel von $0,5^\circ$ und einem Abstand des Schalleintritts- zum Schallaustrittspunkt auf der Grenzfläche Luft/Beton von ~ 128 mm erwies sich als optimale Konfiguration. Die Rayleighwelle ist bei diesem Einfallswinkel nur schwach ausgeprägt.

Die Schallabschirmkonstruktion konnte durch ein zwischen den Schallabschirmungen auf der Betonoberfläche mitschleifendes Mauspad soweit verbessert werden, dass der an den Abschirmkanten gebeugte und an der Grenzfläche Luft/Beton reflektierte Luftschall durch diese zusätzliche Trennschicht auf ein Minimum reduziert und ein Messen des reinen Longitudinalwellen-Rückwandechos verwirklicht wurde.

Als erste Demonstration der Leistungsfähigkeit wurde mit dieser Konfiguration dieselbe Platte flächig und automatisiert abgescannt. Ohne zeitliche Mittelung der Signale konnte die Rückwandechoanzeige eindeutig identifiziert werden. Die in der Platte eingebrachte innenliegende geneigte Längsbohrung mit einem Durchmesser von 58 mm zeigte sich in einer starken Rückwandabschattung.

Mit Hilfe einer 3D-SAFT-Rekonstruktion konnte die Ergebnisqualität noch verbessert werden. Direkte Reflexionen an der Längsbohrung wurden sichtbar. Eine Tiefenbestimmung der Bohrung war jedoch nicht möglich.

Konzepte zur Verbesserung des Systems

Eine Reihe vielversprechender Vorschläge zur Verbesserung des Systems wurden vorgestellt.

Ausblick

Letztendlich überzeugen die in Abschnitt 8.3 durchgeführten automatisierten Messungen durch ihr ausgesprochen gutes Nutz-zu-Störsignal-Verhältnis der Rückwandechoanzeige, ohne eine zeitliche Mittelung verwendet zu haben. Hinzu kommt das hohe Verbesserungspotenzial des Verfahrens. Eine ganze Reihe von Möglichkeiten wurde im Abschnitt 8.4 genannt, um die Leistungsfähigkeit zu erhöhen. Der Autor ist davon überzeugt, dass bei konsequenter Weiterentwicklung des Verfahrens die zerstörungsfreie Prüfung, speziell im Bauwesen, aber auch in anderen Bereichen einen enormen Aufschwung erfahren wird. Das Ziel, ganze Fahrbahnabschnitte von 1 km Länge innerhalb eines Tages mit Ultraschall untersuchen zu können, rückt in greifbare Nähe. Prüfungen könnten dann in einem zeitlich vertretbaren Rahmen unter Umständen sogar ohne merkbare Beeinflussung des Verkehrs durchgeführt werden.

Trotz der hohen Erwartung an luftgekoppelten Ultraschall wird dieser dennoch nie den Ultraschall mit Ankopplung ersetzen können. Gewisse Randbedingungen müssen erfüllt sein. So sind z.B. wegen des hohen Brechungsindex der Grenzfläche Luft/Beton und der Anfälligkeit des Systems bei Änderungen der Luftwegstrecke dem Verfahren bezüglich der Beschaffenheit der Körperoberfläche Grenzen gesetzt. Diese und andere Parameter gilt es nach der Entwicklung eines optimierten Scanneraufbaus im Rahmen einer Validierung für ausgewählte Prüfaufgaben zu validieren.

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand an der Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung (BAM) in Berlin unter der wissenschaftlichen Betreuung von Herrn Dr. rer. nat. Martin Krause. Ihm danke ich für die Anregung des Dissertationsthemas, der intensiven und konstruktiven Unterstützung sowie für seine persönliche Aufgeschlossenheit.

Weiterhin bedanke ich mich für die Betreuung bei Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Bernd Hillemeier von der Technischen Universität Berlin und Prof. u. Dir. Dr. rer. nat. Herbert Wiggenhauser von der BAM.

Herrn Univ.-Prof. Dr. sc. techn. Mike Schlaich von der Technischen Universität Berlin danke ich für die Übernahme des Promotionsvorsitzes.

Bei den Mitgliedern der durch die Deutsche Forschungsgesellschaft (DFG) geförderten Forschergruppe FOR 384 bedanke ich mich für die produktive Zusammenarbeit. Hier möchte ich mich vor allem bei Herrn Dr.-Ing. Frank Schubert vom Fraunhofer IZFP-Dresden für die rechenintensiven Modellierungen bedanken.

Bei der Konstruktion der Prüfkopfhalterung für den Scanner stand mir Herr Dipl.-Ing. Dieter Schaurich dankenswerterweise stets mit Rat zur Seite.

Der BAM eigenen Werkstatt danke ich für die unkomplizierte und schnelle Herstellung der konstruierten Prüfkopfhalterung.

Meinen Kolleginnen und Kollegen danke ich für die kollegiale und konstruktive Zusammenarbeit sowie die gute Arbeitsatmosphäre.

Bei dem Ingenieurbüro Dr. Hillger bedanke ich mich für die freundliche Unterstützung und die wissenschaftlichen und konstruktiven Diskussionen, im Besonderen Herrn Dr.-Ing. Lutz Bühling.

Letztendlich möchte ich mich noch bei meinen Eltern Waltraud und Dipl.-Kfm. Peter Gräfe sowie meiner Freundin Antje Thiele für Ihre liebevolle und tatkräftige Unterstützung, das Ermöglichen meiner Arbeit, sowie der aufgebrauchten Geduld und Ausdauer bedanken.

Abkürzungen

Abkürzung	Bedeutung
A-Bild	Zeitsignal $A(t)$ an der Stelle x/y
ACU	air-coupled ultrasound (luftgekoppelter Ultraschall)
BAM	Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung
B-Bild	Profilschnitt ($x-t$) entlang der Scanachse x an der Stelle y
CFRP	Carbon Fibre Reinforced Polymer (kohlenstofffaserverstärktes Polymer)
C-Bild	Tiefenschnitt ($x-y$) zur Zeit t (t entspr. einer Tiefe)
CMP	Common-Midpoint
D-Bild	Profilschnitt ($y-t$) entlang der Indexachse y an der Stelle x
DFG	Deutsche Forschungsgemeinschaft
DIN	Deutsche Industrie-Norm
EFIT	Elastodynamische Finite Integrationstechnik
EMAT	electromagnetic acoustic transducer (elektromagnetischer Akustikprüfkopf)
ENV	Europäische Vornorm
FFT	Fast-Fourier-Transformation
FhG	Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V.
FOR	Forscherguppe
GUM	Guide to the expression of uncertainty in measurement (Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen)
ISO	International Organization for Standardization
IZFP	Fraunhofer-Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren
LVIB	Laservibrometer
NCU	non-contact ultrasound (berührungsloser Ultraschall; entspr. ACU)
NMO	normal moveout
RC3	„raised cosine“ (ansteigender Kosinus) mit drei Perioden Länge
RLB	Richtlinienband
SAFT	Synthetic Aperture Focusing Technique (Synthetische Apertur Fokus Technik)
VI	virtual instrument (virtuelles Instrument)
VPP	Volt von Peakminimum zu Peakmaximum
ZfP	Zerstörungsfreie Prüfung

Mathematische Symbole

Symbol	Erklärung	Seite
A	Amplitude	6
B	Fokusbildmesser	38
c	Schallgeschwindigkeit	7
d	Dicke	46
dB	Dezibel	6
E	dynamischer Elastizitätsmodul	8
E	Einhüllende über Hilbert-Transformierte	54
f	Frequenz	7
G	Schubmodul	8
H	Hilbert-Transformierte	54
J	Intensität (Schalleistungsdichte)	6
k	Wellenzahl	7
p	Schalldruck (hier ausschließlich Schallwechseldruck)	6
R	Reflexionsfaktor	8
r	Radius; Ausbreitungsrichtung	7
T	Periodendauer	7
T	Transmissionsfaktor	8
t	Laufzeit	14
t ₀	Laufzeit bei einer CMP-Messung bei der x = 0 ist	18
Δt_{sample}	Zeitschrittweite	104
U	Spannung	6
u	Teilchenauslenkung	7
v	Teilchengeschwindigkeit (Schnelle)	7
x	Abstand vom Schalleintritts- zum Schallaustrittspunkt bei der CMP-Methode und der bistatischen Prüfkopfanzordnung	18
x	Laufweg	45
x _{Eintritt/Austritt}	Abstand vom Schalleintritts- zum Schallaustrittspunkt bei der Tandemananzordnung	109
x, y, z	Achsen eines dreidimensionalen orthogonalen Koordinatensystems	36
Z	akustische Impedanz (Schallwellenwiderstand)	6

Griechische Zeichen	Erklärung	Seite
α	Winkel einer ebenen Welle oder eines Schallstrahls zum Lot einer Grenzfläche	9
Δ	Präfix: Differenz; Fehler	46
ϵ_r	relative Dielektrizitätszahl	32
γ	Öffnungswinkel des Schallbündels	16
ϑ	Temperatur	8
λ	Wellenlänge	7
μ	Poisson-Zahl (Querkontraktionszahl)	8
ρ	Dichte	8

Indizes	Erklärung	Seite
1	Medium 1	8
1.LL	1. Longitudinalwellenecho in einem Festkörper	11
2	Medium 2	8
2.LL	2. Longitudinalwellenecho in einem Festkörper	11
I und II	zwei beliebige Wellen, die in einem Reflexions- oder Brechungsvorgang zusammenhängen	9
A	Luftwelle (Longitudinalwelle in Luft); Medium Luft (air)	43
direkt	direkte Vorlaufzeitbestimmung	47
E	Empfängerprüfkopf	52
e	einfallende Welle	9
H	Kopfwelle (engl.: head wave)	10
i	Messposition	52
indirekt	indirekte Vorlaufzeitbestimmung	47
J	Intensität	8
K	(Longitudinal-)Kriechwelle (engl.: subsurface wave)	10
L	Longitudinalwelle	6
LT	die aus der Longitudinalwelle modenkonvertierte Transversalwelle in einem Festkörper	11
LT \wedge TL	LT und/oder TL	68
mono	monostatische Prüfkopfanzordnung	48
p	Schalldruck	8
R	Rayleighwelle	7
r	reflektierte Welle	9
S	Sendeprüfkopf	52
T	Transversalwelle	6
t	transmitierte Welle	9
TL	die aus der Transversalwelle modenkonvertierte Longitudinalwelle in einem Festkörper	11
Vorlauf,ges	Gesamtvorlauf	45
Vorlauf,ohne _Luft	Vorlauf ohne Luftschicht	48
\perp	senkrecht	16
\wedge	und/oder	68

Literaturverzeichnis

- [1] Arone, M., Cerniglia, D., Nigrelli, V. (2006), „Defect characterization in Al welded joints by non-contact Lamb wave technique“, in: *Journal of Materials Processing Technology* 176, Elsevier, S. 95-101
- [2] Baldwin, K. C., Berndt, T. P., Ehrlich, M. J. (1999), „Narrowband laser generation/air-coupled detection: ultrasonic system for on-line process control of composites“, in: *Ultrasonics* 37, Elsevier, S. 329-334
- [3] Ballard, E. M., Vezirov, S. Yu., Pfeleiderer, K., Solodov, I. Yu., Busse, G. (2004), „Nonlinear modulation technique for NDE with air-coupled ultrasound“, in: *Ultrasonics* 42, Elsevier, S. 1031-1036
- [4] Bhardwaj, M. C. (1997-1999), „Ultrasonic Transducer for High Transduction in Gases and Method for Ultrasound Non-Contact Transmission into Solid Materials,” U.S. and international patents pending and in process
- [5] Bhardwaj, M. C. (2001), „United States Patent 6311573 – Ultrasonic transducer for high transduction in gases and method for non-contact ultrasound transmission into solid materials”, US Patent issued on Nov. 6, 2001
- [6] Bhardwaj, M. C. (2002), „Non-Contact Ultrasound: The Final Frontier in Non-destructive Analysis”, Publications #SW302, Firma „SecondWave Systems”, www.secondwavesystems.com
- [7] Bhardwaj, M. C. (2004), „Evolution of Piezoelectric Transducers to full Scale Non-Contact Ultrasonic Analysis Mode,” Proc. WCNDT, 2004, Montreal, Canada
- [8] Blum, F., Jarzynski, J., Jacobs, L. J. (2005), „A focused two-dimensional air-coupled ultrasonic array for non-contact generation“, in: *NDT&E International* 38, Elsevier, S. 634-642
- [9] Borum, K. K. (2006), „Evaluation of the Quality of Thick Fibre Composites Using Immersion and Air-Coupled Ultrasonic Techniques”, in: DGZfP-Proceedings BB 103-CD, 9th European Conference on NDT, Berlin, Germany, 25.-29.09.2006
- [10] Bovtun, V., Döring, J., Bartusch, J., Beck, U., Erhard, A., Yakymenko, Y. (2006), „EMFIT Ferroelectret Film Transducers for Non-Contact Ultrasonic Testing“, in: DGZfP-Proceedings BB 103-CD, 9th European Conference on NDT, Berlin, Germany, 25.-29.09.2006
- [11] Briggs, A. (1992), „Acoustic Microscopy“, New York, Oxford University Press, ISBN 0-19-851377-1
- [12] Bühling, L., Hillger, W., Ilse, D. (2005), „Modulare Ultraschallprüfsysteme für Forschung, Entwicklung und Qualitätssicherung“, Vortrag 1, DGZfP-Berichtsband 94-CD, DGZfP-Jahrestagung 2005, 2.-4. Mai, Rostock
- [13] Castaings, M., Hosten, B. (2001), „Lamb and SH waves generated and detected by ACU transducers in composite material plates”, in: *NDT&E international* 34, Elsevier, S. 249-258

- [14] Cremer, L., Heckl, M. (1996), „Körperschall: physikalische Grundlagen und technische Anwendungen“, 2. neu bearb. Aufl., Berlin, Heidelberg, New York, Springer Verlag, ISBN 3-540-54631-6
- [15] DGZfP (2001), „Merkblatt über das Radarverfahren zur Zerstörungsfreien Prüfung im Bauwesen (B10)“, Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V., Berlin
- [16] DIN 1048-2 (1991-06), „Prüfverfahren für Beton – Festbeton in Bauwerken und Bauteilen“
- [17] DIN 1048-4 (1991-06), „Prüfverfahren für Beton – Bestimmung der Druckfestigkeit von Festbeton in Bauwerken und Bauteilen; Anwendung von Bezugsgeraden und Auswertung mit besonderen Verfahren“
- [18] DIN EN 12504-2:2001 (2001-12), „Prüfung von Beton in Bauwerken – Zerstörungsfreie Prüfung, Bestimmung der Rückprallzahl“, Deutsche Fassung
- [19] DIN V, ENV 13005 (1999-05), „Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen“, Deutsche Fassung, ICS 17.020, CEN
- [20] Döring, D., Pfeleiderer, K., Solodov, I., Busse, G. (2006), „Automated NDT of Stiffness Anisotropy with Air-Coupled Ultrasound“, in: DGZfP-Proceedings BB 103-CD, 9th European Conference on NDT, Berlin, Germany, 25.-29.09.2006
- [21] Erfurt, W. (2002), „Erfassung von Gefügeveränderungen in Beton durch Anwendung zerstörungsfreier Prüfverfahren zur Einschätzung der Dauerhaftigkeit“, Dissertation, Bauhaus-Universität Weimar, URN: **urn:nbn:de:gbv:wim2-20040311-664**
- [22] Ernst, H. (2004), „Experimentelle Verifizierung von Modellvorstellungen zur Schallausbreitung in anisotropen Materialien“, Dissertation, TU Freiberg
- [23] Fellingner, P. (1990), „Ein Verfahren zur numerischen Lösung elastischer Wellenausbreitungsprobleme im Zeitbereich durch direkte Diskretisierung der elastodynamischen Grundgleichung“, Dissertation, Theoretische Elektrotechnik, Universität Gh Kassel, Kassel
- [24] Fritzsche, M. (2001), „Anwendung von Verfahren der Mustererkennung zur Detektion von Landminen mit Georadaren“, Dissertation, Band 30, Forschungsberichte aus dem Institut für Höchstfrequenztechnik und Elektronik der Universität Karlsruhe (TH), Hrsg. Wiesbeck, W.
- [25] Galan, A. (1990), „Combined Ultrasound Methods of Concrete Testing“, Developments in Civil Engineering 34, Elsevier, Amsterdam-Oxford-New York-Tokyo
- [26] Gan, T. H., Hutchins, D. A., Billson, D. R., Schindel, D. W. (2001), „The use of broadband acoustic transducers and pulse-compression techniques for air-coupled ultrasonic imaging“, in: Ultrasonics 39, Elsevier, S. 181-194
- [27] Gebhardt, W. (1999) „Einsatz von luftgekoppelten Ultraschall-Leistungswandlern in der ZfP“, in: DGZfP-Jahrestagung, Celle, 9.-13.6.1999, Berichtsband 68.1, Berlin, S. 55-62

- [28] Gebhardt, W., Spies, M., Arnold, W. (2002), „Air coupled ultrasonic transducers. Design and application.“, in: Acoustical Imaging, 26th International Symposium on Acoustical Imaging, 9.-12.9.2001, ISBN 0-306-47340-2
- [29] Gélébart, Y., Duflo, H., Duclos, J. (2007), „Air coupled Lamb waves evaluation of the long-term thermo-oxidative ageing of carbon-epoxy plates“, in: NDT&E International 40, Elsevier, S. 29-34
- [30] Gräfe, B., Krause, M. (2006), „Basic investigation with air-coupled ultrasonic echo for concrete elements“, in: NDE Conference on Civil Engineering, August 14–18, 2006, St. Louis, Missouri, ISBN 1-57117-148-7
- [31] Green Jr., R. E. (2004), „Non-contact ultrasonic techniques“, in: Ultrasonics 42, Elsevier, S. 9-16
- [32] Gunatilaka, A. H., Baertlein, B. A. (2000), „A subspace decomposition technique to improve GPR imaging of anti-personnel mines“, Proceedings of SPIE, Conf. Detection and Remediation Technologies for Mines and Minelike Targets V, Vol. 4038, Orlando (FI)
- [33] Hasenstab, A. (2006), „Integritätsprüfung von Holz mit dem zerstörungsfreien Ultraschallechoverfahren“, Dissertation, TU-Berlin, D83
- [34] Hässelbarth, W. (2004-03-11), „BAM-Leitfaden zur Ermittlung von Messunsicherheiten bei quantitativen Prüfergebnissen“, 1. Fassung, Ausschuss für Qualitätsmanagement (AQM) der BAM
- [35] Haufler, F. (2000), „Luftgekoppelter Ultraschall – Grundlagen der Anwendung bei Beton“, Diplomarbeit, Universität Stuttgart
- [36] Hillemeier, B., Arndt, R., Maierhofer, C., Rieck, C., Röllig, M., Scheel, H., Walther, A. (2004), „Zerstörungsfreie Ortung von Fehlstellen und Inhomogenitäten in Bauteilen mit der Impuls-Thermografie“, in: Bautechnik, Ernst & Sohn, ISBN/ISSN 0932-8351
- [37] Hillemeier, B., Scheel, H. (2002), „Non-Destructive Location of Prestressing Steel Fractures in Post-Tensioned and Prestressed Concrete“, in: Transportation Research Board (TRB), Committee A2C03 – Concrete Bridges 16.01.2002, Washington D.C., USA
- [38] Hillger, W., Bühling L., Ilse D. (2004), „USPC 4000 AirTech – ein neues, bildgebendes Ultraschallprüfsystem für Ankopplung über Luft“, DGZIP DACH – Jahrestagung 2004 Salzburg, 17.–19. Mai 2004, Berichtsband 89-CD
- [39] Holst, R., Streicher, D., Gardei, A., Kohl, Ch., Wöstmann, J., Wiggerhauser, H. (2006), „Scannende Verfahren der zerstörungsfreien Prüfung für Brückenbauwerke“, Berichte der BAST, Brücken- und Ingenieurbau, Heft B48, Bremerhaven, Wirtschaftsverlag NW, ISBN 3-86509-424-7
- [40] Hutchins, D. A., Robertson, T. J., Billson, D. R., Solanki, P. (2003), „A conical air-coupled capacitance transducer for surface imaging“, in: Ultrasonics 41, Elsevier, S. 163-173
- [41] Jones, J. P., Lee, D., Bhardwaj, M., Vanderkam, V., Achauer, B. (1997), „Non-Contact Ultrasonic Imaging for the Evaluation of Burn-Depth and for Other Biomedical Applications“, Acoust. Imaging, V. 23

- [42] Kazys, R., Demcenko, A., Mazeika, L., Sliteris, R., Zukauskas, E. (2006), „Ultrasonic Air-Coupled Non-Destructive Testing of Aerospace Components“, in: DGZfP-Proceedings BB 103-CD, 9th European Conference on NDT, Berlin, Germany, 25.-29.09.2006
- [43] Kažys, R., Demčenko, A., Žukauskas, E., Mažeika, L. (2006), „Air-coupled ultrasonic investigation of multi-layered composite materials“, in: Ultrasonics 44, Elsevier, S. e819-e822
- [44] Khul, W., Schodder, G. R., Schröder, F. K. (1954), „Condenser transmitters and microphones with solid dielectric for airborne ultrasonics“, in: Acustica 4, S. 519-532
- [45] Kostka, J. (2000), „Simulation und Inversion der Ausbreitung elastischer Wellen“, Aachen, Shaker, ISBN 3-8265-7698-5
- [46] Kohl, C., Krause, M., Maierhofer, C., Wöstmann, J. (2005), „2D- and 3D-visualisation of NDT-data using data fusion technique“, in: Materials and Structures 38, RILEM
- [47] Köhler, B., Schubert, F. (1996), „Scan-Technik zur Schallfeldvermessung an Festkörpern“, In: Materialprüfung 38 (1996) 7-8, München, Carl Hanser Verlag, S. 298-301
- [48] Köhler, B., Schurig, C. (1995), „Visualization of ultrasonic fields on solids“, Konferenz-Einzelbericht: Ultrasonics World Congress 1995, Seite 459-462, Duisburg: Ges. f. angewandte Ultraschallforschung (GEFAU)
- [49] Krause, M., Bärnmann, M. et al. (1997), „Comparison of pulse-echo methods for testing concrete“, in: NDT&E International, Vol. 30, No. 4, Great Britain, Elsevier, S. 195-204
- [50] Krause, M., Mielentz, F., Milmann, B., Mayer, K. (2007), „Objektabbildung mit scannenden Ultraschallecho-Verfahren“, in: „BetonKalender 1: Verkehrsbauten – Flächentragwerke“, Bergmeister, K. (Hrsg.), Wörner, J.-D. (Hrsg.), Berlin, Ernst & Sohn, S. 543-555, ISBN 978-3-433-01833-0
- [51] Krause, M., Schickert, G., Wiggenhauser, H., Wilsch, G., Wüstenberg, H. (1992), „Ultraschall-Impulsecho zur zerstörungsfreien Prüfung an Bauteilen aus Beton“, DGZfP-Jahrestagung, Zerstörungsfreie Materialprüfung, 27.-29. April in Fulda, Berichtsband 33 Teil 1, Vortrag 24, S. 214-221
- [52] Krautkrämer, J. and H. (1986), „Werkstoffprüfung mit Ultraschall“, 5. Aufl., Berlin, Heidelberg, New York, London, Paris, Tokyo, Springer, ISBN 3-540-15754-9 bzw. 0-387-15754-9
- [53] Kunkle, J., Vun, R., Eischeild, T., Langron, M., Bhardwaj, N., Bhardwaj, M. (2006), „Phenomenal Advancements in Transducers and Piezoelectric Composites for Non-Contact Ultrasound and Other Applications“, in: DGZfP-Proceedings BB 103-CD, 9th European Conference on NDT, Berlin, Germany, 25.-29.09.2006
- [54] Kurz, J. H., Grosse, C. U., Reinhardt, H.-W. (2005), „Strategies for reliable automatic onset time picking of acoustic emissions and of ultrasound signals in concrete“, in: Ultrasonics 43 (7), Elsevier, S. 538-546

- [55] Langenberg, K. J., Mayer, K., Marklein, R. (2007), „Zerstörungsfreie Prüfung von Beton: Modellierung und Abbildung“, in: „BetonKalender 1: Verkehrsbauten – Flächentragwerke“, Bergmeister, K. (Hrsg.), Wörner, J.-D. (Hrsg.), Berlin, Ernst & Sohn, S. 518-536, ISBN 978-3-433-01833-0
- [56] Luukkala, M., Heikkilä, P., Surakka, J. (1971), „Plate wave resonance - contactless test method“, in: Ultrasonics 9, S. 201-208
- [57] Maierhofer, C., Wöstmann, J., Kohl, C. (2007), „Verfahrenskombination mit Radar und Ultraschall – 3-D-Darstellung und Datafusion“, in: „BetonKalender 1: Verkehrsbauten – Flächentragwerke“, Bergmeister, K. (Hrsg.), Wörner, J.-D. (Hrsg.), Berlin, Ernst & Sohn, S. 555-562, ISBN 978-3-433-01833-0
- [58] Marklein, R. (1997), „Numerische Verfahren zur Modellierung von akustischen, elektromagnetischen, elastischen und piezoelektrischen Wellenausbreitungsproblemen im Zeitbereich basierend auf der Finiten Integrationstechnik“, Aachen, Shaker, ISBN 3-8265-3172-8
- [59] Mielentz, F. (2006), „Einsatzpotenzial von laufzeitgesteuerten Ultraschall-Gruppenstrahlern an Betonbauteilen“, Dissertation, TU-Berlin, D83
- [60] Neild, A., Hutchins, D. A., Billson, D. R. (2004), „Imaging using air-coupled polymer-membrane capacitive ultrasonic arrays“, in: Ultrasonics 42, Elsevier, S. 859-864
- [61] Neild, A., Hutchins, D. A., Robertson, T. J., Davis, L. A. J., Billson, D. R. (2005) „The radiated fields of focussing air-coupled ultrasonic phased arrays“, in: Ultrasonics 43, Elsevier, S. 183-195
- [62] Neisecke, J. (1991), „Ultraschallprüfung im Bauwesen – eine kritische Wertung“, Schickert, G. (Hrsg.), in: Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V., Berichtsband 21, Teil 1, Vorträge und Plakatberichte Internationales Symposium Zerstörungsfreie Prüfung im Bauwesen, 27.2. - 1.3.1991, Berlin, S. 182-191
- [63] Pietroni, P., Revel, G. M. (2006), „Non Contact Ultrasonic Techniques for Composite Material Diagnostics in Aeronautics Applications“, in: 9. ECNDT 2006, Berlin
- [64] Polytec (Firma), Handbuch für Laser Doppler Vibrometer (Controller OFV-3001, Messkopf OFV-303)
- [65] Polytec (Firma), Firmenschrift 1/2003: „Info Special“, Geschäftsbereich Lasermesssysteme
- [66] Potter, T. J., Ghaffari, B., Mozurkewich, G. (2005), „Sub-wavelength resolution in air-coupled ultrasound images of spot welds“, in: NDT&E International 38, Elsevier, S. 374-380
- [67] Purnell, P., Gan, T. H., Hutchins, D. A., Berriman, J. (2004), „Noncontact ultrasonic diagnostics in concrete: A preliminary investigation“, in: Cement and Concrete Research 34, S. 1185-1188
- [68] RLB -2.7.2.1 (2004-03-11), „Ermittlung und Angabe der Unsicherheit bei quantitativen Prüfergebnissen (Messunsicherheit)“, aus dem Managementhandbuch Richtlinienband der BAM, 2. Fassung

- [69] Robertson, T. J., Hutchins, D. A., Billson, D. R., Rakels, J. H., Schindel, D. W. (2002), „Surface metrology using reflected ultrasonic signals in air“, in: *Ultrasonics* 39, Elsevier, S. 479-486
- [70] Rose, J. L. (1999), „*Ultrasonic Waves in Solid Media*“, USA, Cambridge University Press, ISBN 0-521-64043-1
- [71] Scheel, H. (2006), „Schnelle Spanndrahtbruchortung in Querspanngliedern von Brückenplatten“, Fachtagung Bauwerksdiagnose – Praktische Anwendungen Zerstörungsfreier Prüfungen, 23.-24.2.2006, Berlin, DGZfP-Berichtsband 100-CD, Vortrag 13
- [72] Scheel, H., Hillemeier, B. (1995), „The Capacity of the Remanent Magnetism Method to Detect Fractures of Steel in Tendons Embedded in Prestressed Concrete“, in: *International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE)*, Proceedings Vol. 1, Ed. by G. Schickert, H. Wiggenhauser, Deutsche Gesellschaft für zerstörungsfreie Prüfung e. V., S. 211-218
- [73] Schickert, G., Krause, M., Wiggenhauser, H. et. al. (2007), „ZfPBau-Kompendium - Verfahren der Zerstörungsfreien Prüfung im Bauwesen“, http://www.bam.de/microsites/zfp_kompendium/welcome.html
- [74] Schickert, M., Tümmeler, U., Bühling, L. (2006), „Rapid Scanning Approaches for Ultrasonic Imaging of Concrete“, in: *DGZfP-Proceedings BB 103-CD*, 9th European Conference on NDT, Berlin, Germany, 25.-29.09.2006
- [75] Schindel, D. W. (1998), „Ultrasonic imaging of solid surfaces using a focussed air-coupled capacitance transducer“, in: *Ultrasonics* 35, Elsevier, S. 587-594
- [76] Schindel, D. W., Bashford, A. G., Hutchins, D. A. (1997), „Focussing of ultrasonic waves in air using a micromachined Fresnel zone-plate“, in: *Ultrasonics* 35, Elsevier, S. 275-285
- [77] Schindel, D. W., Bashford, D. A. Hutchins (1999), „Chromatic aberration of an air-coupled ultrasonic fresnel zone-plate“, in: *Ultrasonics* 46, Elsevier, S. 242-246
- [78] Schindel, D. W., Hutchins, D. A. (Feb. 1994), „Air-Coupled Ultrasonic Transducer, US Patent #5287331
- [79] Schindel, D. W., Forsyth, D.S., Hutchins, D.A., Fahr, A. (1997), „Air-coupled ultrasonic NDE of bonded aluminum lap joints“, in: *Ultrasonics* 35, Elsevier, S. 1-6
- [80] Schubert, F. (1999), „Ausbreitungsverhalten von Ultraschallimpulsen in Beton und Schlussfolgerung für die zerstörungsfreie Prüfung“, Dissertation, Technische Universität Dresden, Dresden
- [81] Shevaldykin V. G., Kozlov V. N., Samokrutov A. A. (1998), „Inspection of concrete by Ultrasonic Pulse-Echo Tomograph with Dry Contact“, 7th European Conference on Non-Destructive Testing, Copenhagen, 26.-29.05.1998

- [82] Shevaldykin, V. G., Samokrutov, A. A., Kozlov, V. N. (2003), „Ultrasonic Low-Frequency Short-Pulse Transducers with Dry Point Contact. Development and Application.“, in: DGZfP (Ed.), International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE), Berlin, Germany, 16.-19.9.2003, Proceedings on BB 85-CD, V66
- [83] Siddiolo, A. M., Maev, R. Gr. (2006), „An Air-Coupled Ultrasonic Technique for NDE of Ancient Paintings“, in: DGZfP-Proceedings BB 103-CD, 9th European Conference on NDT, Berlin, Germany, 25.-29.09.2006
- [84] Sokolov, S. Ja. (1929), „Zur Frage der Fortpflanzung ultraakustischer Schwingungen in verschiedenen Körpern“, ENT 6, S. 454-461
- [85] Solodov, I., Busse, G. (2006), „New Advances in Air-Coupled Ultrasonic NDT Using Acoustic Mode Conversion“, in: DGZfP-Proceedings BB 103-CD, 9th European Conference on NDT, Berlin, Germany, 25.-29.09.2006
- [86] Solodov, I., Döring, D., Busse, G. (2006), „Mapping of Elastic Anisotropy with Air-Coupled Phonon-Focusing of Guided and Surface Waves“, in: DGZfP-Proceedings BB 103-CD, 9th European Conference on NDT, Berlin, Germany, 25.-29.09.2006
- [87] Solodov, I., Pfeleiderer, K., Gerhard., H., Predak, S., Busse, G. (2006), „New opportunities for NDE with air-coupled ultrasound“, in: NDT&E International 39, Elsevier, S. 176-183
- [88] Solodov, I. Yu., Stoessel, R., Busse, G. (2004), „Material characterization and NDE using focused slanted transmission mode of air-coupled ultrasound“, in: Research in Non-Destructive Evaluation, v.15, S. 1-21
- [89] Stoessel, R., Krohn, N., Pfeleiderer, K., Busse, G. (2002), „Air-coupled ultrasound inspection of various materials“, in: Ultrasonics 40, Elsevier, S. 159-163
- [90] Stoppel, M., Mielentz, F., Wiggenhauser, H. (2007), „Automatisierung in der zerstörungsfreien Prüfung“, in: „BetonKalender 1: Verkehrsbauten – Flächentragwerke“, Bergmeister, K. (Hrsg.), Wörner, J.-D. (Hrsg.), Berlin, Ernst & Sohn, S. 518-536, ISBN 978-3-433-01833-0
- [91] Stöbel, R. (2004), „Air-Coupled Ultrasound Inspection as a New Non-Destructive Testing Tool for Quality Assurance“, Dissertation, Universität Stuttgart
- [92] Streicher, D., Algernon, D. et al. (2006), „Großflächige ZfPBau-Untersuchungen an Hohlkastenbrücken der A 23 – Südosttangente Wien“, Forschungsbericht 278, Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung (Hrsg.), Bremerhaven, Wirtschaftsverlag NW, ISBN 3-86509-529-1
- [93] Streicher, D., Kohl, C., Wiggenhauser, H., Taffe, A. (2006), „Automatisierte zerstörungsfreie Zustandsuntersuchungen von Brückenbauwerken“, in: Beton und Stahlbetonbau 101, Heft 5, Berlin, Ernst & Sohn Verlag, S. 330-342
- [94] Streicher, D. Wöstmann, J. Marko, L., Stoppel, M., Wiggenhauser, H. (2006), „Zerstörungsfreie Untersuchung von Spanngliedern mit bildgebendem Ultraschallecho und Radar“, Abschlussbericht zum BAM-Forschungsvorhaben 8543

-
- [95] Taffe, A., Wiggenhauser, H. (2006), „Validation for Thickness Measurement in Civil Engineering with Ultrasonic Echo”, in: Proceedings of the 9th European Conference on NDT, 25.-29.09.2006, Berlin: DGZfP, BB 103-CD, Th. 2.5.3
- [96] Tscharnke, D. (2002), „Fehlerdiagnose in der Ultraschallprüfung durch iterative Modellierung”, Dissertation, TU-Berlin, D83
- [97] Ultrason (Firma), „Application Note AN-305-4: Non-Contact Ultrasound – CONCRETE, HIGHWAY, BRIDGES, AIR STRIPS ANALYSIS”, Demo-CD v.5
- [98] Wiggenhauser, H., Borchardt, K. (2003), „The NDE-CE Compendium in the Internet”, in: DGZfP (Ed.); International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE) in Berlin, Germany, 16.-19.09.2003, Proceedings on BB 85-CD, P01
- [99] Wiggenhauser, H., Krause, M. (2007), „Grundlagen kombinierter zerstörungsfreier Prüfverfahren zur Untersuchung von Betonbauteilen“, in: Tagungsband zum Abschlusskolloquium der DFG-Forschergruppe FOR 384, 03.05.2007, BAST, Bergisch Gladbach, S. 23-44
- [100] Yilmaz, Ö. (2001), „Seismic data analysis: processing, inversion, and interpretation of seismic data, Vol. 1”, S. 271-311, 2. Aufl., USA, Society of Exploration Geophysicists, ISBN 1-56080-098-4
- [101] Zhang, H., Thurber, C., Rowe, C. (2003), „Automatic P-Wave Arrival Detection and Picking with Multiscale Wavelet Analysis for Single-Component Recordings”, in: Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 93, Nr. 5, S. 1904-1912

Eigene Veröffentlichungen

Krause, M., Gräfe, B., Mielentz, F., Milmann, B., Friese, M., Wigenhauser, H., Mayer, K. (2008), „Ultrasonic Imaging of Post-tensioned Concrete Elements: New Techniques for Reliable Localization of Grouting Defects”, in: Alexander, M. G., Beushausen, H.-D., Dehn, F. and P. Moyo {(eds.);} Proceedings of the Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting II, ICCRRR 2008, 24.-26.11.2008, Kapstadt, CD-ROM, pp. 521-527

Gräfe, B. (2008), „Luftgekoppeltes Ultraschallecho-Verfahren für Betonbauteile“, Dissertation, URL: <http://opus.kobv.de/tuberlin/volltexte/2008/1973/>

Krause, M., Gräfe, B., Milmann, B., Mayer, K., „New features for ultrasonic imaging of concrete elements: Phase evaluation and air coupled ultrasound“, in: Structural Faults + Repair–2008, Edinburgh, Scotland, UK, 10.-12.06.2008

Algernon, D., Gräfe, B., Mielentz, F., Köhler, B., Schubert, F. (2008), „Imaging of the Elastic Wave Propagation in Concrete Using Scanning Techniques: Application for Impact-Echo and Ultrasonic Echo Methods”, in: Journal of Nondestructive Evaluation, Volume 27, Numbers 1-3, Springer Netherlands, ISSN 0195-9298 (Print) 1573-4862 (Online)

Krause, M., Gräfe, B., Mielentz, F., Milmann, B., Streicher, D (2007), „New Possibilities for Ultrasonic Imaging of Concrete Elements”, in: „Advances in Construction Materials 2007”, Grosse, C. U. (editierender Lektor), Berlin, Springer, S. 575-582, ISBN-13 978-3-540-72447-6

Gräfe, B., Krause, M. (2006), „Basic investigation with air-coupled ultrasonic echo for concrete elements”, in: NDE Conference on Civil Engineering, August 14–18, 2006, St. Louis, Missouri, ISBN 1-57117-148-7

Anhang

A.1 Signalbearbeitungs- und Auswerteprogramm „US-Analyse“

Die mit der Messapparatur gewonnenen Messdaten wurden in dieser Arbeit bestimmten Algorithmen zur Bearbeitung und Auswertung unterzogen. Weiterhin kommt eine wesentliche Bedeutung der Darstellung der bearbeiteten Daten zu. Zu diesem Zweck wurde im Rahmen der Arbeit ein entsprechendes Programm namens „US-Analyse“ (Ultraschall-Analyse) entwickelt.

A.1.1 Programmiersprache LabVIEW

Das Programm ist in der Programmiersprache „LabVIEW 7.1“ von National Instruments geschrieben. Diese Programmiersprache ist seit einigen Jahren aus der Messtechnik nicht mehr wegzudenken. Mit ihr können in kürzester Zeit kleine Programme zur Steuerung von Hardwarekomponenten (wie z.B. Pulsgenerierung, Scannersteuerung oder Datenaufnahme) oder zur Bearbeitung, Auswertung und Darstellung der Daten etc. programmiert werden. Mittlerweile steht LabVIEW einer textbasierten Programmiersprache wie „C++“ kaum noch nach.

Der Vorteil bei LabVIEW liegt darin, dass es sich um eine ausschließlich graphische Programmiersprache handelt, die eine Vielzahl von fertigen Standardobjekten enthält, die bei Bedarf angepasst werden können. Die Implementierung geschieht über eine graphische Oberfläche, dem Blockdiagramm. In diesem werden Objektbausteine, so genannte virtuelle Instrumente (VI's), die Ein- und Ausgänge besitzen, über Drähte zum Übermitteln von Daten miteinander verbunden. Hinter jedem VI verbirgt sich eine Operation oder wiederum ein ganzes Unterprogramm einschließlich Blockdiagramm. Das Blockdiagramm ähnelt äußerlich einem elektrischen Schaltplan. Der Anwender sieht hingegen lediglich die Benutzeroberfläche, das so genannte Frontpanel-Fenster, für das ebenfalls fertige, anpassungsfähige Objekte, wie Schalter, Graphen, Ein- und Ausgabefelder zur Verfügung stehen.

A.1.2 Kurzbeschreibung und Leistungsumfang von „US-Analyse“

Bei der automatisierten Messung mit luftgekoppeltem Ultraschallecho können je nach Messflächengröße und Messpunktabstand riesige Datenmengen von mehreren MegaByte bis mehreren GigaByte anfallen, die die Arbeitsspeichergröße übersteigen können. Das Programm ist so konzipiert, dass es das Einlesen und Bearbeiten großer Dateien erlaubt. Weiterhin können mehrere Dateien eingelesen werden, um sie direkt miteinander vergleichen zu können. Wichtige Datenparameter und Bemerkungen werden in einer zugehörigen Headerdatei gespeichert.

Bei der Datenaufnahme mit dem Messsystem USPC 4000 AirTech werden automatisch alle relevanten Parameter und Einstellungen am Anfang der Messdatei gespeichert. Beim Einlesen dieser Datei in das Programm „US-Analyse“ werden alle erforderlichen Headerdaten aus der Datei mit eingelesen und in das programminterne Format abgespeichert, wodurch zusätzlicher Eingabeaufwand entfällt.

Folgende Bearbeitungsmöglichkeiten stehen momentan zur Verfügung:

- Filtern...: Es stehen verschiedenste Filtermöglichkeiten zur Auswahl. Bei der Parametereinstellung werden die Änderungen durch die Filterung beispielhaft an einem der Signale der Datei im Zeitbereich und im Frequenzbereich dargestellt.
- Auto- und Kreuzkorrelation
- Verschieben: Verschiebung der Daten in Zeitrichtung durch Wegschneiden von Daten und Anhängen von Nullen
- zero-padding: Nullpolsterung = Auffüllen der Signale mit Nullen, bis die Datenpunktzahl eines Signals die nächste Potenz von 2 erreicht (z.B. von 1000 Punkte auf 1024 Punkte)
- Mittelwert abziehen: zur Entfernung eines Gleichspannungsanteils in den Daten
- Betrag
- Wellenzug rausfiltern: in einem B-Bild durch Subtraktion eines gleitenden Mittelwertes innerhalb eines Fensters nach einem Zeit- und Amplitudenausgleich (siehe Anhang A.1.3)
- Datensätze verknüpfen: zwei eingelesene Datensätze können addiert, subtrahiert, multipliziert oder dividiert werden
- FFT-Amplitudenspektrum
- Hilbert: Anwendung der Hilbert-Transformation
- Einhüllende über Hilbert: Bildung der Einhüllenden über die Hilbert-Transformierte
- Einsatzpunkte & Laufzeiten: Es können Einsatzpunkte automatisiert gepickt werden. Statt der gepickten Einsatzzeit lässt sich auch die Laufzeit oder die zugehörige Spannung darstellen. Das Picken kann wahlweise über einen erweiterten Schwellwertalgorithmus, das Akaike-Information-Kriterium (AIC) ([54],[101]) oder über das Maximum der Einhüllenden (der Hilbert-Transformierten) bestimmt werden. Nicht gepickte Einsatzpunkte können interpoliert werden.
- CMP-Analyse [100]: Für eine Common-Midpoint-Messung oder eine bistatische Messung an einer ebenen Platte mit paralleler Ober- und Unterseite kann ein Geschwindigkeitsspektrum mit zugehörigen Schnitten erzeugt werden. Das Maximum im Geschwindigkeitsspektrum wird automatisch gepickt und ebenfalls in den Schnitten markiert. Für eine gewählte Schallgeschwindigkeit kann das B-Bild nach der NMO-Korrektur dargestellt werden. Hilfreich ist die Option, vor der NMO-Korrektur Datenpunkte, die zeitlich später ab einer im B-Bild definierten Geraden auftreten, auf Null zu setzen. Dadurch kann z.B. die an der Abschirmung gebeugte Luftwelle weggeschnitten werden, damit sie keine Artefakte im Geschwindigkeitsspektrum erzeugt.

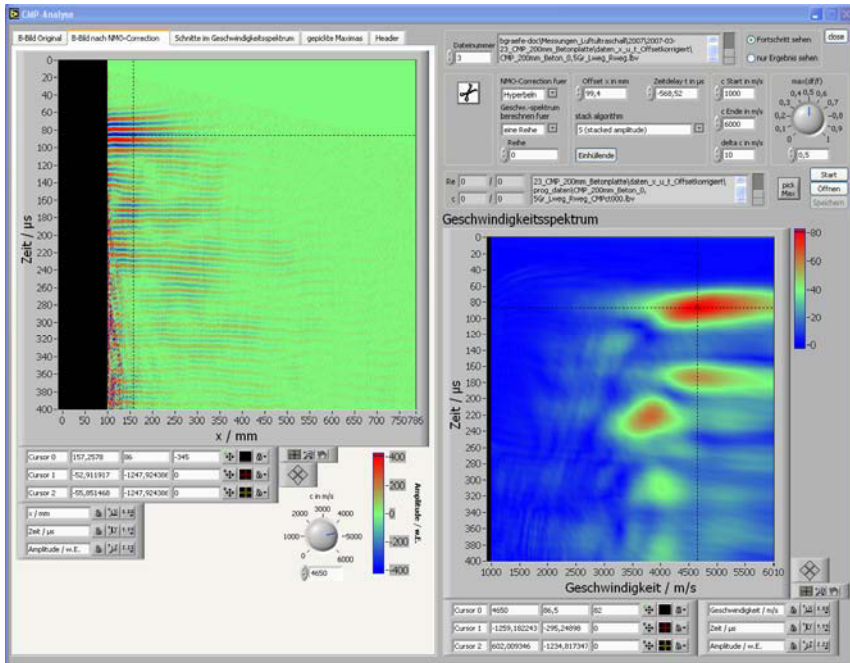


Abbildung A.1.1 Programmfenster für die CMP-Analyse

Die Darstellung der Daten geschieht in separaten Fenstern:

- A-, B-, D-Bilder: werden hier nebeneinander dargestellt und sind miteinander verknüpft. Das bedeutet, dass sich Änderungen in einem Bild auch auf die anderen Bilder auswirken können. Gesteuert werden sie über Cursor in den Bildern. Es stehen eine Vielzahl von Werkzeugen zur Verfügung, wie Zoomfunktionen, Koordinatentransformation, Farbskalen, Amplitudenskalierung, etc. Der Signalwert wird durch Berücksichtigung der Digitalisierungsparameter und durch einen Umrechnungsfaktor in der physikalisch richtigen Größe zum quantitativen Vergleich angegeben. Durch schnelles Wechseln zwischen eingelesenen Datensätzen können diese direkt miteinander verglichen werden.
- C-Bilder: Zur Darstellung von C-Bildern. Dieses Fenster bietet die gleichen Funktionen wie das für A-, B-, D-Bilder mit der zusätzlichen Möglichkeit, die C-Bildschnitte nacheinander in Form eines Films abspielen zu lassen.
- C-Bilder 3D: C-Bildschnitte werden hier als dreidimensionale Oberfläche dargestellt.

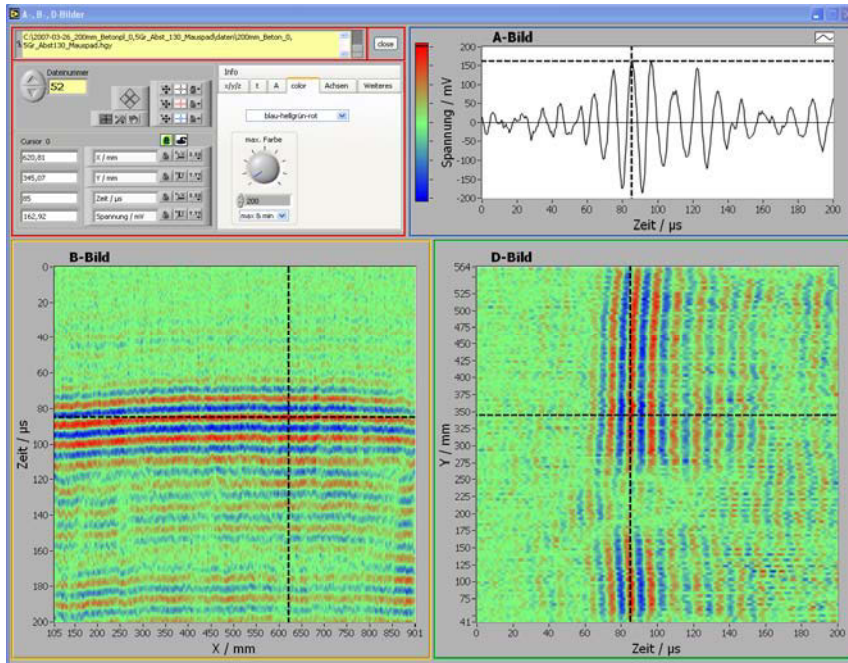


Abbildung A.1.2 Programmfenster zur Darstellung der A-, B- und D-Bilder

A.1.3 Unterdrückung von Wellenzügen in B-Bildern

Im Folgenden soll die Funktionsweise und Anwendung des Unterprogramms zur Unterdrückung von Wellenzügen in B-Bildern nach Abschnitt 5.3.2.1 beispielhaft an der bistatischen Messung unter einem Einfallswinkel des Sendepfückopfes von 12° (Abbildung 5.5 und Abbildung A.1.4 (a)) gezeigt werden. Die geradlinige Rayleighwelle soll in dem B-Bild weitestgehend unterdrückt werden, um Wellen, die von ihr überdeckt werden, sichtbar zu machen. Für den Amplitudenausgleich gilt nach Gl. 2.5, dass die Amplitude der Rayleighwelle proportional mit $(k_R \cdot r)^{-0,5}$ abnimmt. Hier führen allerdings Funktionen höherer Ordnung zu einem besseren Amplitudenausgleich. Es wird wie folgt vorgegangen:

1. **Stützstellen für Zeitausgleichsfunktion $t(x)$ picken:**
Im B-Bild wird die stärkste Phase des Wellenzuges (hier der Rayleighwelle) gesucht. Entlang dieser Phase werden mit dem Cursor einige Punkte gepickt, die als Stützstellen für die Zeitausgleichsfunktion $t(x)$ dienen.
2. **Zeitausgleichsfunktion $t(x)$ berechnen:**
Für $t(x)$ wird eine geeignete Modellgleichung gewählt. Für die Rayleighwelle ist dies eine Geradengleichung $a+b \cdot x$. Die unbekannt Parameter a und b werden mit Hilfe des Levenberg-Marquardt Algorithmus (Prinzip des kleinsten mittleren quadratischen Fehlers) und der gepickten Stützstellen berechnet.

3. **Stützstellen für Amplitudenausgleichsfunktion $A(x)$ wählen:**

Die Signalwerte im B-Bild entlang $t(x)$ werden in einem x -A-Diagramm dargestellt, wie in Abbildung A.1.3 (schwarze Kurve) zu sehen. In diesem werden mit dem Cursor ausreichend Punkte (Stützstellen) markiert, durch die die Amplitudenausgleichsfunktion $A(x)$ verlaufen soll (grüne Kreuze).
4. **Amplitudenausgleichsfunktion $A(x)$ berechnen:**

Für $A(x)$ wird nun ebenfalls eine passende Modellgleichung gewählt. Hier führt die Modellgleichung $a/(b+c*x)^6$ zu einer guten Anpassung. Die drei unbekannt Parameter a , b und c werden wieder mit dem Levenberg-Marquardt Algorithmus berechnet, um $A(x)$ zu erhalten (rote Kurve in Abbildung A.1.3)
5. **Fenster wählen:**

Es muss ein Fenster innerhalb des B-Bildes definiert werden, in dem der Algorithmus zur Unterdrückung des Wellenzuges angewendet werden soll. Dieser Bereich sollte nicht unnötig größer als der herauszufilternde Wellenzug sein. Man wähle z.B. ein Band entlang der anfangs ausgewählten Phase des Pulses. Dieses Band ist definiert durch eine linke und rechte Begrenzung in x -Richtung im B-Bild und durch einen Zeitbereich vor und einen nach der ausgewählten Phase.
6. **Mittlungsfensterbreite N wählen:**

Es wird die Breite (Anzahl A-Bilder) des in x -Richtung zu verschiebenden Fensters N gewählt. Hier wird ein gutes Ergebnis mit einer Fensterbreite von 31 A-Bildern erreicht.
7. **Wichtung innerhalb des Zeitfensters:**

Das im Mittlungsfenster gemittelte A-Bild kann über eine Fensterfunktion, wie z.B. einem Hanning-Fenster in Zeitrichtung gewichtet werden. Dies führt hier zu keiner Verbesserung des Ergebnisses und wird deshalb nicht angewendet.
8. **Vorschau:**

Eine Vorschau des unterdrückten Wellenzuges Abbildung A.1.4 (b) und des wellenzugbereinigten B-Bildes (Abbildung A.1.4 (c)) gibt einen visuellen Eindruck über die Qualität der Funktionen und Parameter. So sollte z.B. der unterdrückte Wellenzug möglichst störungsfrei aussehen.

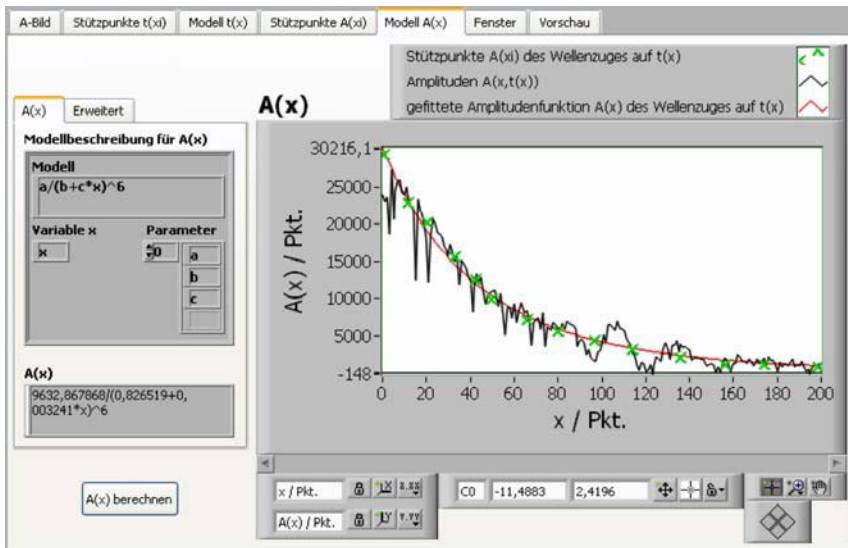


Abbildung A.1.3 Ausschnitt aus dem Unterprogramm von „US-Analyse“ zur Unterdrückung von Wellenzügen in B-Bildern; Hier wird beispielhaft die Rayleighwelle aus dem B-Bild aus Abbildung 5.5 (12°) unterdrückt; geöffnet ist die Registerkarte zur Bestimmung der Amplitudenausgleichsfunktion A(x) mit Hilfe des Levenberg-Marquardt Algorithmus und gewählter Stützstellen

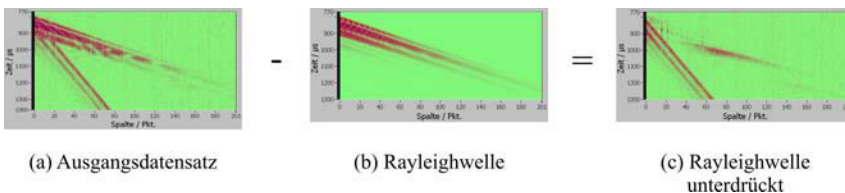


Abbildung A.1.4 Wellenzerlegung im B-Bild von Abbildung 5.5 (12°): Ausgangsdatensatz (a) – Rayleighwelle (b) = B-Bild mit unterdrückter Rayleighwelle (c); das von der Rayleighwelle verdeckte Transversalwellen-Rückwandecko ist in (c) gut erkennbar

A.2 Weitere Wellenfrontbilder der Modellierung

Zur besseren Veranschaulichung der in Abbildung 6.3 des Abschnitts 6.2.2 gezeigten Wellenausbreitung von ACU-Echo in einer Betonplatte bei einem Einfallswinkel von 2° in der Tandemanordnung werden im Folgenden weitere Wellenfrontbilder in einem engeren Zeitraster dargestellt. Die Modellierung wurde von Dr.-Ing. Frank Schubert vom Fraunhofer IZFP-Dresden durchgeführt.

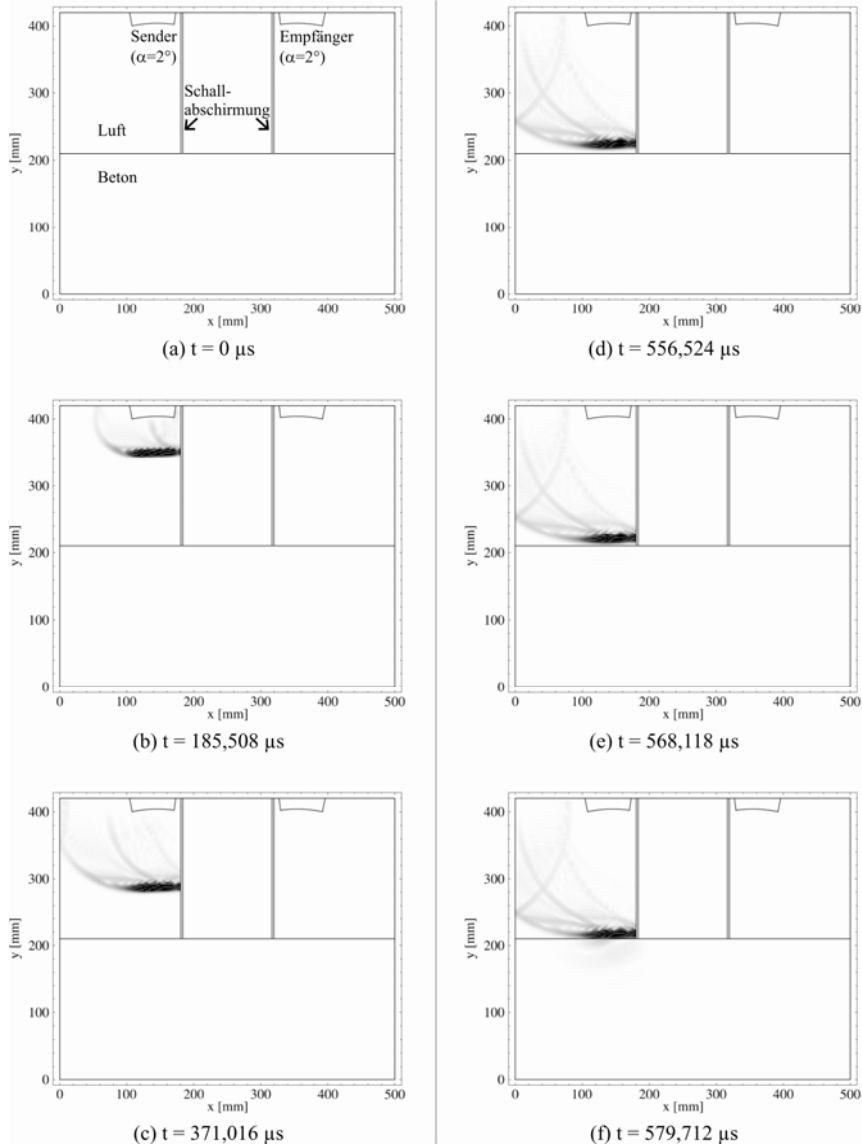


Abbildung A.2.1 Wellenbilder mit Abschirmung (Beschriftung siehe Abbildung A.2.4)

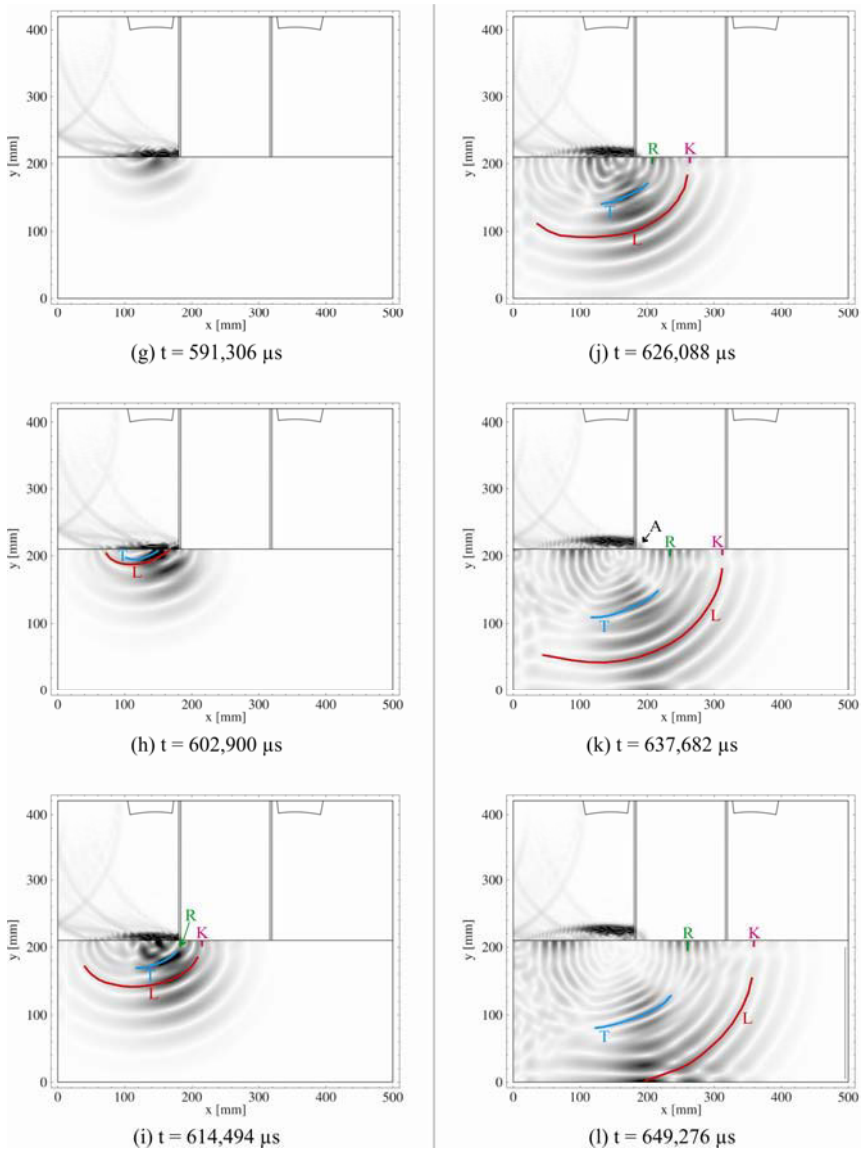


Abbildung A.2.2 Wellenbilder mit Abschirmung (Fortsetzung von Abbildung A.2.1)

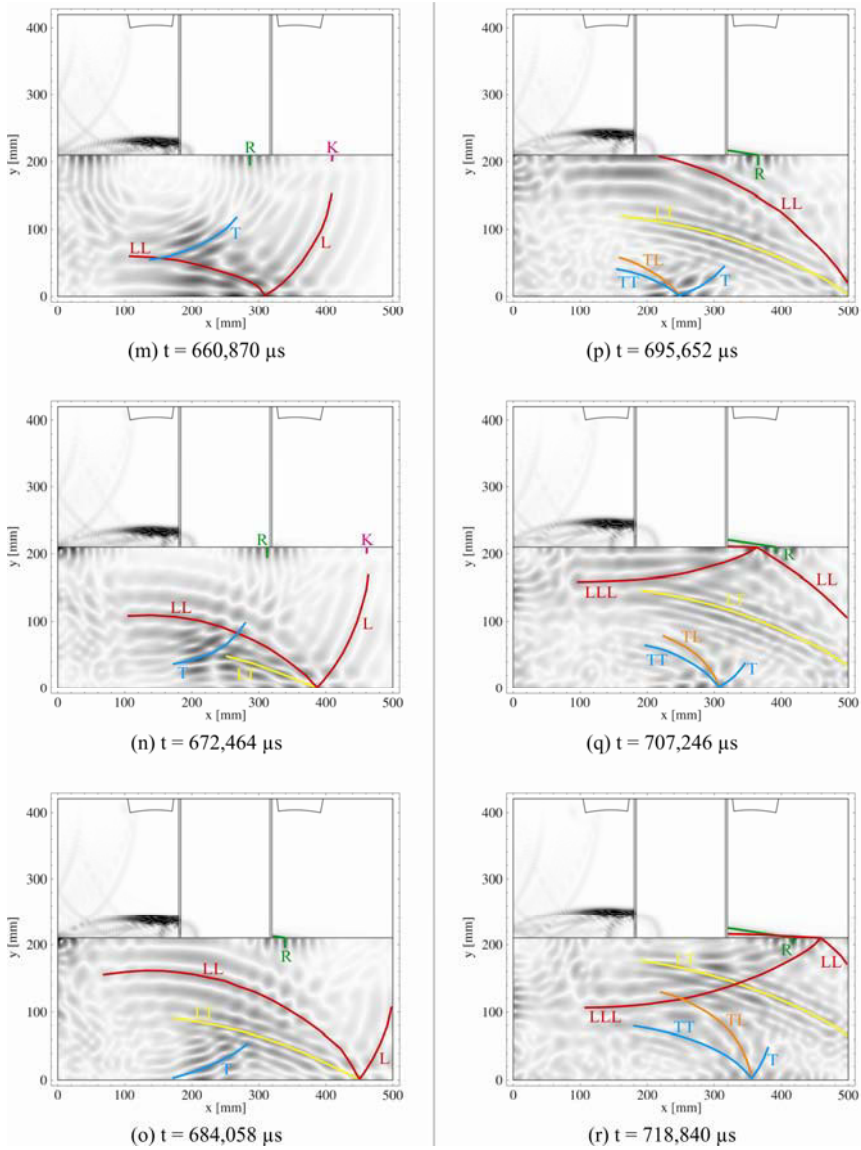


Abbildung A.2.3 Wellenbilder mit Abschirmung (Fortsetzung von Abbildung A.2.2)

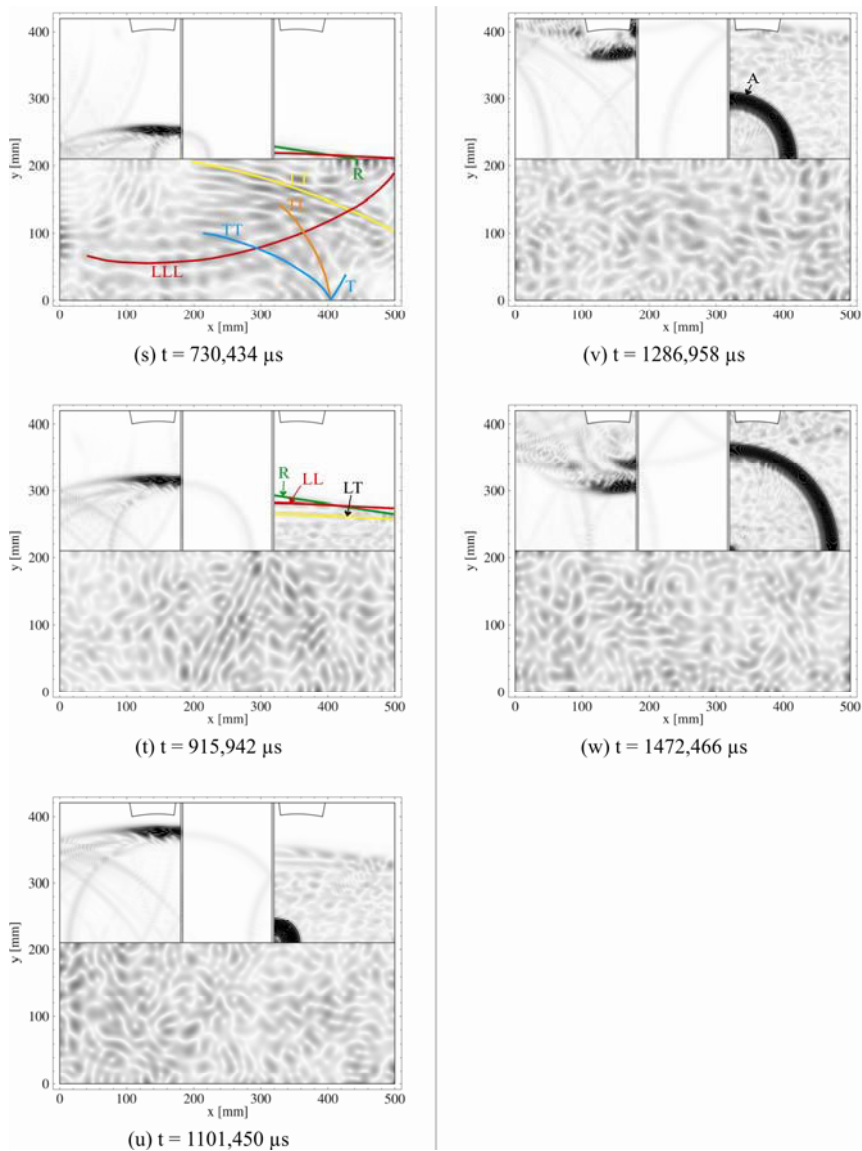
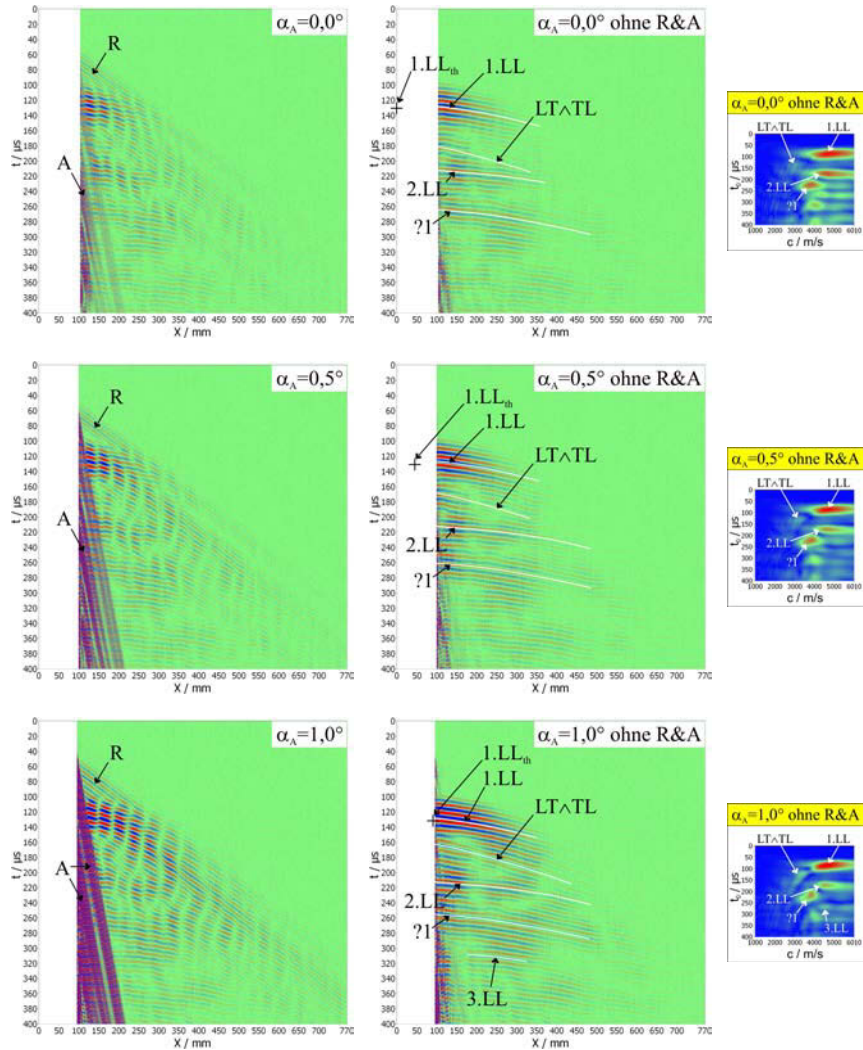
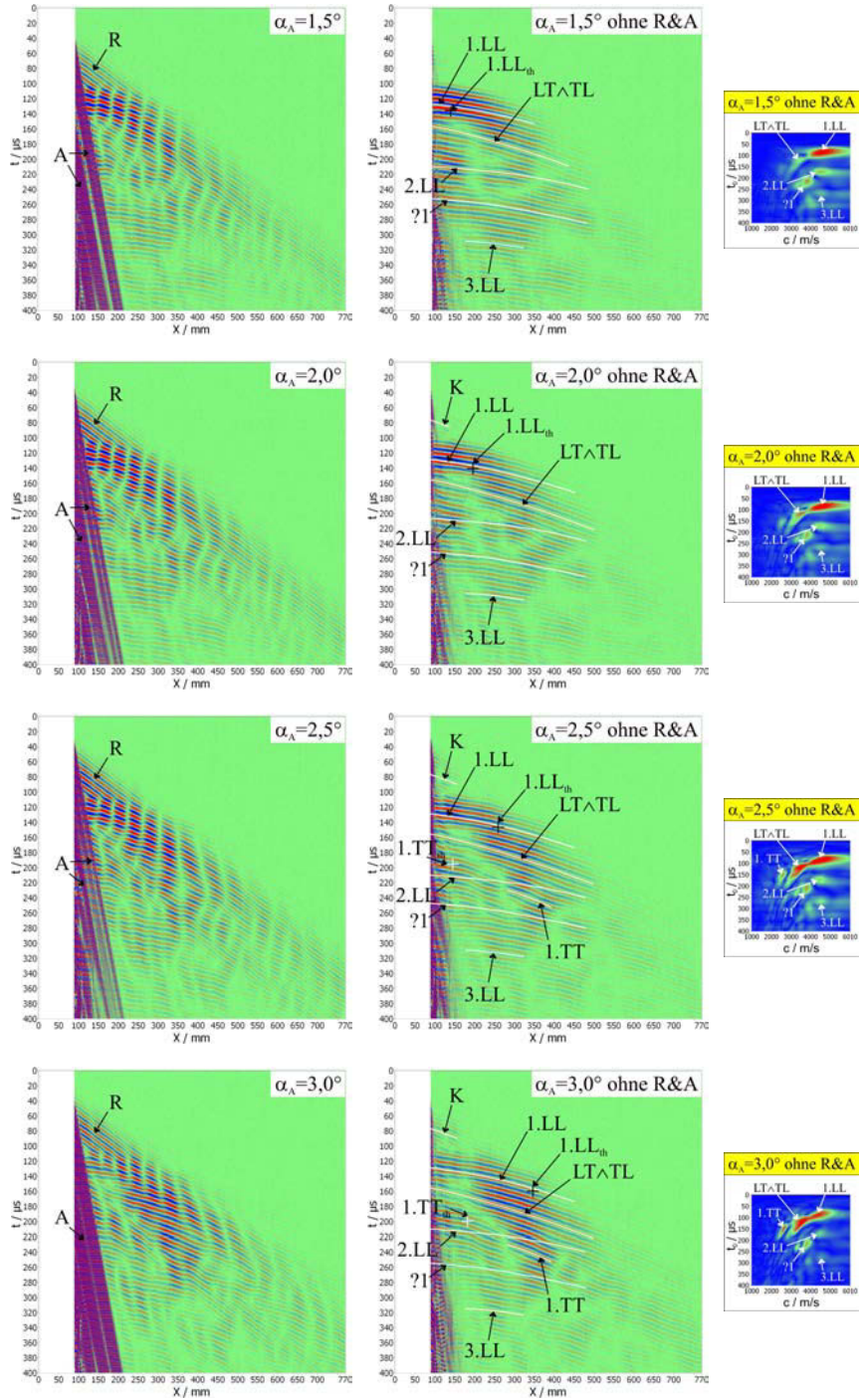


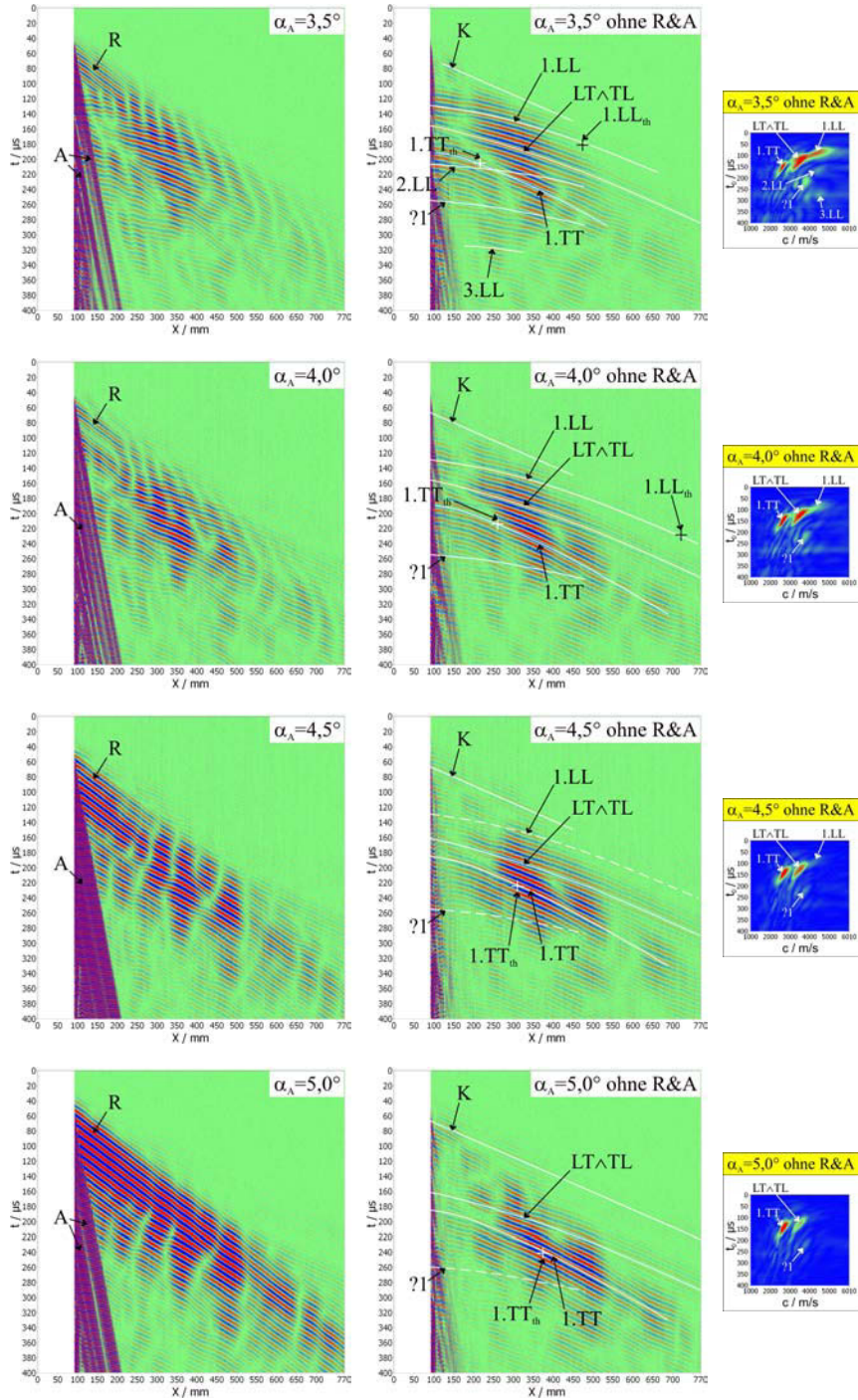
Abbildung A.2.4 Wellenfrontbilder der Modellierung mit Abschirmung (Fortsetzung von Abbildung A.2.3); Wellenfeld im Beton um den Faktor 3000 und in Luft rechts von der rechten Abschirmung um den Faktor 1500 überhöht dargestellt; abgebildet ist der Betrag des Teilchengeschwindigkeitsvektors; Die Modellierung wurde von Dr.-Ing. Frank Schubert vom Fraunhofer IZFP-Dresden durchgeführt.

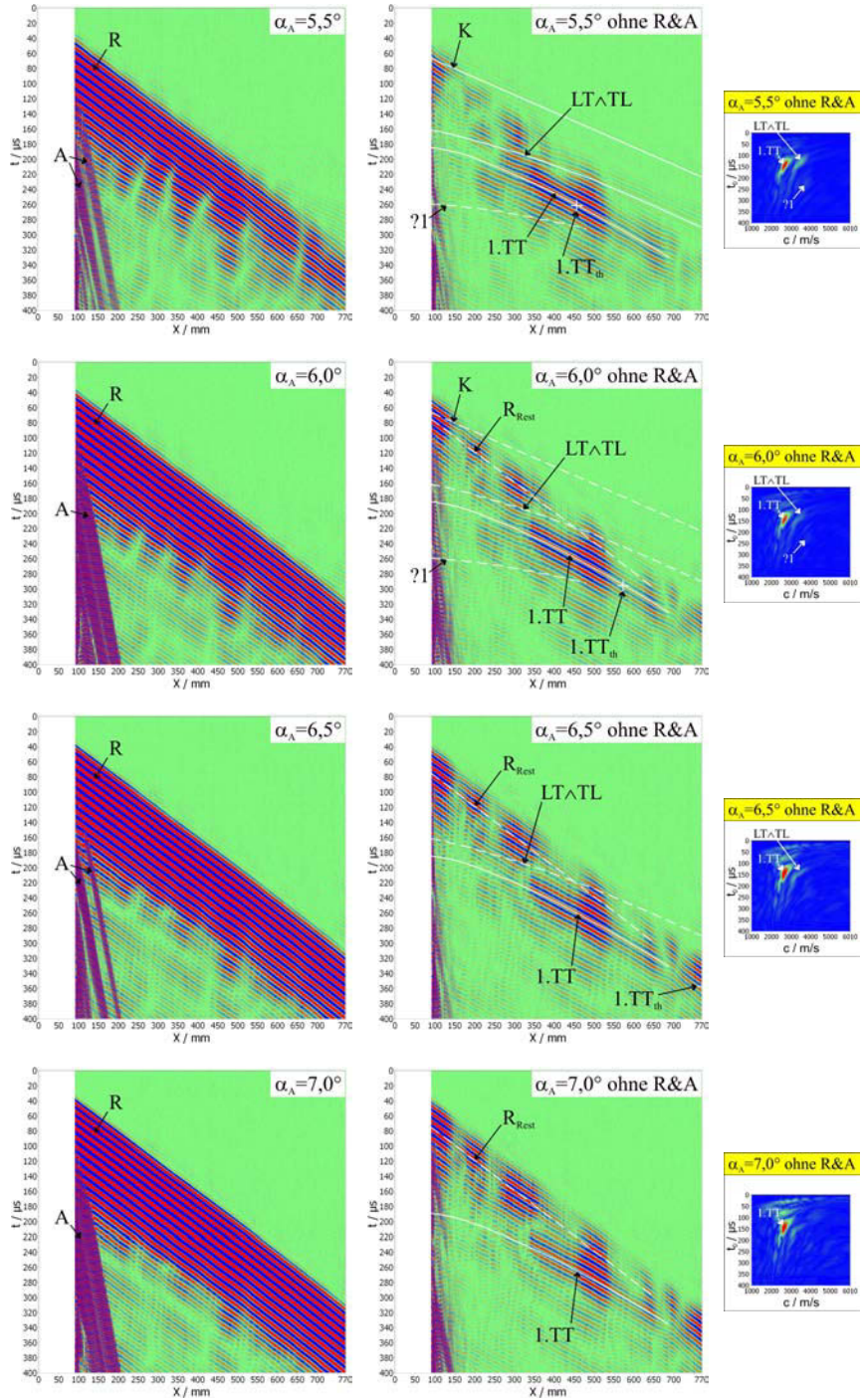
A.3 Weitere Messergebnisse zu Abschnitt 8.2

In diesem Anhang sind zugehörig zu Abbildung 8.3 in Abschnitt 8.2.2 weitere Messergebnisse unter Einfallswinkeln von $\alpha_A = 0,0^\circ$ bis $7,5^\circ$ in Winkelschritten von $0,5^\circ$ abgebildet.









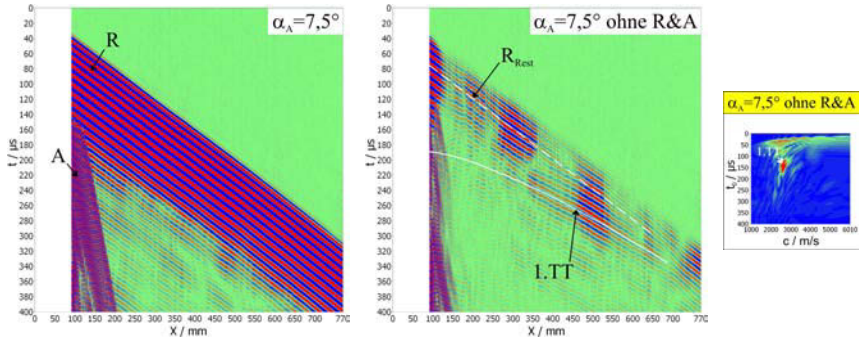


Abbildung A.3.1 Messergebnisse bei bistatischer Prüfkopfanzordnung an 200 mm dicker Betonplatte bei Einfallswinkeln α_A von $0,0^\circ$ - $7,5^\circ$ in Winkelschritten von $0,5^\circ$; links: B-Bild; mitte: B-Bild nach digitaler Unterdrückung der Rayleighwelle R und Luftwelle A; rechts: Geschwindigkeitsspektrum des B-Bildes in der Mitte

A.4 Fehlerfortpflanzung – Berechnung der kombinierten Standardunsicherheit

Im Folgenden wird beispielhaft mit dem Fehlerfortpflanzungsgesetz die Berechnung der kombinierten Standardunsicherheit $u(d_L)$, der in Abschnitt 8.2.2.2 über das erste Longitudinalwellen-Rückwandecho 1.LL gemessenen Betondicke d_L , nach [34] gezeigt. Die Berechnung gilt für luftgekoppelten Ultraschallecho in Tandemanordnung, bei der sowohl beide Einfallswinkel als auch näherungsweise die Abstände der Prüfköpfe zur Körperoberfläche in Richtung der Flächennormalen gleich sind.

Das Schema kann auch analog zur Berechnung der kombinierten Standardunsicherheit $u(d_T)$ der Betondicke d_T über das erste Transversalwellen-Rückwandecho 1.TT angewendet werden. Dazu muss in den Gleichungen lediglich die Schallgeschwindigkeit der Longitudinalwelle c_L durch die Schallgeschwindigkeit der Transversalwelle c_T ersetzt werden. Außerdem wird für den Einsatzpunkt (Maximum der Einhüllenden) des Echosignals t_{Empf} der des Transversalwellenechos statt des Longitudinalwellenechos verwendet.

A.4.1 Modellfunktion

Zunächst wird die Modellfunktion zur Bestimmung der über das Longitudinalwellen-Rückwandecho 1.LL gemessenen Betondicke d_L aufgestellt. Diese Funktion muss alle möglichen Eingangsgrößen in Form von Variablen enthalten.

Ausgang der Modellfunktion bildet der einfache Zusammenhang einer monostatischen Echomessung

$$c_L = \frac{2d_L}{t_{0,1.LL}}, \quad \text{Gl. 9.1}$$

Dabei ist c_L die Schallgeschwindigkeit der Longitudinalwelle im Beton und $t_{0,1.LL}$ die Laufzeit des Longitudinalwellenechos im Beton bei einer monostatischen Prüfkopf-anordnung. Durch Umformung von Gl. 9.1 erhält man:

$$d_L = \frac{1}{2} c_L \cdot t_{0,1.LL}. \quad \text{Gl. 9.2}$$

Nun wird der Schritt von der monostatischen Anordnung zur Tandemanordnung vollzogen, indem Gl. 2.17 der Form

$$t_{0,1.LL} = \sqrt{t_{1.LL}^2 - \left(\frac{x_{\text{Eintritt/Austritt}}}{c_L} \right)^2} \quad \text{Gl. 9.3}$$

herangezogen wird. $t_{1.LL}$ ist dabei die Laufzeit des ersten Longitudinalwellen-Rückwandechos 1.LL im Beton und $x_{\text{Eintritt/Austritt}}$ der Abstand vom Schalleintritts- zum Schallaustrittspunkt auf der Grenzfläche Luft/Beton.

$x_{\text{Eintritt/Austritt}}$ lässt sich wiederum auf den Abstand vom Sende- zum Empfangsprüfkopf $x_{S/E}$, den Abstand vom Sende- bzw. Empfangsprüfkopf zur Körperoberfläche $x_{A,L}$ und den Einfallswinkel α_A zurückführen:

$$x_{\text{Eintritt / Austritt}} = x_{S/E} - 2x_{A\perp} \cdot \tan(\alpha_A). \quad \text{Gl. 9.4}$$

Gl. 9.4 gilt nur bei gleichem Abstand der Prüfköpfe zur Körperoberfläche in Richtung der Flächennormalen sowie gleichen Einfallswinkeln der Prüfköpfe.

Man erhält durch Einsetzen von Gl. 9.4 in Gl. 9.3 und dessen Ergebnis in Gl. 9.2 den Ausdruck

$$d_L = \frac{1}{2} c_L \cdot \left(t_{1,LL}^2 - \frac{(x_{S/E} - 2x_{A\perp} \cdot \tan(\alpha_A))^2}{c_L^2} \right)^{0,5}. \quad \text{Gl. 9.5}$$

Die Laufzeit $t_{1,LL}$ ergibt sich aus dem gepickten Einsatzpunkt (Maximum der Einhüllenden) des Empfangssignals t_{Empf} nach Abzug der Gesamtvorlaufzeit $t_{\text{Vorlauf,ges}}$:

$$t_{1,LL} = t_{\text{Empf}} - t_{\text{Vorlauf,ges}} \quad \text{Gl. 9.6}$$

Die Bestimmungsgleichung der Gesamtvorlaufzeit wird durch Gl. 8.1 beschrieben. Durch Einsetzen von Gl. 8.1 in Gl. 9.6 und dessen Ergebnis in Gl. 9.5 erhält man die gesuchte Bestimmungsgleichung für die Betondicke bei luftgekoppeltem Ultraschall-echo in Tandemanordnung:

$$d_L = \frac{1}{2} c_L \cdot \left\{ \left[t_{\text{Empf}} - \left(\frac{t_{\text{mono}} - t_{\text{Vorlauf,ohne_Luft}}}{\cos(\alpha_A)} + t_{\text{Vorlauf,ohne_Luft}} \right) \right]^2 - \frac{(x_{S/E} - 2x_{A\perp} \cdot \tan(\alpha_A))^2}{c_L^2} \right\}^{0,5}. \quad \text{Gl. 9.7}$$

Sie enthält sieben Eingangsgrößen, die alle mit Unsicherheiten behaftet sind.

A.4.2 Eingangsgrößen und Unsicherheiten

Die Eingangsgrößen sind hier aus Einzelmessungen hervorgegangen. Die Unsicherheiten sind Schätzwerte, von denen angenommen wird, dass sie einen Vertrauensbereich von 95 % abdecken. Dies entspricht einem Erweiterungsfaktor von $k = 2$ unter Annahme einer Gauß'schen Normalverteilung. Im Folgenden werden der Übersicht halber die Eingangsgrößen in x_1 bis x_7 umbenannt. Für die Eingangsgrößen und Unsicherheiten ergeben sich folgende Werte:

$x_1 := c_L = 4,33 \frac{mm}{\mu s};$	$u(x_1) = \pm 0,14 \frac{mm}{\mu s}$
$x_2 := t_{\text{Empf}} = 661 \mu s;$	$u(x_2) = \pm 2,5 \mu s$
$x_3 := t_{\text{mono}} = 568,5 \mu s;$	$u(x_3) = \pm 2,5 \mu s$
$x_4 := t_{\text{Vorlauf,ohne_Luft}} = 9 \mu s;$	$u(x_4) = \pm 1 \mu s$
$x_5 := \alpha_A = 0,5^\circ = 8,727 \cdot 10^{-3};$	$u(x_5) = \pm 0,5^\circ = \pm 8,727 \cdot 10^{-3}$
$x_6 := x_{S/E} = 130,5 mm;$	$u(x_6) = \pm 0,5 mm$
$x_7 := x_{A\perp} = 89,3 mm;$	$u(x_7) = \pm 0,5 mm$

Aus Gl. 9.7 ergibt sich dann die Betondicke zu:

$$\begin{aligned}
 d_L &= \frac{1}{2} x_1 \cdot \left\{ \left[x_2 - \left(\frac{x_3 - x_4}{\cos(x_5)} + x_4 \right) \right]^2 - \frac{(x_6 - 2x_7 \cdot \tan(x_5))^2}{x_1^2} \right\}^{0,5} \\
 &= 189,6 \text{ mm} \\
 &\approx 190 \text{ mm} .
 \end{aligned}
 \tag{Gl. 9.8}$$

A.4.3 Partielle Ableitungen der Modellfunktion

Zur Berechnung der kombinierten Standardunsicherheit benötigt man die partiellen Ableitungen der Modellfunktion Gl. 9.8. Mit den definierten Hilfsvariablen

$$\begin{aligned}
 h_1 &:= \frac{1}{4} x_1 \cdot \left\{ \left[x_2 - \left(\frac{x_3 - x_4}{\cos(x_5)} + x_4 \right) \right]^2 - \frac{(x_6 - 2x_7 \cdot \tan(x_5))^2}{x_1^2} \right\}^{-0,5} , \\
 h_2 &:= 2 \cdot \left[x_2 - \left(\frac{x_3 - x_4}{\cos(x_5)} + x_4 \right) \right] \quad \text{und} \\
 h_3 &:= \frac{2 \cdot (x_6 - 2x_7 \cdot \tan(x_5))}{x_1^2}
 \end{aligned}$$

erhält man:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial d_L}{\partial x_1} &= \frac{d_L}{x_1} + h_1 \cdot \frac{2 \cdot (x_6 - 2x_7 \cdot \tan(x_5))^2}{x_1^3} = 48,85 \mu\text{s} \\
 \frac{\partial d_L}{\partial x_2} &= h_1 \cdot h_2 = 2,287 \frac{\text{mm}}{\mu\text{s}} \\
 \frac{\partial d_L}{\partial x_3} &= -\frac{h_1 \cdot h_2}{\cos(x_5)} = -2,287 \frac{\text{mm}}{\mu\text{s}} \\
 \frac{\partial d_L}{\partial x_4} &= h_1 \cdot h_2 \cdot \left(\frac{1}{\cos(x_5)} - 1 \right) = 8,708 \cdot 10^{-5} \frac{\text{mm}}{\mu\text{s}} \\
 \frac{\partial d_L}{\partial x_5} &= h_1 \cdot \left\{ h_2 \cdot (x_4 - x_3) \cdot \frac{\sin(x_5)}{(\cos(x_5))^2} + h_3 \cdot \frac{2x_7}{(\cos(x_5))^2} \right\} \\
 &= 19,21 \text{ mm} \\
 \frac{\partial d_L}{\partial x_6} &= -h_1 \cdot h_3 = -0,1701 \\
 \frac{\partial d_L}{\partial x_7} &= 2h_1 \cdot h_3 \cdot \tan(x_5) = 2,968 \cdot 10^{-3}
 \end{aligned}
 \tag{Gl. 9.9}$$

A.4.4 Berechnung der kombinierten Standardunsicherheit

Die verallgemeinerte Form des „Fehlerfortpflanzungsgesetzes“ zur Berechnung der kombinierten Standardunsicherheit lautet

$$u(d_L) = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left[\left(\frac{\partial d_L}{\partial x_i} \right)^2 \cdot u(x_i)^2 \right] + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{k=i+1}^N \left[\frac{\partial d_L}{\partial x_i} \frac{\partial d_L}{\partial x_k} \cdot u(x_i, x_k) \right]} \quad \text{Gl. 9.10}$$

Der zweite Term in Gl. 9.10 berücksichtigt Korrelationen zwischen den Eingangsgrößen. „Eine Korrelation liegt dann vor, wenn Messabweichungen zweier Eingangsgrößen x_i und x_k nicht unabhängig voneinander, sondern stets gleichsinnig oder gegensinnig auftreten“ [34].

In dem vorliegenden Fall sind die Eingangsgrößen unabhängig voneinander, weshalb sich Gl. 9.10 zu

$$u(d_L) = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left[\left(\frac{\partial d_L}{\partial x_i} \right)^2 \cdot u(x_i)^2 \right]} \quad \text{Gl. 9.11}$$

vereinfacht.

Mit Gl. 9.11 sowie den einzelnen Unsicherheiten $u(x_i)$ und den berechneten partiellen Ableitungen Gl. 9.9 lässt sich nun die kombinierte Standardunsicherheit für die Betondicke berechnen:

$$u(d_L) = \sqrt{\begin{aligned} & (48,85 \mu\text{s})^2 \cdot \left(\pm 0,14 \frac{\text{mm}}{\mu\text{s}} \right)^2 \\ & + \left(2,287 \frac{\text{mm}}{\mu\text{s}} \right)^2 \cdot (\pm 2,5 \mu\text{s})^2 \\ & + \left(-2,287 \frac{\text{mm}}{\mu\text{s}} \right)^2 \cdot (\pm 2,5 \mu\text{s})^2 \\ & + \left(8,708 \cdot 10^{-5} \frac{\text{mm}}{\mu\text{s}} \right)^2 \cdot (\pm 1 \mu\text{s})^2 \\ & + (19,21 \text{mm})^2 \cdot (\pm 8,727 \cdot 10^{-3})^2 \\ & + (-0,1701)^2 \cdot (\pm 0,5 \text{mm})^2 \\ & + (2,968 \cdot 10^{-3})^2 \cdot (\pm 0,5 \text{mm})^2 \end{aligned}} \quad \text{Gl. 9.12}$$

$$\begin{aligned}
 u(d_L) &= \sqrt{
 \begin{aligned}
 &46,77 \text{ mm}^2 \\
 &+ 32,69 \text{ mm}^2 \\
 &+ 32,69 \text{ mm}^2 \\
 &+ 7,583 \cdot 10^{-9} \text{ mm}^2 \\
 &+ 0,02811 \text{ mm}^2 \\
 &+ 7,234 \cdot 10^{-3} \text{ mm}^2 \\
 &+ 2,202 \cdot 10^{-6} \text{ mm}^2
 \end{aligned}
 } \\
 &= 10,6 \text{ mm} \approx 11 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

$$\frac{u(d_L)}{d_L} = \frac{10,6 \text{ mm}}{190 \text{ mm}} = 5,6\% \qquad \text{Gl. 9.13}$$

Gl. 9.12 entnimmt man, dass die vier letzten Terme vernachlässigbar klein sind. Somit haben hier nur die Unsicherheiten $u(c_L)$, $u(t_{\text{Empf}})$ und $u(t_{\text{mono}})$ einen Einfluss auf die kombinierte Standardunsicherheit.

A.4.5 Ergebnis

Die Betondicke wurde zu $d_L = 190 \text{ mm}$ mit einer Messunsicherheit von $u(d_L) = 11 \text{ mm} = 5,6 \%$ (bezogen auf d_L) bestimmt.